VERÖFFENTLICHUNGEN
des Instituts für Geotechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Herausgeber: H. Klapperich, H. Konietzky

Heft 2009-3

Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk

von Dr.-Ing. Wolf-Peter Kamlot

Freiberg 2009

Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky
Prof. Dr.-Ing. Herbert Klapperich

Anschrift: TU Bergakademie Freiberg
Institut für Geotechnik
Gustav-Zeuner-Straße 1
09596 Freiberg
Telefon: 03731 39-2492
Fax: 03731 39-3501
E-Mail: ifgt@ifgt.tu-freiberg.de
Internet: http://tu-freiberg.de/fakult3/gt/

Herstellung: DDF Digitaldruckfabrik GmbH
Leipzig
Printed in Germany

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Herausgeber ist es nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus nachzudrucken oder auf fotomechanischem oder elektronischem Wege zu vervielfältigen.

Für den Inhalt ist der Autor allein verantwortlich.

© Institut für Geotechnik - TU Bergakademie Freiberg - 2009

ISSN 1611-1605

Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der
TU Bergakademie Freiberg

angenommene

Habilitationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur habilitatus
(Dr.-Ing. habil.)

vorgelegt

von Dr.-Ing. Wolf-Peter Kamlot
geboren am 07.09.1955 in Sangerhausen

eingereicht am 17.06.2008

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux, Clausthal
Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Helmut Bock, Bad Bentheim

Tag der Verleihung: 02.04.2009

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit fasst die Ergebnisse einer 14jährigen FuE-Tätigkeit am Institut für Gebirgsmechanik Leipzig zur Identifizierung des gebirgsmechanischen Verhaltens und der Integrität des Hauptanhydrits der Leinefolge (Zechstein 3) als Bestandteil der geologischen Barriere für ein radioaktives Endlager im Salz zusammen. Es ist mir ein Bedürfnis, meinen Kollegen für Ihre langjährige Mitarbeit zu danken, ohne die die vorliegende Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Die Untersuchungen wurden vom Bundesforschungsministerium und Bundeswirtschaftsministerium gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe - Wassertechnologie und Entsorgung begleitet. Mein Dank gilt deshalb den ehemaligen Leitern des Projektträgers Herrn Dr. Closs und Herrn Dipl.-Ing. Bechthold sowie dem ehemaligen Leiter der Außenstelle Dresden Herrn Dr. Brückner.

Die Arbeit soll in der Zusammenfassung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse aus 5 FuE-Berichten (KAMLOT, P.; U.A. (1991, 1995, 1999, 2002, 2005)) einen Beitrag zur Lösung der Endlagerfrage für radioaktive Abfälle in Deutschland liefern. Als Mitautoren in den FuE-Berichten mit den umfassendsten Beiträgen sollen Herr Dr. Schwandt und Herr Prof. Dr. Manthei genannt werden.

In Würdigung der umfassenden Unterstützung durch die Bergwerksbetriebe danke ich stellvertretend für das Bergwerk Volkenroda-Pöthen Herrn Dipl.-Ing. Barwitzky und für das Bergwerk Bernburg Herrn Dipl.-Geol. Wendzel.

Die FuE-Vorhaben wurden ab 1992 gemeinsam mit dem damaligen Institut für Tieflagerung des GSF - Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit GmbH bzw. ab 1995 mit dem Bereich Endlagersicherheitsforschung der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH in Braunschweig bearbeitet. Ich danke den beteiligten Kollegen für die langjährige konstruktive Zusammenarbeit.

GEGENSTAND UND INHALT

Der Hauptanhydrit ist Bestandteil der Leinefolge in der Zechsteinformation. Unmittelbar benachbart zum Leinesteinsalz ist er mehr oder weniger intensiv geklüftet. Gebirgsmechanisch weisen die Anhydrit- und Steinsalzschichten ein signifikant abweichendes Verhalten auf. Das Kriech- und Relaxationsverhalten von Steinsalz führt zum Abbau von hohen Deviatorspannungen in der Umgebung der untertägigen Hohlräume. Im Gegensatz dazu kommt es im vergleichsweise steifen und festen Anhydrit zum Aufbau von Deviatorspannungen, die, wenn ausreichend hoch, eine Festigkeitsüberschreitung in den Klüften und eine Beeinträchtigung der geologischen Barrierefunktion nach sich ziehen können. Vorausgesetzt, es existieren hydraulisch wirksame Verbindungen entlang der Klüfte, kann dann ein Zufluss aus isolierten Lösungseinschlüssen im Salinar oder aus dem Deck- und Nebengebirge nicht ausgeschlossen werden. In der Geschichte des deutschen Kali- und Steinsalzbergbaus haben solche Lösungszuflüsse schon stattgefunden.
Im Rahmen von Sicherheitsanalysen kommen Szenarien zur Anwendung, um solche denkbaren und nicht auszuschließenden Entwicklungen eines Endlagers zu beschreiben (MÖNIG, J. (2007)). Während bei der normalen Entwicklung eines Endlagers im Steinsalz von dem langzeitig sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle ausgegangen wird, beschreiben die Szenarien die sogenannte „gestörte“ Entwicklung. Das Anhydritszenario hebt auf den Lösungszufluss entlang der Anhydritklüfte und die sich ergebenden Konsequenzen für den Isolationsbereich ab. Obwohl untertägige Untersuchungen gezeigt haben, dass die meisten geologischen Klüfte geschlossen bzw. mit Mineralisationen gefüllt waren, muss in der Störfallanalyse das Anhydritszenario betrachtet werden. Es ist deshalb unverzichtbar, im Rahmen der Integritätsbewertung der geologischen Barriere das gebirgsmechanisch-hydraulische Verhalten des Hauptanhydrits zu bewerten. Die Bedingungen für das Eintreten des Anhydritszenarios müssen untersucht und dafür standortunabhängige Methoden und Kriterien entwickelt werden.

In insgesamt 5 FuE-Projekten wurden in den Jahren 1991 bis 2004 die lithologisch-tektonischen Bedingungen untertägiger Hauptanhydritaufschlüsse in unterschiedlichen Salzbergwerken in Thüringen und Sachsen-Anhalt beschrieben und untereinander verglichen. In zwei Gruben in unterschiedlicher Teufe wurden die Spannungsänderungen und Konvergenzen bei der Auffahrung von 2 Messkammern im Hauptanhydrit ermittelt. Vergleichbare Untersuchungen fanden am Grauen Salzton statt, der über Strecken aufgeschlossen war. Unter Verwendung von Bohrkernen fanden umfangreiche Laborversuche zur Festigkeit, Deformierbarkeit und hydraulischen Dichtheit des Anhydrits und Salztons statt. Nach einer umfassenden Analyse der historischen Ereignisse am

Staßfurter Sattel vor etwa 100 Jahren wurden die Voraussetzungen für einen Lösungszufluss bewertet und das Szenario nachgerechnet. Es stellte sich heraus, dass die minimale Druckeinspannung eine fundamentale Bedeutung für die hydraulische Integrität besitzt. Für die In-situ-Spannungsmessungen im Anhydrit und benachbarten Steinsalz wurde eine neue Hydrofrac-Messsonde mit seismoakustischer Rissortung gebaut sowie für die Bohrlochschlitzmessungen im Steinsalz eine neuartige Auswertebeziehung unter Berücksichtigung der Tangentialspannungsrelaxation am Bohrlochrand entwickelt. Weiterhin wurde eine einfach anwendbare Methode zur Bestimmung der Permeabilität aus instationären Druckstoßtests eingeführt. In Labortests an Gesteinswürfeln unter drei unterschiedlichen Hauptnormalspannungen konnten Kenntnisse zur Rissbildung und den hydraulischen Eigenschaften gewonnen und Kriterien für die Bewertung der Barrierenintegrität abgeleitet werden. Im Bergwerk Bernburg erfolgten auf dieser Basis In-situ-Tests zur Ermittlung der Rissausbreitung und dem damit verbundenen Fluidfluss unter konstanten Gebirgsspannungen sowie in Abhängigkeit von der Entfernung des Messortes zu einer Abbaufront. Für die abschließenden Schlussfolgerungen und die Festlegung übertragbarer Kriterien wurden ausgewählte Untersuchungen im Labor und in situ unter Verwendung des Fließgesetzes nach Darcy sowie des kubischen Fließgesetzes hydraulisch-mechanisch gekoppelt modelliert.

SUBJECT AND CONTENT

The main anhydrite is a widespread structural layer of the Zechstein (Z 3) salt formations. Neighbouring to the rock salt, it contains geological joints in a more or less quantity. Geomechanically, anhydrite and rock salt layers differ substantially from each other. Rock salt is well-known for its distinct creep and relaxation behaviour leading to the reduction of high deviatoric stresses around the underground openings. In contrast, the comparatively stiff and strong anhydrite is prone to attract deviatoric stresses which, if sufficiently high, may lead to strength exceeding of the joints and impairment of the geological barrier function. Provided, there are interconnections via the joints a fluid flow can take place from isolated fluid inclusions or from the salt table. In the German mining history such a brine inflow into salt mines took already place.
In the frame of safety assessments scenarios are used to describe the possible evolution of a repository (MÖNIG, J. (2007)). While the normal evolution of a repository in rock salt is the save enclosure of the radioactive waste in time, the scenarios describe the so-called disturbed evolution. The Anhydrite-scenario is related to the brine inflow via the main anhydrite and the consequences on waste isolation. Although underground observations show that the most geological joints are closed or filled with mineral precipitations, in the frame of a safety assessment the Anhydrite-scenario cannot be excluded. Therefore, it is of utmost interest to characterize the behaviour of anhydrite in the context of evaluating the integrity of the geological barrier. The presuppositions for the Anhydrite-scenario must be investigated and site independent evaluation procedures must be created.

In 5 R&D projects from 1991 until 2004 the lithologic-tectonic site conditions of different salt mines in Thuringia and Saxony-Anhalt were described and compared. In two mines in different depths anhydrite chambers were excavated for observation of the stress and deformation changes. Equivalent monitoring of the stress state was performed on salt clay laid open in drifts. Using borehole cores, an extensive laboratory testing program aiming at strength, deformation behaviour and permeability was carried out. In addition, after a comprehensive review of the historical mining at the Staßfurt region about hundred years ago, the prerequisites for the brine inflow into the mines via the anhydrite were assessed and the mining history was back-calculated. It was found that the minimal principal rock stress is fundamental for the hydraulic integrity. For reliable knowledge of the stress state in anhydrite and the neighbouring rock salt, a new hydraulic fracturing probe with acoustic emission monitoring of fracture propagation and a new interpretation method of borehole slotting tests on basis of tangential stress relaxation were elaborated. Furthermore, an easy to apply interpretation procedure for transient permeability tests was introduced.

In true-triaxial laboratory tests on the fracture generation and their hydraulic properties knowledge about the criteria for assessment of the barrier integrity could be collected. In the mine Bernburg, the fracture propagation and the herewith caused fluid flow under constant und increased rock stresses due to mining of large salt chambers was investigated. For final conclusions and finding of transferable criteria, selected coupled mechanical-hydraulic processes in laboratory and in-situ were modelled by using the standard Darcy law and a special tool for calculating fracture induced fluid flow.

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung *12*

2. Abgrenzung der Aufgabenstellung *13*

3. Bearbeitungsablauf *15*

4. Regionalgeologische Beschreibung der Lithologie, Stratigraphie und Tektonik des Hauptanhydrits und Grauen Salztons im Südharz- und Nordharzgebiet und Begründung der Messortauswahl *19*

4.1 Einleitung *19*

4.2 Ausbildung und Tektonik des Hauptanhydrits *19*

4.2.1 Makrogefüge und Stratigraphie *19*

4.2.2 Mikrogefüge und Mineralbestand *23*

4.2.3 Lagerungsverhältnisse *24*

4.2.4 Rupturelles Inventar *26*

4.3 Ausbildung und Tektonik des Grauen Salztons *29*

4.3.1 Ausbildung *29*

4.3.2 Tektonik *32*

4.4 Begründung der Messortauswahl anhand der Typen und Formen des *33*

Hauptanhydrits und Grauen Salztons *33*

4.5 Bergbauliche Kurzcharakteristik der Gruben Volkenroda-Pöthen und Bernburg *34*

4.6 Stratigraphie und Tektonik im Bereich der Messorte *37*

4.7 Petrographisch-petrologische Untersuchungen an Dünnschliffen *53*

5. Ergebnisse der Laborversuche am Hauptanhydrit und Grauen Salzton *58*

5.1 Dichten, elastische Parameter, Festigkeiten und Gaspermeabilitäten *58*

5.2 Untersuchungen zur Hydrofrac-Rissbildung im Anhydrit, Salzton und Steinsalz *74*

sowie zur Kluftpermeabilität im Anhydrit *74*

5.2.1 Anwendbarkeit der klassischen Interpretation von Spannungssondierungen 74

mittels der Hydrofracmethode im Steinsalz 74

5.2.2 Fracversuche und Permeabilitätsmessungen an Gesteinswürfeln 81

5.2.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung 81

5.2.2.2 Ergebnisse der Würfelfracversuche 83

5.2.2.3 Kluftpermeabilitätsmessungen im Anhydrit 91

5.2.2.4 Gesamtauswertung 95

6. Analyse des Bergbaus am Staßfurter Sattel als historisches Analogon für einen 99

Integritätsverlust im Hauptanhydrit 99

6.1 Einleitung 99

6.2 Geologie und Vorgeschichte bis zum ersten Kalisalzabbau 101

6.3 Ursachen der Laugeneinbrüche und -ausbreitung 102

6.4 Der Bau der "Großen Mauer" im Markscheidepfeiler zu Neustaßfurt 105

6.5 Gegenwärtige Situation am Staßfurter Sattel 110

6.6 Gebirgsmechanische Modellierung der Auffahrung und Flutung der Gruben am 112

Markscheidesicherheitspfeiler unter Berücksichtigung der Kluftintegrität 112

6.6.1 Lösungsweg und Ziel 112

6.6.2 Stoffverhalten und Materialparameter 114

6.6.3 Beschreibung des querschlägigen Modells sowie der Rechenergebnisse 116

6.6.4 Beschreibung des streichenden Modells sowie der Rechenergebnisse 122

6.7 Schlussfolgerungen 127

7. In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung des Spannungszustandes an den 129

Messorten und der Deformationen bei der Messkammerauffahrung sowie 129

Weiterentwicklung der Messverfahren 129

7.1 Beschreibung der Messmethoden zur Spannungsermittlung 129

7.2 Messungen im Hauptanhydrit und Grauen Salzton in Volkenroda-Pöthen 134

7.3 Messungen im Hauptanhydrit und Grauen Salzton in Bernburg 141

7.4 Konstruktion und Bau einer Hydrofracsonde mit integrierter SE-Rissortung 153

7.4.1 Kurzbeschreibung der Bohrlochsonde 153

7.4.2 Nachweis der Anwendbarkeit zur Risslagenortung 156

7.5 Anwendung der Bohrlochschlitzmethode im Steinsalz unter Berücksichtigung 160

der Spannungsrelaxation an der Bohrlochkontur 160

7.5.1 Beschreibung der Methode 160

7.5.2 Nachweis der Anwendbarkeit zur 3D-Spannungssondierung im Steinsalz 165

8. Ausgewählte In-situ-Untersuchungen im Hauptanhydrit und benachbarten 171

Steinsalz zur Fluiddruckbelastbarkeit und Rissbildung 171

8.1 Einleitung 171

8.2 Untersuchungen unter konstanten Gebirgsspannungen 171

8.2.1 Beobachtung der Rissöffnung und -ausbreitung mit Oberflächenradar-, ... 171

Schallemissions- und Verschiebungsmessungen im ungeklüfteten Anhydrit 171

8.2.1.1 Anwendung der Oberflächenradarmessung im Hauptanhydrit 171

8.2.1.2 Einsatz der SE-Rissortung und von Verschiebungsmessungen zum Nachweis der 179

Rissbildung 179

8.2.2 Beobachtung der Rissöffnung in einer Kluft mit Carnallitfüllung 183

8.2.3 Gesamtinterpretation einschließlich der minimalen Druckeinspannungen und 185

Permeabilitäten 185

8.3 Untersuchungen unter wechselnden Gebirgsspannungen infolge Abbautätigkeit 191

8.3.1 Bergbauliche und geologische Situation 191

8.3.2 Konvergenz in der Steinsalzzufahrtsstrecke zum Anhydritmessort 194

8.3.3 Untersuchung des hydraulischen Abströmwiderstandes im geklüfteten Anhydrit 201

in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt 201

8.3.4 Interpretation der Ergebnisse 213

8.4 Analyse der Gültigkeit des kubischen Fließgesetzes 217

9. Entwicklung einer Messmethode und Auswertebeziehung zur Ermittlung der 221

Porosität und Permeabilität aus Bohrlochmessungen in situ 221

9.1 Einleitung 221

9.2 Messmethode und Auswertebeziehung 221

9.3 Ermittlung hydraulischer Kennwerte im Anhydrit 225

10. Modellierung der Fluidströmung im Porenraum der Gesteinsmatrix und in 228

Klüften 228

10.1 Einleitung 228

10.2 Überprüfung des Modells einer instationären Permeation in einem Bohrloch in 228

situ entlang des gesamten Druckintervalls 228

10.3 Berechnung einer stationären parallelen Kluftströmung im Laborversuch 232

10.3.1 Simulation unterschiedlicher hydraulischer Randbedingungen am Bohrloch 232

10.3.2 Abhängigkeit der stationären parallelen Kluftströmung von der normal zur Kluft 237

wirkenden Spannung 237

10.4 Berechnung von Fluidströmungen in einer geschlossenen Anhydritkluft 240

11. Gesamtauswertung und Interpretation 243

11.1 Stratigraphie, Gefüge und tektonische Ausbildung des A3 und T3 243

11.2 Ergebnisse der Laborversuche am Hauptanhydrit und Grauen Salzton 248

11.3 Analyse des historischen Bergbaus am Staßfurter Sattel hinsichtlich des 253

Integritätsverlustes im Hauptanhydrit 253

11.4 In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung des Spannungszustandes an den 256

Messorten und der Deformationen bei der Messkammerauffahrung sowie 256

Weiterentwicklung der Messverfahren 256

11.5 Ausgewählte In-situ-Untersuchungen im Hauptanhydrit und benachbarten Steinsalz zur Fluiddruckbelastbarkeit und Rissbildung 259

11.6 Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Porositäts- und Permeabilitätsbestimmung und Überprüfung der In-situ- und Labortests mit gekoppelten Modellrechnungen 264

12. Schlussfolgerungen für das Anhydritszenario 266

Literaturverzeichnis 268

Abbildungsverzeichnis 276

Tabellenverzeichnis 285

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis 287

1. Problemstellung

Anhydritschichten sind Bestandteile der Normalabfolge des Salinars, weisen jedoch bei der bergmännischen Auffahrung von Strecken und Kammern ein zum Wirtsgestein Salz abweichendes mechanisches Verhalten auf. Während das Salz mit zeitabhängigen Relaxationsprozessen Gebirgsspannungen abbaut und in der Lage ist, infolge von Kriechdeformationen die eingelagerten radioaktiven Abfälle einzuschließen, kommt es in den überwiegend elastisch reagierenden sowie steiferen und festeren Anhydritschichten im Einflussbereich der Hohlräume zu Spannungserhöhungen. Die Konsequenzen hinsichtlich Festigkeit und hydraulischer Dichtheit, insbesondere bezogen auf die im Anhydrit immer vorhandenen Klüfte, sind im Rahmen von Langzeitsicherheitsnachweisen zu bewerten.
Die geologisch-tektonisch gebildeten Anhydritklüfte sind meist geschlossen oder mit sekundären Mineralisationen (Carnallit, Halit) gefüllt. Bei geöffneten Klüften betragen die Öffnungsweiten am Stoß der untertägigen Auffahrungen nur etwa 1 Millimeter und in Teufen > 800 m werden überhaupt keine offenen Klüfte mehr beobachtet (SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986, 1987)). Mit Bohrlochkamerabefahrungen lässt sich feststellen, dass geöffnete Klüfte an der Kontur der Auffahrungen im Gebirge außerhalb der Entspannungszone der Hohlräume wieder zusammengedrückt sind.
Trotzdem repräsentieren die Klüfte hinsichtlich der Festigkeit und Integrität die potentielle Schwachstelle in diesem Gestein. Infolge der Entspannungswirkung bei der Hohlraumauffahrung in der Betriebsphase des Bergwerkes kann eine ursprünglich vorhandene Dichtheit verloren gehen, so dass im Salzgebirge eingeschlossene salinare Lösungen in Richtung der Grubenhohlräume zutreten können. Mit solchen Zutritten hochmineralisierter Lösungen ist beim Salzbergbau immer zu rechnen und in den meisten Fällen sind die Zutritte auf Grund ihres intrasalinaren Charakters sowie ihrer geringen Mengen für den Betriebsablauf unproblematisch. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers ist es jedoch denkbar, dass, solange noch kein vollständiger Einschluss der Abfälle mit ausgeglichenen Gebirgsspannungen (abgebauten Hauptspannungsdifferenzen) vorliegt und noch ein hydraulischer Gradient in Richtung des ehemaligen Bergwerkes existiert, zutretende intrasalinare Salzlösungen oder sogar nachfließende Lösungen aus dem Sub- und Suprasalinar in Kontakt mit den eingelagerten Abfällen geraten. Es könnte eine Kontamination der Lösungen eintreten und infolge der Hohlraumkonvergenz eine Auspressung in die Biosphäre stattfinden. Vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte wurden im Abschlußbericht im Dezember 2002 (AKEND (2002)) deshalb hinsichtlich dieses Szenarios, ohne Präjudizierung auf ein Wirtsgestein oder einen konkreten Standort, folgende generelle Anforderungen an die geologische Situation am Endlagerstandort formuliert:

- Ausreichende räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins und benachbarter Isolationsbereiche gegen grundwasserführende Horizonte, auch im Fall der Festigkeitsüberschreitung lokaler Bereiche
- Zuverlässigkeit in der Charakterisierung der Standortsituation sowie der den Sicherheitsanalysen zugrundeliegenden Parameter
- Belastbare Prognosefähigkeit der für die Sicherheits- und Szenarienanalysen wesentlichen Prozesse und Wechselwirkungen einschließlich der Unsicherheitsbetrachtungen
- Günstiges gebirgsmechanisches Verhalten ohne Schädigung der Barrierenintegrität in der Betriebs- und Nachbetriebsphase
- Robustes Verhalten der geologischen Barriere mit einer geringen Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten bzw. Fähigkeit zu ihrer Verheilung
- Kein oder ein nur geringer Transport von kontaminierten Lösungen in die Grundwasserhorizonte

Der Bewertung der geologischen Barrierenintegrität der geklüfteten Anhydritbereiche unter dem Einfluss bergbaulicher Einwirkungen kommt deshalb bei der Endlagerung im Salz eine entscheidende Bedeutung für den Sicherheitsnachweis zu. Es sind die für ein Zutrittsszenario über den Hauptanhydrit notwendigen Einwirkungen und Bedingungen zu untersuchen und es muss nachgewiesen werden, dass diese möglichst ausgeschlossen werden können bzw. zu keinen Konsequenzen führen, die das Schutzziel verletzen.

2. Abgrenzung der Aufgabenstellung

Wie oben ausgeführt, bilden die Anhydritklüfte grundsätzlich einen potentiellen Transportpfad für Lösungen. Ein Lösungszutritt kann jedoch nur eintreten, wenn

- die Kluftöffnung und der Trennflächenanteil in der Kluft infolge der Entspannung oder durch Festigkeitsüberschreitung ausreichend groß sind, um einen zusammenhängenden Fließweg zu schaffen,
- der Fließweg ein Lösungsreservoir erschließt und
- die hydraulische Druckdifferenz und die integrale Permeabilität ausreichend groß sind, um einen Zutritt auszulösen.

Begrenzte Zutritte von gesättigten Zechsteinlösungen sind in einem Salzbergwerk nicht ungewöhnlich. In günstigen Fällen zeigen sie sich nur als Feuchtstellen oder versiegen sehr

schnell, wenn das angeschlossene Reservoir leer gelaufen ist. Unproblematisch sind weiterhin Zutritte über Bohrungen, die mittels Zementation wieder hydraulisch dicht verschlossen werden können. Als dramatisch haben sich in Salzgewinnungsbergwerken in der Vergangenheit jedoch die Kontakte des Anhydrits zum Grundwasser erwiesen, die zu einer Auflösung der Mineralisationen in den Klüften führten. Auf Grund der Querschnittsvergrößerung der Zuflusspfade war das Abpumpen der zutretenden Deckgebirgswässer nur zeitweise möglich und das Absaufen der Bergwerke konnte nicht verhindert werden. Wie die Analyse dieser Vorgänge anhand historischer Aufzeichnungen der Ersaufensvorgänge vor etwa hundert Jahren an der Südwestflanke des Staßfurter Sattels in den weiteren Ausführungen zeigen wird, wurde der Zutritt von Grundwasser durch einen Gebirgsschlag nach erheblicher Unterdimensionierung der Pfeiler in den Carnallititbaufeldern, die geringe Entfernung zwischen abgesoffenen und noch trockenen Gruben, die Existenz klüftigen Hauptanhydrits in den Markscheiden (Trennpfeilern) zwischen den Bergwerken sowie die jahrelange Pumptätigkeit mit einhergehender Auflösung bzw. durch natürliche Subrosion von Kluftfüllungen ermöglicht.

Die Analyse der zum Absaufen führenden Voraussetzungen ist hilfreich, da sie Hinweise auf zu vermeidende Vorgehensweisen bei der Standortwahl und dem Betrieb eines Endlagers im Salz liefert. Es wird aber auch der Unterschied offensichtlich zwischen den historischen Ereignissen beim Gewinnungsbergbau mit der Schaffung großer Abbauhohlräume, z. T. an den Flanken von Salzsätteln ohne ausreichende Steinsalzüberdeckung als Schutzschicht, und den Bedingungen in einem Endlagerbergwerk mit einem wesentlich geringeren Auffahrungsgrad und erheblich größerer Entfernung zu grundwasserführenden Horizonten mit entsprechenden Sicherheitsabständen. Infolge der zum Gewinnungsbergbau völlig andersartigen Hohlraumauffahrung mit einer Separierung von lokalen Einlagerungsfeldern, die durch unverritzte Bergfesten voneinander getrennt sind, werden die gebirgsmechanischen Beanspruchungen des Hauptanhydrits wesentlich geringer sein. Mit einer geophysikalischen Vorerkundung (z. B. Georadar) wird angestrebt, dieses Gestein möglichst überhaupt nicht aufzuschließen und damit seine geogene Festigkeit und Integrität zu erhalten. Damit ist eine deutliche Abgrenzung zum Gewinnungsbergbau gegeben und es ergibt sich in der Problemstellung eine Fokussierung auf die geogenen Eigenschaften.
Weitere Beispiele aus dem historischen Steinsalz- und Kalibergbau zeigen, dass auch beim Aufschluss von Anhydritschichten eine Unterstellung des zwangsläufigen Absaufens von Salzbergwerken nicht gerechtfertigt ist. Am Staßfurter Sattel als ältestem Kaliabbaurevier der Welt sind Gewinnungsbergwerke zum Teil noch heute trocken und im Stügerwerk des Hallstätter Steinsalzbergbaus in Österreich aus der Bronze- und Eisenzeit (in Hallstadt vor etwa 2500 Jahren) wurde ein offener Grubenbau von etwa 7 m Breite im ursprünglichen,

wenig deformierten Zustand mit einer freien Firstfläche von 200 m^2 neben einer Anhydritwand gefunden. Das geschilderte Zutrittsgeschehen (Anhydritszenario) kann deshalb nicht a priori vorausgesetzt werden, sondern es muss geprüft werden, ob die Bedingungen für ein solches Versagen am konkreten Standort mit seinen spezifischen Randbedingungen und Einwirkungen überhaupt gegeben sind. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Entwicklung der dazu notwendigen Verfahren und Kriterien liefern.

Soweit es für die Bearbeitung der Problemstellung sinnvoll und praktikabel war, wurde in die Untersuchungen auch der zum Hauptanhydrit (A3) unmittelbar benachbarte Graue Salzton (T3) der Leinefolge einbezogen. Auch diese Schicht reagiert bei gebirgsmechanischer Beanspruchung elasto-plastisch ohne ausgeprägte Fähigkeit zu zeitabhängigen Spannungsrelaxationen und Kriechprozessen und es kann in der Wechselwirkung mit dem Steinsalz zu Gebirgsspannungserhöhungen kommen, dessen Konsequenzen für die Festigkeit und Integrität zu bewerten sind.

Mit dem Untersuchungsgebiet Süd- bis Nordharz soll kein potentieller Standort für ein radioaktives Endlager präjudiziert werden, sondern es wurde auf Grund der geologischen Vielfalt und der für ein mehrjähriges Messprogramm zur Verfügung stehenden Bergwerke ausgewählt.

3. Bearbeitungsablauf

Zur Bearbeitung wurden zunächst in einer umfassenden Literaturstudie die dem Verfasser zugänglichen Kenntnisse zur Lithologie, Stratigraphie und Tektonik des Hauptanhydrits und Grauen Salztons im Süd- und Nordharzgebiet analysiert sowie hinsichtlich der Aufgabenstellung zusammengefasst und bewertet. Basierend auf dieser regionalgeologischen Beschreibung wurden die beiden Bergwerke Volkenroda-Pöthen und Bernburg mit unterschiedlichen Lagerungsformen und Teufen der zu untersuchenden Schichten ausgewählt, wobei mit den Bergwerksbetreibern die infrastrukturellen, personellen und finanziellen Randbedingungen für ein mehrjähriges Untersuchungsprogramm zu klären waren.
Nach einer bergbaulichen Kurzcharakteristik erfolgte die Zuordnung der geologischen Verhältnisse an den Messorten zu den obigen regionalen Befunden. Dem gleichen Ziel diente die Aufnahme und Charakterisierung der an den Hohlraumstößen ausstreichenden Klüfte und an speziellen Präparaten erfolgten zur Identifizierung festigkeits- und integritätsrelevanter Ausbildungen mikroskopische Untersuchungen zur Struktur und Textur.

In dem Laborprogramm wurden in einem ersten und grundlegenden Arbeitspaket Prüfkörperdichten, elastische und rheonome Parameter, Festigkeiten sowie Gaspermeabilitäten des ungeklüfteten und geklüfteten A3 und T3 in Abhängigkeit von der geologischen Ausbildung in beiden Bergwerken bestimmt. In einem zweiten Arbeitspaket lag der Schwerpunkt bei der Ermittlung der hydraulischen Aufreißfestigkeiten sowie geometrischen Rissparameter und Rissdurchlässigkeiten als Basisgrößen für eine Einschätzung der Barrierenwirksamkeit.

Die Relevanz des möglichen Versagens der geologischen Barrierefunktion geklüfteter Anhydritschichten konnte anhand des Bergbaus am Staßfurter Sattel als historisches Analogon nachgewiesen werden. Die gebirgsmechanische Analyse der Randbedingungen und Ursachen diente dem Verständnis dieser Vorgänge mit dem Ziel ihrer zukünftigen Vermeidung.

Das Ziel der In-situ-Untersuchungen bestand darin, mit unterschiedlichen Messverfahren jeweils am Anhydrit und Salzton in Volkenroda-Pöthen und Bernburg die Gebirgsspannungszustände und die bei der Auffahrung der Messkammern im Anhydrit initiierten Hohlraumkonvergenzen zu ermitteln. Die Erfassung der sich bei einer Auffahrung ausbildenden Spannungs- und Deformationsfelder und der Vergleich mit den im Labor bestimmten Grenzwerten sind wesentlich für eine Bewertung der Festigkeit und Integrität. Da die Anhydritklüfte eine Schwachstelle in der geologischen Barriere bilden können, konzentrierten sich die Untersuchungen im Schwerpunkt der Arbeit auf die hydraulische Dichtheit der Klüfte in Abhängigkeit vom Einspannungszustand im Gebirge bzw. auf die Analyse der Vorraussetzungen für einen Integritätsverlust. Für die Spannungsmessungen wurde eine neue Bohrlochsonde mit Schallemissions-Rissortung gebaut und im mehrjährigen Einsatz weiterverbessert. Für die Bohrlochschlitzmessungen im Steinsalz konnte eine neuartige Auswertebeziehung unter Berücksichtigung der Tangentialspannungsrelaxation entwickelt werden. Weiterhin wurde eine Methode und Auswertebeziehung für Porositäts- und Permeabilitätsbestimmungen mittels instationärer Bohrlochmessungen geschaffen.

In numerischen Modellrechnungen wurde die Darcy-Strömung im interkonnektiven Porenraum der Auflockerungszone und mit neu entwickelten Programmen die Kluftströmung entsprechend des kubischen Fließgesetzes berechnet. Die Zielstellung dieser hydraulisch-mechanisch gekoppelten Simulationen von in situ und im Labor realisierten stationären und instationären Permeationsprozessen bestand im besseren Verständnis der physikalischen Wechselwirkungen als entscheidende Grundlage für eine Bewertung und Prognose derartiger Prozesse in einem Endlager.

Die gewählten Arbeitsschritte können der zusammenfassenden Übersichtsdarstellung in Abbildung 3.1 entnommen werden.

<u>Problemstellung:</u> Geologische Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Endlager für radioaktive Abfälle im Salz

<u>Ziel:</u> Standortunabhängige Daten, Methoden und Kriterien zur Bewertung der Barrierenintegrität im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises

<u>Arbeitsschritte:</u>

Regionalgeologische Beschreibung des Hauptanhydrits und Grauen Salztons im Südharz- und Nordharzgebiet

↓

Begründung der Messortauswahl

- **Stratigraphie und Tektonik**
- **Bergbauliche Kurzcharakteristik**
- **Petrographisch-petrologische Untersuchungen an Dünnschliffen**

Laborversuche am Hauptanhydrit und Grauen Salzton

- **Gesteinsparameter, Festigkeiten, Gaspermeabilitäten**
- **Hydrofrac-Rissbildung unter triaxialer Belastung in Gesteinswürfeln**
- **Permeabilität von Hydrofracrissen in Gesteinswürfeln**

Analyse des Bergbaus am Staßfurter Sattel als historisches Analogon für einen Integritätsverlust im Hauptanhydrit

- **Wirkung der Anhydritklüfte beim Ersaufen und den Abwehrmaßnahmen**
- **Gebirgsmechanische Modellierung der Beanspruchung der Anhydritklüfte**

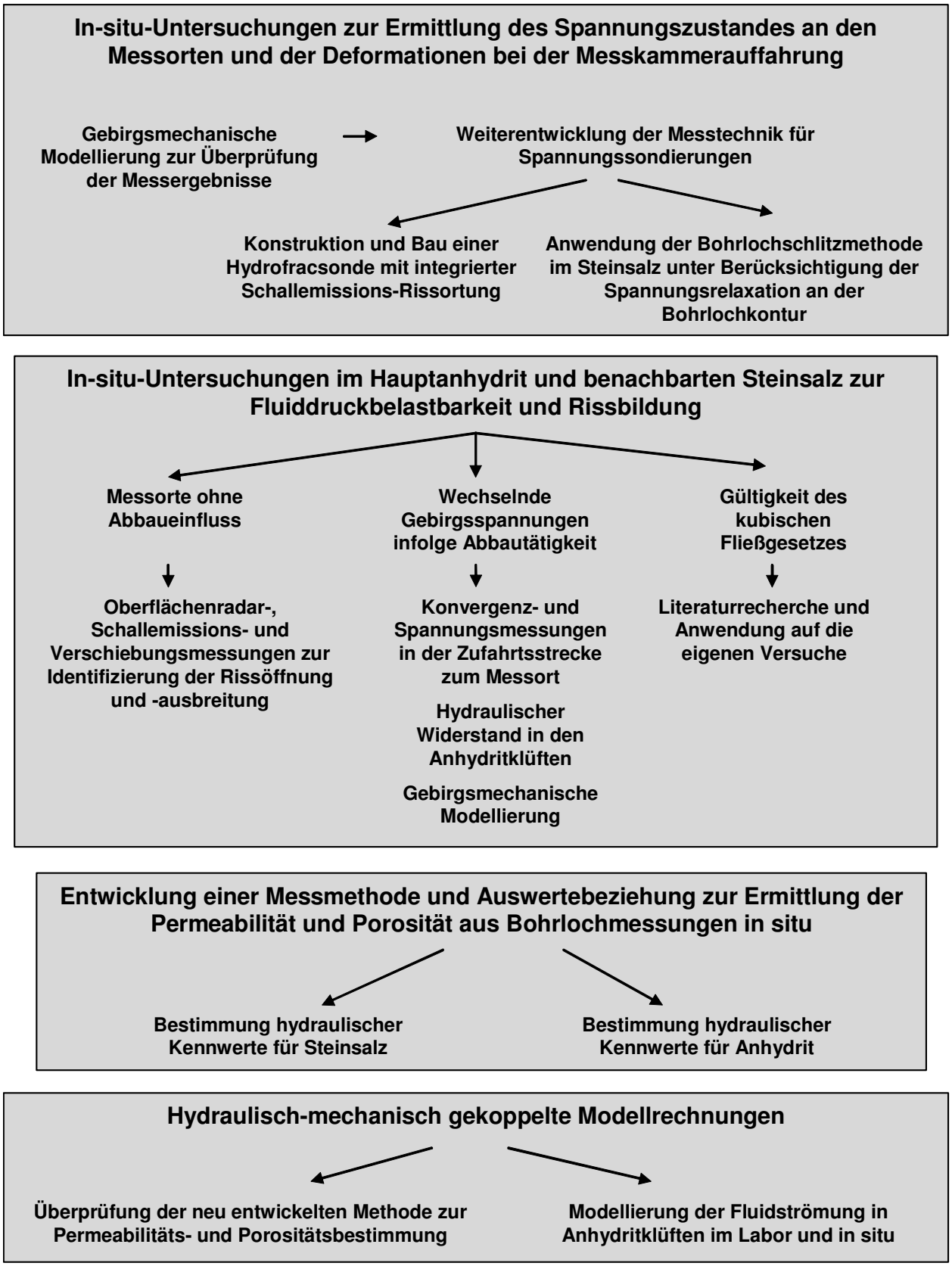


Abb. 3.1: Übersichtsdarstellung des Bearbeitungsablaufes

4. Regionalgeologische Beschreibung der Lithologie, Stratigraphie und Tektonik des Hauptanhydrits und Grauen Salztons im Südharz- und Nordharzgebiet und Begründung der Messortauswahl

4.1 Einleitung

Um die bei der Auffahrung im Anhydrit auftretenden Entspannungsdeformationen, Gebirgsspannungsumlagerungen und die Konsequenzen für die Festigkeit und hydraulische Dichtheit untersuchen zu können, wurden zwei Messkammern in unterschiedlichen Teufen aufgefahren. Da in einer vorauslaufenden Studie „Zusammenfassung und Beurteilung des derzeitigen Wissensstandes über das geotechnische Verhalten von Anhydrit und Salzton (KAMLOT, P.; SCHWANDT, A. (1991)) festgestellt wurde, dass die gebirgsmechanischen Reaktionen von der geologischen Ausbildung am Standort abhängen, war es zunächst notwendig, die Lithologie, Stratigraphie und Tektonik des Hauptanhydrits und Grauen Salztons im Bearbeitungsgebiet in einer Kurzfassung darzustellen. Im Ergebnis wird die Messortauswahl begründet und die lokalen geologischen Gegebenheiten werden den regionalgeologischen Befunden zugeordnet.

Das Bearbeitungsgebiet umfasst die Kaliabbaureviere Südharz, Saale-Unstrut und Nordharz. Regionalgeologisch erstreckt sich das Gebiet vom Westteil des Thüringer Beckens bis zur Flechtlinger-Roßlauer Hebungszone im Norden. Gegenstand der Bearbeitung sind der Hauptanhydrit und Graue Salzton des Zechstein 3 (Leinefolge).

Der als eigenständiger Horizont ausgehaltene Gebänderte Deckanhydrit des Zechstein 2 (Staßfurtfolge) wird dem Grauen Salzton zugeordnet, da eine getrennte Behandlung im Hinblick auf die Zielstellung unzweckmäßig ist.

4.2 Ausbildung und Tektonik des Hauptanhydrits

4.2.1 Makrogefüge und Stratigraphie

Untersuchungen zur Feinstratigraphie des Hauptanhydrits sind in allen Kaliabbaurevieren des Bearbeitungsgebietes schwerpunktmäßig in den 1960er Jahren vorgenommen worden (KOSMAHL, W. (1956); JUNG, W. (1960); SEIDEL, G. (1960); FLEISCHER, S. (1960); BEHR, E.-M. (1960); LANGBEIN, R. (1961, 1965); HEMMANN, M. (1972); u.a.). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und gestützt auf das von JUNG, W. (1958) vorgeschlagene Schema der

Texturbezeichnung von Anhydritgesteinen lassen sich im Untersuchungsgebiet insgesamt 6 Zonen im Hauptanhydrit ausscheiden. Sie werden in Anlehnung an JUNG, W. (1960) mit alpha bis zeta bezeichnet (Tabelle 4.2 und 4.3). Zur petrographischen Beschreibung wurde die Nomenklatur in Tabelle 4.1 verwendet.

Tabelle 4.1: Petrographische Nomenklatur zur Beschreibung der Salzgesteine nach Stolle und Döhner, Zahlenangaben in cm

Bezeichnung		Mächtigkeit/ Größe	Abstand	Ausbildung	Habitus	Häufigkeit	Begrenzung	Verteilung
Lagen	Streifen	fein < 0,1 mittel 0,1-0,3 grob 0,3-0,5	eng < 1 weit 1-5 sehr weit > 5	a) regelmäßig glatt wellig { sehr klein < 1, klein 1-5, lang > 50 } b) unregelmäßig wellig, ausgefranst, zerflasert, zerrissen, verdickt { knotenartig, linsenartig }		a) sehr vereinzelt, sehr schwach, spärlich b) vereinzelt, schwach, selten c) gelegentlich, mäßig, nicht selten d) häufig, stark e) sehr häufig, sehr stark	a) scharf b) unscharf c) verschwommen	a) diffus gleichmäßig b) sporadisch ungleichmäßig c) partieweise angereichert: streifenartig bandartig linsenartig nestartig
	Bänder	schmal 0,5-1 breit 1-3 sehr breit 3-5						
	Bänke	dünn 5-10 mittel 10-30 dick 30-50 sehr dick > 50						
Schmitzen		fein < 0,1 mittel 0,1-0,3 grob > 0,3	eng < 1 weit 1-5 sehr weit > 5	kurz < 5 lang > 5				
Adern		fein < 0,5 grob > 0,5		durchschimmernde Streifung möglich				
Masern				durchschimmernde Streifung möglich				
Linsen		Mächtigkeit Länge		bankartig, bandartig, ausgefranst, zerflasert				
Flocken		klein < 0,1 groß 0,1-0,5						
Nester		klein 0,5-1 mittel 1-3 groß 3-10 sehr groß > 10		rundlich, oval wolkenartig fetzenartig ausgefranst				

Zone alpha

Die 1 - 4 m, im Nordharz-Kaligebiet bis 3 m, mächtige Zone ist dunkelgrau bis schwarz, überwiegend regelmäßig eng bis weit gestreift und teilweise gebändert. Dabei sind die feingestreiften Texturen mit ihren dunkelbraunen bis braungrauen und tonig-karbonatischen Substanzen besonders im liegenden Teil erkennbar.

Zone beta

Typisch für diese bis 12 m mächtige Zone ist die große Mannigfaltigkeit der Texturen und eine helle Farbe. Die Streifung ist grob bis unregelmäßig. Die tonig-karbonatischen Bänder sind schmal bis sehr breit, meist unregelmäßig ausgefranst. Die Maserung ist grob bis fein. Der Abstand der Streifen und Bänder ist unterschiedlich und schwankt von wenigen mm bis zu 10 cm. Charakteristisch für diese Zone sind poröse Bereiche, die vereinzelt mit Salzlösungen und Gasen gefüllt sind. In den Porenräumen konnten Carnallit, Anhydritnadeln, Eisenoxyde u.a. beobachtet werden.

Tabelle 4.2: Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Thüringer Becken SEIDEL, G. (1960)			**Staßfurter Sattel** FLEISCHER, S. (1960) UND BEHR, E.-M. (1960)		
Zone	**Texturtyp**	**Mächtigkeit (m)**	**Zone**	**Texturtyp**	**Mächtigkeit (m)**
9	Anhydrit, dicht	Bis 1	6 (bei BEHR 5)	Anhydritschale, feinkörnig	Bis 0,2
8	Tonig und dolomitisch gestreift	10 bis 12	5 (4)	Tonlage, streifig	3,5 bis 21
7	Dolomitisch gestreift	2 bis 3			
6	Dolomitisch gestreift und gebändert	Bis 1			
5	Tonig und Dolomitisch gestreift	11 bis 12	4 (-)	Diagonal geschichtet	Bis 0,4
4	Dolomitisch gestreift	5 bis 9	3	Flockig	5 bis 11,5
3	Dolomitisch gestreift und gebändert	1 bis 3	2	Hell, flasrig	7 bis 13
2	Dolomitisch gemasert, geadert und gestreift	4 bis 5			
1	Dolomitisch gestreift, gebändert, marmoriert	1 bis 4	1	Grauschwarz bis schwarz geschichtet	2,5 bis 3,5

Zone gamma

Hauptkennzeichen dieser Zone ist ein tonig-dolomitisch marmorierter Anhydrit. Er kann aber, insbesondere im Nordharz, gemaserte, gestreifte und geäderte Texturen aufweisen. Die Farbe der Anhydrite ist vorwiegend bläulich grau, untergeordnet weißlich bis bläulich grau. Typisch für diese Zone sind Mächtigkeitsschwankungen, die im SE-Harzvorland von 2,7 m bis 18,6 m (JUNG, W. (1960)) betragen können.

Zone delta

Vorherrschender Texturtyp dieser Zone ist eine tonig-dolomitische Aderung, die oft mit einer Maserung verbunden ist. Eine deutliche Streifung der Texturen ist im Nordharz-Kaligebiet erkennbar, die im oberen Teil "diagonalgestreift" ist (FLEISCHER, S. (1960)). In dieser Zone sind im SE-Harzvorland und teilweise im Nordharz-Kalirevier mit Steinsalz gefüllte Kavernen festgestellt worden. Bei Übertagebohrungen wurden poröse Bereiche beobachtet (JUNG, W. (1960)). Die Farbe des Gesteins ist weißlich bis bläulichgrau, seltener bräunlich-

grau. Wie bereits in der Zone gamma sind die Durchschnittsmächtigkeit sowie die Maximal- und die Minimalwerte im Südharz und Saale-Unstrut-Kalirevier größer als im Nordharz-Kalirevier.

Tabelle 4.3: Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Südöstliches Harzvorland JUNG, W. (1960)			**Östliches Subherzyn** HEMMANN, M. (1972)		
Zone	**Texturtyp**	**Mächtigk. (m)**	**Zone**	**Texturtyp**	**Mächtigk. (m)**
Zeta	Texturlos mit verschwommener Feinstreifung bzw. pegmatitartig	2,5 bis 3,5	A	Anhydritschale	Bis 0,5
Epsilon	Unregelmäßig gestreift. Seltener unregelmäßig gebändert, geadert und gemasert	3 bis 6	Epsilon	Schwarze Tonlage, undeutlich streifig	Bis 0,1
Delta	Geadert und gemasert	10 bis 14	Delta	Streifig. Unregelmäßig bis regelmäßig diagonal gestreift	1 bis 9
Gamma	Vorwiegend marmo-riert. Untergeordnet gemasert u. geadert	11 bis 15	Gamma	Gemasert, gestreift, geadert, marmoriert	1,5 bis 8,8
Beta	Unregelmäßig gebändert und gemasert	6 bis 12	Beta	Unregelmäßig ausge-franste Bankung. Unregelmäß. Streifung	6,5 bis 12
Alpha	Unregelmäßig gestreift und gebändert, ton-durchstäubt	2 bis 4	Alpha	Regelmäßig, eng- bis weit gestreift	1,2 bis 3

Zone epsilon

Das textureile Gepräge dieser Zone wird durch die Einschaltung tonig-dolomitischer Streifen und Bänder wechselnder Breite bestimmt. Diese Struktur kann partienweise durch eine Maserung abgelöst werden. Die Mächtigkeit dieser Zone ist im Nordharz-

Kaligebiet sehr schwankend und kann zwischen 0 und 20 m variieren. Dagegen sind die Schwankungen im Südharz und südöstlichen Harzvorland gering. Die Hangendgrenze der Zone epsilon ist scharf. Sie wird im Nordharz-Kaligebiet mit einer Tonlage abgegrenzt. Im übrigen Untersuchungsgebiet ist sie nicht nachgewiesen.

Zone zeta

Die Ausbildung dieser Zone ist regional unterschiedlich. Im Nordharz-Kaligebiet ist sie fein bis feinstkristallin ausgebildet und zeigt eine hell bis mittelgraue Färbung. Sie kann von regelmäßigen, feinen bis groben sowie tonig-karbonatischen Streifen und Bändern durchsetzt oder auch monomineralisch entwickelt sein (Anhydritschale).
Im SE-Harzvorland sowie im Saale-Unstrut-Kaligebiet, insbesondere in Gruben mit fehlender Leinesteinsalzausbildung, ist diese Zone dagegen pegmatitartig ausgebildet. Die großen Anhydritleisten liegen sperrig zueinander. Die dadurch bedingten größeren Hohlräume sind mit Steinsalz, Carnallit, Sylvin und anderen Salzmineralien gefüllt. Die Mächtigkeit dieses Anhydrittyps ist gegenüber der fein bis feinstkristallinen Ausbildung generell größer.
Insgesamt sind Makrogefüge und Stratigraphie des Hauptanhydrits nahezu gleichmäßig und kompakt ausgebildet, es sind aber in mehreren Zonen poröse, teils mit Kristallsalz, Gas und auch Salzlösungen gefüllte Partien enthalten.

Beim Hauptanhydrit sind im Südharz geringe Mächtigkeitsschwankungen um einen Mittelwert von 30 m erkennbar. Lediglich am Südrand der Verbreitungsgrenze des Zechstein 3 südlich der Südharz-Kaliabbaureviere sind Mächtigkeiten von über 40 m entwickelt. Im Nordharz-Kalirevier sind größere Schwankungen vorhanden. Dabei sind die größten Schwankungen in den oberen Zonen des Hauptanhydrits nachweisbar.

4.2.2 Mikrogefüge und Mineralbestand

Wesentliche Untersuchungen zum Mikrogefüge und Mineralbestand sind im Bearbeitungsgebiet von JUNG, W./KNITZSCHKE, G. (1961); LANGBEIN, R. (1961); HEMMANN, M. (1972); u.a. vorgenommen wurden. Aus den erarbeiteten Ergebnissen ist folgendes erkennbar:
Der Anhydrit tritt vorwiegend im unteren Teil in Form von langgestreckten Kristallen mit tafel- bis leistenförmigem Habitus auf. Dabei bilden die Leisten durch gegenseitiges Durchdringen ein sperriges (intersertales) Gefüge. In mittleren und hangenden Hauptanhydritteilen sind Anhydritaggregate beobachtet worden. Sie setzen sich zusammen aus einer Vielzahl von Einzelkristallen, die unterschiedliche Formen aufweisen. Es wurden Gruppierungen von leistenförmigen Kristallen bestimmt, die sich um ein Zentrum

feinkristallinen Anhydrits radialstrahlig verteilen. Zwischen den Tafeln und Leisten sowie im Kern und am Rand der Kristallaggregate tritt bevorzugt feinstkristalliner Anhydrit auf. Weiterhin konnten im Hauptanhydrit untergeordnet Granoblasten beobachtet werden.
In den anhydritischen Gefügebestandteilen (ohne Granoblasten) sind winzige staubfreie Einschlüsse nachgewiesen worden. HEMMANN, M. (1972) beschreibt sie als rundliche, teils längliche oder scharf rechteckig begrenzte, bräunliche oder violettbraune Körper von 0,2 bis 1 µm Größe. Sie werden von mehreren Autoren als Reliktgefüge (Pseudomorphosen) nach Gips interpretiert.
Die Hauptmenge der Karbonate setzt sich aus Magnesit und Dolomit zusammen. In den hangenden Bereichen des Anhydrits sind weiterhin geringe Mengen Kalzit nachgewiesen worden.
Mit karbonatischen Einlagerungen sind tonige Bestandteile verbreitet. Reine tonige Einlagerungen wie Talk, Chlorit, Glimmer, Erze, Quarz und Borazit sind sehr selten.
Durch geochemische Untersuchungen von LANGBEIN, R. (1961); JUNG, W./KNITZSCHKE, G. (1961); HEIMLICH, K. (1959); u.a. konnte (analog zur feinstratigraphischen Ausbildung) eine zonenabhängige chemische Zusammensetzung bestimmt werden. Generell ist in Richtung Hangendes eine Zunahme des $CaSO_4$-Gehaltes und eine Abnahme der Gehalte an Gesamtkarbonat, Dolomit, Al_2O_3 und SiO_2 nachweisbar.

4.2.3 Lagerungsverhältnisse

Die generellen Lagerungsverhältnisse des Hauptanhydrits werden, entsprechend der regionalen Entwicklung des jeweiligen Untersuchungsgebietes, charakterisiert durch:

- flach-wellige Lagerung, verbunden mit Aufsattelungen, Verwerfungen, disharmonischen Verformungen u.a.. Verbreitet ist diese Ausbildung vorwiegend im Südharz-Kaligebiet sowie in den Muldenbereichen des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebietes.
- nahezu gleichmäßige, sattelförmige Lagerung mit Verwerfungen, teilweise auch Doppellagerung. Sie ist an langgestreckte Sättel, wie Roßlebener-, Teutschenthaler-, Bernburger-, Staßfurter Sattel u.a. gebunden.
- intensiv unregelmäßig bis kulissenförmig verfaltete Lagerung. Typisch für die Lagerungsverhältnisse ist der Raum des Allertalgrabens.

Durchgeführte Spezialkartierungen in Gebieten, wo Leinesteinsalz großflächig abgebaut wurde (Raum Teutschenthal, Bernburg, Staßfurt, Allertalgraben), lassen erkennen, dass die Grenze Hauptanhydrit - Leinesteinsalz einen unregelmäßigen Verlauf zeigt. Die Anhydritmächtigkeit kann teilweise mehr als das Doppelte der Normalmächtigkeit betragen. Diesen, im Staßfurter Raum von FULDA, E. (1929) als Anhydritklippen bezeichneten

Gebieten, stehen Schwundstellen im Hauptanhydrit gegenüber. Insgesamt lassen sich bei den Hauptanhydritanschwellungen folgende Typen ausscheiden:

- **Anhydritbuckel und Anhydritarme**
  Sie sind durch eine Anschwellung der Zone epsilon charakterisiert. Teilweise ist gleichzeitig damit auch eine Zunahme der Mächtigkeit der Anhydritschale und der Schwarzen Tonlage verbunden. Bei bauchigen Anschwellungen sind oft fingerartig verzweigte Formen zu beobachten, die sich meist diskordant in das Leinesteinsalz erstrecken.

- **Anhydritklippen**
  Generell ist zwischen Klein- und Großklippen zu unterscheiden. Die horizontale und vertikale Erstreckung der Kleinklippen ist gering. Sie bestehen in der Regel aus der Zone epsilon, deren Texturen deutlich erkennbar sind. Die Klippen sind teils symmetrisch, teils auch asymmetrisch aufgebaut und weisen ein unterschiedliches Einfallen an den Flanken auf. Demgegenüber erreichen Großklippen Längen von mehreren hundert Metern in horizontaler Richtung. Die vertikale Ausdehnung über der normalen Oberkante kann bis 50 m betragen und sich stratigraphisch bis zu den Anhydritmitteln des Anhydritmittelsalzes erstrecken. Dabei ist die Form der Großklippen birnen- oder auch halbkreisförmig.

Eine Gesetzmäßigkeit bei der Verbreitung der Anhydritbuckel, -arme oder auch -klippen ist innerhalb bergmännisch großräumig aufgeschlossener Gebiete nicht erkennbar. Es fehlen äquidistante Abstände zwischen den Einzelklippen oder auch eine bevorzugte Ausrichtung der Kontur nach einem in den Kluftgefügediagrammen sichtbaren Maximum.
Dieser Sachverhalt ist zweifellos ein Grund für die noch bis heute umstrittene Genese der Anhydritklippen. Nach FULDA, E. (1929) sind primäre Variationen der Mächtigkeit für die Grenze der Klippen verantwortlich. Diese Aussage ist durch mehrere Untersuchungen an rezenten Evaporiten nachweisbar und auch von LANGBEIN, R. (1968) für den regionalen Rahmen des Untersuchungsgebietes angenommen worden.
Auf Grund festgestellter Reliktgefüge von Gips und weiteren Gefügemerkmalen sowie aus physikochemischen Gesichtspunkten nimmt HEMMANN, M. (1972) eine primäre Gipsabscheidung an. Die Herausbildung der Schwundstellen und Anhydritklippen selbst soll ein langwirkender Prozess gewesen sein, der mit der Sedimentation der Zone zeta einsetzte und in höheren Horizonten des Leinesteinsalzes ausklang. Dabei ist die Entwässerung des Hauptgipses zu Hauptanhydrit im Wesentlichen während der Bildung des Leinesteinsalzes erfolgt.

Die zum strukturellen Inventar und seiner Raumlage von RICHTER, G. (1934) vorgenommenen Darstellungen des Hauptanhydrits lassen sich im Sinne eines spröden Zerbrechens elastischer Gesteine als Auswirkung der vom Hangenden und Liegenden aus den Salinargesteinen übertragenen Kräfte bei der Salz(fließ)bewegung verstehen.
Eine epigenetisch tektonische Anlage der Vorsprünge stützt auch die Feststellung von KRZYWICKI, E. (1949) von der Abscherung einzelner Klippen vom Hauptanhydrit sowie die Beobachtungen von BEHR, E.-M. (I960), dass "lokal ... einige wenige kräftige Harnische entwickelt" sind.

Nach SCHWANDT, A. (1991) lassen sich aus Gründen der Verteilung von Viskosität, Dichte und Auftrieb innerhalb der Schichtenfolge derartige Abscherungsvorgänge am ehesten an primären Mächtigkeitsanstauungen vorstellen. Dieses würde einer Verbindung der Auffassungen von FULDA, E. (1929) und HEMMANN, M. (1972) mit denen der tektonischen Deutung von BEHR, E.-M. (1960); KRZYWICKI, E. (1949) u.a. entsprechen. Durch eine tektonische Prägung der Klippen würden ihre Flankenbereiche kompressiv, der Top der Klippen dagegen extensiv beansprucht werden. Als Folge der weitenden Verformung treten an der Klippenoberkante die an einer Vielzahl von Grubenaufschlüssen nachgewiesenen Brüche auf. Dagegen ist in zentralen Teilen des Hauptanhydrits eine Verminderung der Bruchintensität zu erwarten. Die reale Wirksamkeit dieses Prozesses ist u.a. durch das bevorzugte Auftreten von Salzlösungen an den Hauptanhydritvorsprüngen bewiesen (SCHWANDT, A.(1991)).

4.2.4 Rupturelles Inventar

Dokumentationen zum rupturellen Inventar sind im Bearbeitungsgebiet an zugänglichen Hauptanhydritaufschlüssen insbesondere von FLEISCHER, S. (1960); BEHR, E.-M. (1960); ZÄNKER, G. (1972); HEMMANN, M. (1972) UND SCHWERTER, R./STÄUBERT, A. (1986, 1987) erarbeitet worden. Außerdem stützen sich die nachfolgenden Aussagen auf bisher nicht veröffentlichte Aufnahmen des bruchtektonischen Inventars (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Kluftparameter des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Grube	**Bischof-ferode**	**Bleiche -rode**	**Volken-roda/ Pöthen**	**Sollstedt**	**Sonders-hausen**	**Berlepsch**	**Neustaßfurt**
Gemessene Kluftanzahl	580	210	200	400	400	220	250
Streich-richtung (%)							
NW/SE	60	70	80	40	70	40	20
NE/SW	25	20	10	40	20	60	80
ENE/WSW	15	10	10	20	10	0	0
Einfallwinkel (%)							
< 85°	20	25	10	10	10	0	10
> 85°	80	75	90	90	90	100	90
Mittlerer Kluftabstand (m)	1,5	2,0	n.b.	1,0	4,0	4,2	2,4
Mittlere Kluftausbiß-länge (m)	> 6	> 3	2,5	2,0	2,5	5,0	4,2
Offene Klüfte (%)	4	3	0	3	0	4	4

Streichrichtung: Richtung der Streichlinie (Schnitt zwischen Horizontalebene und Kluft)
Einfallwinkel: Winkel zur Falllinie (in der Kluft senkrecht zur Streichlinie orientierte Gerade) ab der Horizontalebene nach unten
Ausbißlänge: Am untertägigen Stoß sichtbare Kluftlänge
n.b.: nicht bestimmt

Es lassen sich folgende generelle Aussagen ableiten:

- Der Hauptanhydrit ist in allen Aufschlüssen durchweg geklüftet. Die Anzahl der Klüfte ist abhängig von der regionalen tektonischen Beanspruchung, den Lagerungsverhältnissen sowie der Materialbeschaffenheit.

- Die Klüfte sind teils geschlossen, teils mit Salzmineralien, Salzlösungen und Gasen gefüllt. Offene Klüfte im Hauptanhydrit der Grubenaufschlüsse nehmen mit zunehmender Teufe ab.
- Der Hauptanhydrit besitzt, bedingt durch seine stoffliche Zusammensetzung, ein typisches Trennflächeninventar.
- Die im Hauptanhydrit nachgewiesenen Kluftrichtungen sind konform mit den großregionalen Beanspruchungen, d.h. die Hauptkluftrichtungen verlaufen nahezu parallel zu den im Deckgebirge nachgewiesenen Hauptstörungen.

Diese allgemeinen Aussagen lassen sich durch folgende spezielle Untersuchungsergebnisse im Bearbeitungsgebiet wie folgt bestätigen:

- Die im Bereich der Grubenfelder Berlepsch-Maybach und Neustaßfurt VI/VII nachgewiesenen Hauptkluftrichtungen verlaufen etwa parallel der quer zum Staßfurter Sattel im Deckgebirge erkannten Verwerfungsbrüche. Dabei ist die Anzahl der Klüfte generell im Bereich der Anhydritklippen stärker entwickelt als in Bereichen normaler Mächtigkeit.
- Im Saale-Unstrut-Kalirevier wird die Hauptkluftrichtung und nahezu das gesamte Kluftinventar durch die NW-SE streichenden Roßlebener- und Teutschenthaler Sättel bestimmt. Im Westteil des Teutschenthaler Sattels ist zusätzlich noch die NE-SW-Richtung vorhanden, die etwa parallel zu den erkundeten Bruchstörungen verläuft.
- Für das östliche Südharzgebiet ist gleichfalls die NW-SE-Richtung dominierend, entsprechend des Verlaufs der Bruchstörungen im Deckgebirge (Tabelle 4.3, Gruben Sondershausen, Volkenroda-Pöthen und Bleicherode). Im westlichen Südharz-Gebiet dagegen nimmt die NNE-SSW orientierte Klüftung entsprechend der im Deckgebirge entwickelten Bruchstörungen und Grabenbrüche zu.

Nach STÄUBERT, U.; STÄUBERT, A. (1989) kann lokal auch die Mächtigkeit des Staßfurtsteinsalzes eine Bedeutung für die Hauptkluftrichtung im Hauptanhydrit besitzen. Je nach Mächtigkeit des Staßfurtsteinsalzes und der Stärke der Aktivierung präexistenter Störungen im Grundgebirge wurden mit der Klüftung im Hauptanhydrit präexistente, alte tektonische Linien deutlich oder zum Teil auch fast nicht nachgezeichnet.

4.3 Ausbildung und Tektonik des Grauen Salztons

4.3.1 Ausbildung

Wie bereits ausgeführt, schließt der Graue Salzton die Staßfurtfolge (Zechstein 2) mit dem Gebänderten Deckanhydrit ab und leitet die Leinefolge (Zechstein 3) ein. Er wurde stratigraphisch bereits von PRECH, H. (1882) bearbeitet. Dabei ist ein liegender tonig-anhydritischer, ein mittlerer tonig-sandiger und ein hangender tonig-magnesitischer Teil ausgeschieden worden (Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Gliederung des Grauen Salztons zwischen Südharz und Allertalgraben

Allertal SCHULZE, G.; U.A. (1961)	**Saale/Unstrut** LÖFFLER, J. (1962)	**Südharz** LANGBEIN, R. (1963)	**Thüringen** MOSLER, H. (1966)
Magnesitische Partie (0,7 m)	Tonig-magnesitischer Teil (Hangendes)	Magnesitische Wechselfolge δ_2 (1,5 m) Magnesitbank δ_1 (0,5 m)	Hangendes Karbonatgestein γ_4 Tonig-karbonat. Wechselfolge γ_3 Hangende Tonsteinlage γ_2 Magnesitbank γ_1
Tonige Partie (1,6 m)	Tonig-sandiger Teil (Liegendes)	Graue Sandflaserlage γ_2 (0,5 m) Braune Sandflaserlage γ_1 (1,0 m) Rotbrauner Salzton und Wechselfolge β_2 (4,0 m) Anhydritischer Grauer Salzton β_1 (1,0 m)	Starksandiger Tonstein β_2 Schwachsandiger Tonstein β_1 Anhydritischer Tonstein α_6 Toniger Anhydrit α_5 Weitgebänderter Anhydrit α_4 Enggebänderter Anhydrit α_3 Liegende Tonsteinlage α_2 Liegender Anhydrit α_1
Anhydritische Partie (1,5 m)	Deckanhydrit	Gebänderter Anhydrit α (1,5 m)	
Decksteinsalz			

Die durch LANGBEIN, R. (1963) für das Südharzgebiet erarbeitete Feingliederung konnte durch MOSLER, H. (1966) grundsätzlich bestätigt werden. Gleichzeitig wurde die untere anhydritische sowie die obere magnesitische Folge in weitere Subzonen (α_1 bis α_6 sowie γ_1 bis γ_4) untergliedert. Unabhängig von diesem Sachverhalt wird bei der stratigraphischen Aufnahme des Grauen Salztons im Südharz- und Saale-Unstrut Kaligebiet die Gliederung von LANGBEIN, R. (1963) und im Nordharz-Kaligebiet von SCHULZE, G.; U.A. (1961) genutzt. Diese stratigraphischen Einteilungen haben sich auch in Gebieten mit beachtlichen Mächtigkeitsschwankungen bestätigt. Der Graue Salzton ist überwiegend mit Mächtigkeiten unter 10 m ausgebildet. Nur im nordwestlichen und südwestlichen Teil des Südharz-Kaligebietes weist er Mächtigkeiten von über 20 m auf.

Auf Grund der Verteilung von Anhydrit, Ton, tonigem Sandstein, Magnesit u.a. sind im Bearbeitungsgebiet überwiegend nach LANGBEIN, R. (1963) insgesamt folgende wesentliche Abschnitte zu unterscheiden:

Gebänderter Anhydrit (α)

Dieser Horizont entspricht dem Deckanhydrit (RICHTER-BERNBURG, G. 1987) oder auch dem Tonanhydrit. Verbreitet ist er im gesamten Bearbeitungsgebiet und auch im kalisalzführenden Zechstein 2. Für die Ausbildung ist eine überwiegend engschichtige Wechselfolge von Anhydrit und stark tonigem Anhydrit mit Tonfugen charakteristisch. Im mittleren Teil des Gebänderten Anhydrits ist im Nordharz-Kaligebiet auch ein weitgebänderter Anhydrit nachweisbar, der gleichzeitig in den Tonsteinpartien Dolomit führt.

Anhydritischer Grauer Salzton (β_1)

Es ist ein schwarzgraues, nahezu festes Tongestein mit einzelnen Anhydritlagen. Lokal, insbesondere im Ostteil des Saale-Unstrut-Kaligebietes können auch rotbraune Lagen auftreten.

Rotbrauner Salzton (β_2)

Typisch für diesen Horizont ist ein rotbraunes, oft mürbes Tongestein, das massig, strukturlos ausgebildet ist und mit schwarzgrauen Lagen wechselt. Vereinzelt sind in dieser Zone auch sandige Lagen entwickelt. In diesem Horizont wurden im Südharz-Kaligebiet teils beträchtliche Mächtigkeitsschwankungen nachgewiesen.

Braune Sandflaserlage (γ_1)

Sie besteht aus rotbraunen, schräggeschichteten, karbonatischen Sandsteinen mit teilweisen Tonsteinzwischenlagen. Die Abgrenzung zum rotbraunen Salzton erfolgt durch die

gehäufte Ausbildung der sandigen Lagen. Die braune Sandflaserlage ist überwiegend in Gebieten mit einer Mindestmächtigkeit des Grauen Salztons von 9 bis 10 m, d.h. im Südharz, teilweise auch im Saale-Unstrut-Kalirevier entwickelt.

Graue Sandflaserlage (γ_2)

Diese Lage ist in nahezu allen Kalirevieren nachweisbar als grünlichgraue, oft schräggeschichtete, karbonatisch-tonige Sandsteinlage mit Tonsteineinlagerungen. Dabei sind die größten Mächtigkeiten und die deutlichste Ausbildung im Südharz-Kalirevier bestimmt worden. Im Nordharz-Kalirevier konnten nur sporadisch schwache Sandsteingehalte im Tonstein beobachtet werden.

Magnesitbank (δ_1)

Mit einem zähen Karbonatgestein aus Dolomit, Calcit und Breunnerit wird die karbonatische Folge des Grauen Salztons eingeleitet. Die Magnesitbank besteht aus gelbgrauem bis grauschwarzem Karbonatgestein mit geringen Tongehalten. Durch ihre Festigkeit und ihren splittrigen Bruch weist sie gleichzeitig die auffälligste petrographische Grenze zwischen Karbonat- und Tongestein auf. Die Mächtigkeit der Magnesitbank nimmt vom Südharz-Kaligebiet (20-60 cm) über Saale-Unstrut-Kaligebiet (etwa 30 cm) zum Allertalgraben (etwa 10 cm) ab.

Magnesitische Wechselfolge (δ_2)

Sie bildet den Abschluss der Karbonatfolge und damit gleichzeitig auch den Abschluss des Grauen Salztons. Charakteristisch für diesen Horizont ist ein Wechsel vom tiefschwarzen, schiefrigen, bituminösen und mürben Tonstein mit sehr festen, anhydritischen und oft halitischen Karbonatbänkchen mit Braunspatblättchen (LANGBEIN, R. 1963). Die Mächtigkeit dieser Magnesitischen Wechselfolge weist die gleiche regionale Entwicklung wie die Magnesitbank auf.

Nach chemischen Untersuchungsergebnissen (LANGBEIN, R. 1963) ist im oberen Teil des Grauen Salztons ein Maximum des Karbonatanteils festzustellen. Im unteren Teil ist eine Zunahme des Anhydritgehaltes nachweisbar. Silikate und Quarze überwiegen im mittleren Teil.

Bei mineralogisch-petrographischen Untersuchungen konnte durch LANGBEIN, R. (1963) im Grauen Salzton nachgewiesen werden:

- Im Tonanhydrit ein sehr feinkörniger Anhydrit, der vorwiegend bis 50 µm lange xenomorphe Leisten bildet.

- Im Salzton i.e.S. zahlreiche Glimmerleisten von 2-5 µm, gelegentlich auch bis 25 µm. Das gesamte Gestein ist mit feinverteilten Eisenmineralien durchtränkt, die in den rotbraunen Partien als Limunit bestimmt wurden.
- Im Sandstein eine Körnigkeit von 20-100 µm, im Mittel etwa 60 µm. Das Bindemittel des Sandsteins weist eine tonig-ferritische Substanz sowie Orthoklas, untergeordnet Mikroklin und wenig Plagioklas auf.
- Im Magnesitgestein das Vorhandensein eines ophitähnlichen Gefüges aus Plättchen eines Braunspates. In verschiedenen Aufschlüssen ist dieses Gestein ausschließlich als Braunspat entwickelt.
- Im Dolomitgestein eine Feinkörnigkeit, bis 10 µm große xenomorphe Kristalle mit typischem Pflastergefüge. In Poren und Hohlräumen ist Dolomit nachweisbar.
- Im Anhydritgestein der oberen Partie Kristalle mit über 50 µm, die bis 500 µm reichen.

4.3.2 Tektonik

Moderne tektonische Dokumentationen des Grauen Salztons im Bearbeitungsgebiet liegen nicht vor. Generell wird diese Schichtenfolge als ein stark zur Bruchtektonik neigender Horizont bezeichnet (LOTZE, F. 1957 u.a.). Er reagiert bereits bei geringen geomechanischen Beanspruchungen durch Aktivierung der Klüfte sowie Bildung von Rissen. Nach HESSMANN, W.; SCHWANDT, A. (1961) ist aber die Kluftintensität im Grauen Salzton geringer als im Hauptanhydrit.

Bei Befahrungen der Aufschlüsse des Grauen Salztons in den Kali- und auch Kupferschiefergebieten sind Harnische sowie geschlossene und mineralgefüllte Klüfte feststellbar. Aussagen über Ausbildung und Anzahl offener Klüfte sind wegen fehlender Detailuntersuchungen sowie komplizierter geomechanischer Verhältnisse nicht möglich.

Die auftretenden Klüfte streichen parallel zu den jeweils im Deckgebirge nachgewiesenen Hauptstreichrichtungen von Bruchstörungen. Dabei ist im Südharz die NW-SE- und im Nordharz die NNW-SSE-Richtung vorherrschend. Eine weitere Hauptstreichrichtung verläuft senkrecht dazu.

Auf Grund begrenzter Aufschlüsse sind Aussagen zur Kluftlänge problematisch. Nach den durch die Auffahrungen begrenzten Aufschlussweiten wurde eine im Südharz-Kaligebiet durchschnittliche Kluftlänge von 0,3 bis 0,5 m errechnet, die im Extremfall bis 15 m reichen kann (LANGBEIN, R. 1963). Die Intensität der Klüftung ist von der petrographischen Ausbildung abhängig. So ist die intensive Klüftung in karbonatischen und anhydritischen Platten entwickelt. In den tonig-sandigen Bereichen sind mehr Risse als Klüfte sichtbar.

Die Kluftfüllungen bestehen überwiegend aus Carnallit, Sylvin und Steinsalz. Im Südharz-Kaligebiet sind weiterhin anhydritische Kluftfüllungen bekannt, die sich besonders auf den

Tonanhydrit konzentrieren. Für die Spaltenfüllungen ist die parallel-fasrige Struktur typisch, die bei allen Mineralfüllungen beobachtet wird. Ausnahmen sind überwiegend auf den magnesitischen Teil des Grauen Salztons beschränkt. Hier sind feinkörnige Strukturen nachweisbar.

4.4 Begründung der Messortauswahl anhand der Typen und Formen des Hauptanhydrits und Grauen Salztons

Aus den gegebenen Darstellungen lassen sich folgende Formen und Typen des Grauen Salztons und Hauptanhydrits erkennen und nachweisen:

- Die Sedimentgesteine sind zunächst flach-wellig abgelagert worden. Danach ist es, noch während der Sedimentation des Leinesteinsalzes, zu einer Umwandlung des Gipses in Anhydrit gekommen, was zur Bildung von Anhydritbuckeln und -armen sowie Anhydritklippen führte.

- Mit dem Einsetzen der tektonischen Beanspruchung sind Lagerungsformen entstanden, die von einer nahezu gleichmäßigen Sattelbildung bis zu einer diapirartigen Verformung reichen. Außerdem sind Versetzungen der Schichtenfolge mit relativ großen Versetzungsbeträgen zu beobachten. Sie können bis zur Abtrennung einzelner Schollen führen, die in den darüber oder darunter liegenden Schichten liegen. Dadurch entstanden einzelne Hauptanhydrit- und Salzton-freie Bereiche.

- Diese bruchtektonische Beanspruchung ist verbunden mit einer intensiven Klüftung. Dabei ist der Grad der kleintektonischen Beanspruchung im Wesentlichen abhängig von der Lage der Schichten im Gesteinsverband und deren Teufe. Die Klüfte sind aber generell bei allen Lagerungsformen nachweisbar.

- Von Bedeutung im Sinne der Aufgabenstellung ist die begründete Aussage, dass der Anhydrit in nahezu ungestörter Ausbildung und entsprechender Ablagerung im Wesentlichen hydraulisch dicht und mechanisch durch eine höhere Bruchfestigkeit gekennzeichnet ist. Mit der Zunahme der Intensität der Klüftung werden beide Werte gleichlaufend negativ beeinflusst, wobei die Abnahme der hydraulischen Dichtheit zusätzlich durch die Teufenlage charakterisiert wird. So ist mit der Abnahme der Teufe gleichzeitig eine Zunahme des offenen Kluftvolumens feststellbar (SCHWANDT, A. 1991).

Aus der Erkenntnis, dass gravierende Unterschiede im lithologischen und tektonischen Erscheinungsbild teufenabhängig auftreten, wurden für die gebirgsmechanischen Untersuchungen Messorte in möglichst unterschiedlichen Teufen und mit unterschiedlichen geologischen Lagerungsformen empfohlen. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der in den Bergwerken im Bearbeitungsgebiet für ein mehrjähriges FuE-Programm notwendigen Zugänglichkeit zu den Aufschlüssen und der infrastrukturellen und bergbausicherheitlichen Randbedingungen wurden ein Ort im Bergwerk Volkenroda-Pöthen in 1000 m Teufe in einem ruhig gelagerten Anhydritbereich und ein Ort im Bergwerk Bernburg in 500 m Teufe in einer Wallstruktur ausgewählt.

4.5 Bergbauliche Kurzcharakteristik der Gruben Volkenroda-Pöthen und Bernburg

Volkenroda-Pöthen

Die zum Südharz-Kalirevier gehörende Lagerstätte der Grube Volkenroda-Pöthen liegt im Thüringer Becken etwa 12 km nordöstlich der Stadt Mühlhausen unter den Ortschaften Menteroda und Pöthen. Sie ist durch die Schächte Volkenroda, Pöthen I und Pöthen II erschlossen. Der Schacht Pöthen I wurde von 1910 bis 1913 abgeteuft und ist, soweit bekannt, mit 1033 m Teufe der tiefste Kalischacht der Welt. Etwa 220 m südlich liegt mit einer Endteufe von 1024 m Schacht Pöthen II (1911 bis 1913 erstellt) und 3500 m nördlich Schacht Volkenroda mit 1001 m Teufe (Abschluss der Teufarbeiten 1909).
Das abgebaute Kaliflöz Staßfurt steht in etwa 1000 m Teufe überwiegend in Hartsalzausbildungen an. Das Abbaufeld Volkenroda wurde zunächst in südlicher und später in östlicher Richtung entsprechend der Salzausbildung aufgefahren. Mit dem planmäßigen Lagerstättenabbau wurde 1922 begonnen. Die Abbautätigkeit im Grubenfeld Pöthen begann 1936 vorwiegend in südlicher Richtung. Beide Gruben sind durch einen ca. 1 km breiten lagerstättenfreien Bereich, der von 2 Verbindungsstrecken durchörtert ist, voneinander getrennt. Die Produktion wurde 1990 eingestellt. Das Grubenfeld nimmt insgesamt eine Fläche von nahezu 30 km² ein und fällt mit 3 - 5 Grad nach Südosten. Die Gesteinstemperatur im Tiefsten bei 1200 m beträgt 36° C.

Eine Besonderheit im Südharz - Kalirevier stellte die Erdölgewinnung aus dem liegenden Hauptdolomit dar. Sie begann in den 1930er Jahren und war zeitweise so ergiebig und rentabel, bis auf die Liegendbohrungen in das klüftige Muttergestein waren keine zusätzlichen Auffahrungsarbeiten notwendig, dass die Absicht bestand, eine Erdölleitung bis nach Leuna zu bauen. Insgesamt wurden etwa 100.000 t Erdöl mit Förderraten von 5 m³/Tag gefördert.

Der Gasgehalt im Öl war so hoch, dass alle etwa unter 45° angesetzten Gewinnungsbohrungen eruptierten. Die Drücke der verschlossenen Bohrungen schwankten zwischen 2 und 8 MPa. Teilweise kam es in Verbindung mit dem Gebirgsdruck zu beträchtlichen Sohlenaufbrüchen im liegenden Staßfurtsteinsalz und zur Bildung kleiner Öltümpel.
Zusätzlich zu den Kohlenwasserstoffen kam es auch zu Gas- und Salzlösungszutritten aus dem Liegenden. Neben der Pfeilerdimensionierung besaß deshalb die Festlegung der Liegendschutzschichtmächtigkeit eine wesentliche bergbausicherheitliche Bedeutung beim Hartsalzabbau.
Eine weitere bergbausicherheitliche Bedeutung hatten vereinzelte Tonbrüche in den Firsten. Dabei erfolgten insbesondere in Hangendpartien mit geringer Einspannung und großer freigelegter Firste (z.B. über Streckenkreuzen) Brüche des Grauen Salztons bis maximal zum tonig - sandigen Bereich. Die Stöße der Bruchkontur sind bei gleichzeitig mineralgebundener Gasführung wesentlich steiler und glatter als ohne Gasführung. Die Gasbeteiligung (im Mittel 42 % N_2, 31% H_2 und 26 % CH_4) konnte mit Gasdruckaufbaumessungen in Bohrlöchern nachgewiesen werden.

Die 3 Schächte des heute zur Gesellschaft zur Verwahrung und Verwertung von stillgelegten Bergwerksbetrieben (GVV) gehörenden Werkes sind inzwischen geschlossen und die noch offenen Grubenbaue werden gegenwärtig zur Einleitung von hochmineralisierten Haldenlaugen genutzt.

Bernburg

Die Grube Bernburg ist heute ein Werk der esco-european salt company GmbH & Co. KG und liegt am Südrand der Stadt Bernburg in Sachsen-Anhalt.
Die Erkundung der Salzlagerstätten im Bernburger Raum begann erst am Ende des 19. Jahrhunderts. Nach 8 Tiefbohrungen Anfang der 1880er Jahre wurde 1884 bis 1890 der Schacht Friedenshall I (Solvayhall I) geteuft. Der östliche Bernburger Lagerstättenteil wurde danach bis 1906 mit den weiteren 4 Schächten Friedenshall II (Solvayhall II), Peißen (Solvay), Plömnitz I und Plömnitz II aufgeschlossen. Mit dem Abteufen des Schachtes Johanne in Ilberstedt im Jahre 1911 begann die Erschließung des westlichen Lagerstättenteils. Hier wurden insgesamt 6 Schächte niedergebracht.

Anfangs wurde im Bernburger Raum Carnallitit (Flöz Staßfurt) abgebaut. Die Kalisalzproduktion erreichte jedoch nicht die wirtschaftliche Bedeutung wie am Staßfurter Sattel. Mit dem verstärkten Einsatz von Steinsalz in der chemischen Industrie, insbesondere der Elektrolyse

in Bitterfeld und Buna, entwickelte sich Mitte der 1950er Jahre in Bernburg ein selbständiger Steinsalzabbau. Die Kaliförderung wurde Ende 1973 eingestellt.
Das abgebaute Leinesteinsalz ist in sehr unterschiedlichen Mächtigkeiten ausgebildet, im Normalprofil werden 100 - 150 m angegeben. Der Teufenbereich im Grubenfeld Bernburg-Gröna, hier wurden die In-situ-Untersuchungen durchgeführt, liegt zwischen 350 und 600 m. Schacht Gröna wurde an der NE - Flanke des Grönaer Sattels abgeteuft, Schacht Bernburg reicht bis in die relativ steil einfallende 150 m tiefere Kinsdorfer Mulde. Abgesehen von kleineren Spezialsätteln und -mulden mit wechselndem Streichen ist das Generaleinfallen nach NNE gerichtet. An den Sattelflanken sind die Zechsteinschichten z.T. ausgedünnt, in den Sattelhöchsten und Muldentiefen z.T. angestaut (LÖFFLER, J. (1962)).

Der Abstand zur Grube Friedenshall (Solvayhall) beträgt etwa 0,7 km. Diese Grube wurde Ende 1967, nachdem Laugenzuflüsse aus dem Hangenden eine Rate von 3,5 m^3/min erreicht hatten, dem Ersaufen preisgegeben. Das Grubengebäude ist seit 1971 mit Lauge gefüllt. Die Gründe des Absaufens und die geomechanische Standsicherheit sowie hydraulische Wirksamkeit des Laugensicherheitspfeilers zum Grubenfeld Bernburg - Gröna bildeten den Gegenstand mehrerer Gutachten. Die Abdichtfunktion des Sicherheitspfeilers wurde positiv eingeschätzt und bis heute sind keine Undichtheiten bekannt.

In Verbindung mit dem Abbaugeschehen bzw. der geologischen Erkundung wurden im Abbauhorizont der Grube Bernburg - Gröna nur vereinzelt Gas- und/oder Salzlösungszutritte festgestellt. Diese Zutrittsstellen befanden sich meist in der Nähe des Hauptanhydrits bzw. in ihm selbst. Im alten Kalifeld der Grube sind südöstlich der Schächte Bernburg und Gröna einige Feucht- bzw. Tropfstellen im Zusammenhang mit Tonbrüchen im Grauen Salzton bekannt geworden. Die Analysen wiesen hohe $MgCl_2$ - Konzentration nach. Von HEMMANN, M. (1972) wurden sie als Metamorphose - Restlaugen bezeichnet. Die Zutritte versiegten entweder schnell oder ließen sich erfolgreich abdichten. Der Salzlösungsaustritt ist oft mit Entgasungen verbunden. Den Hauptbestandteil bildet zu etwa 80 % N_2, die Gehalte von bis zu 4 % Methan können eine Sonderbewetterung erforderlich machen. Gleichfalls bekannt sind Gaszutritte ohne Salzlösungszufluss (Bläser). Diese sind vorzugsweise an Klippen oder Wälle des Hauptanhydrits gebunden und entspannen sich meist kurz nach der Freilegung. Insgesamt sind die Gas- und Salzlösungsaustritte im Grubenfeld Bernburg - Gröna vergleichsweise selten und haben zu keinen nennenswerten bergmännischen Komplikationen geführt.

4.6 Stratigraphie und Tektonik im Bereich der Messorte

Hauptanhydrit in Volkenroda-Pöthen

Infolge der Faltenstrukturen im Grubenfeld Volkenroda-Pöthen ist der Hauptanhydrit mehrmals aufgeschlossen. Zwischen Fahrstrecke und Eb - Strecke ist der Hauptanhydrit über eine Länge von etwa 250 m relativ ruhig gelagert (Abb. 4.1). Die Mächtigkeit beträgt etwa 40 m und die Wetterstrecke verläuft etwa in halber Höhe des Schichtpaketes leicht ansteigend mit 1 % in Richtung Volkenroda. Die Teufe beträgt 1013 m. Der Untersuchungsort liegt etwa in der Mitte zwischen Fahrstrecke und Eb - Strecke. In diesem Bereich erfolgte die Streckenauffahrung in den Jahren 1958/59 sowie die Rekonstruktion für den Einsatz der Großgerätetechnik im Zeitraum 1964 bis 1967. Im Grenzbereich Hauptanhydrit (A3) / Leinsteinsalz (Na3) kam es dabei im Dezember 1965 zu einem Austritt gesättigter NaCl - Lösung aus dem A3, der nach kurzer Zeit versiegte.

Die Anhydritmesskammer (Höhe 2,5 m, Breite 4 m, Länge 15 m) wurde rechtwinklig und söhlig zur Wetterstrecke Ost aufgefahren. Die Entfernung zur Fahrstrecke beträgt etwa 95 m. Vor der Auffahrung wurden bezüglich des konkreten Ortes keine speziellen geologisch / tektonischen Vorgaben festgelegt. Die Kammer sollte jedoch stratigraphisch mitten im ruhig gelagerten Hauptanhydrit in einem geologisch erkundeten Bereich liegen. Die lokale Mächtigkeit von 40 m entspricht dem Grubenmittelwert bei ungestörten Lagerungsbedingungen.

Feinstratigraphisch ist der aufgeschlossene Hauptanhydrit der Zone A3 epsilon zuzuordnen. Die Abgrenzung der einzelnen Zonen im Hauptanhydrit wird dabei vorwiegend anhand der Anordnung eingelagerter Fremdsubstanzen in der Gesteinsmatrix vorgenommen. Infolge der Gleichartigkeit des Gefüges und der relativ schwach ausgebildeten Texturen ist dabei ein subjektiver Einfluss nicht auszuschließen.

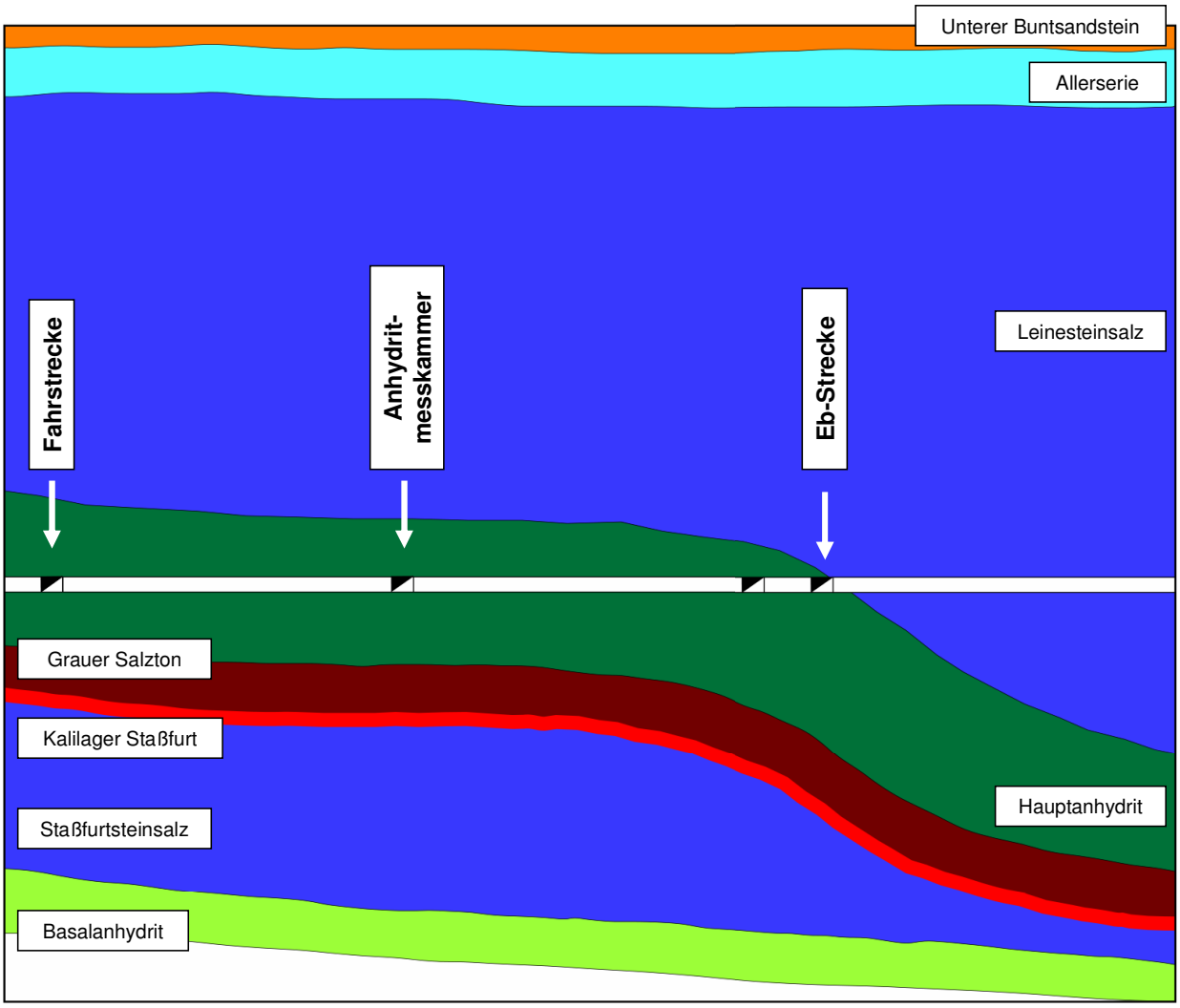


Abb. 4.1: Geologisches Profil der Wetterstrecke Ost Pöthen und Lage der Anhydritkammer (Zeichnung von Kali Südharz AG, Teufe 1013 m)

Mit einer ingenieurgeologischen Aufnahme wurde in der Kammer sowie beidseitig in den angrenzenden 60 m in der Wetterstrecke der makroskopisch erkennbare Kluftbefund, soweit er sich einer tektonischen Beanspruchung zuordnen lässt, erfasst. Die natürlichen Klüfte waren schwer zu erkennen und es erfordert Erfahrungen, diese von den Sprengrissen an der Streckenkontur bzw. an noch stehenden Sprenglöchern sicher zu unterscheiden. In den wenigsten Anhydritklüften wurde eine Kluftfüllung festgestellt. Harnischflächen als weiteres mögliches Unterscheidungsmerkmal zu Sprengrissen waren überhaupt nicht zu finden. Als einziges Merkmal konnte nur die Schnittspur der Kluftfläche an der Streckenkontur verwendet werden. Während Sprengrisse oft gebogene Rissflächen mit rauer Oberfläche und geringen Erstreckungen besitzen, zeigen die natürlichen Klüfte meist einen geradlinigen Anschnitt mit ebenen Kluftflächen. Die Zuordnung wird weiter vereinfacht, wenn die Kluftfläche über eine weite Entfernung, evtl. an beiden Stößen und der Firste, zu erkennen ist.

Zur Kluftcharakterisierung wurden die üblichen im Felsbau verwendeten Parameter genutzt und mit einem Geologenkompass eingemessen. Die folgenden in Tabelle 4.6 aufgeführten primären Kluftparameter stammen aus KAMLOT, P.; U. A. (1995):

- Raumlage in Grad
- Zuordnung zu einer Kluftschar
- Kluftabstand d_K bei einer Schar in cm
- Kluftausbißlänge l_K in m (in 6 Klassen zugeordnet)
- Kluftöffnungsweite f_K in mm mit evtl. Kluftfüllungen (a für Anhydrit, h für Halit, c für Carnallit)

Tabelle 4.6: Kluftaufnahmeprotokoll Hauptanhydritaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Raumlage der Klüfte in Grad		Schar	Kluftabstand d_k in cm	Ausbißlänge l_k in m						Öffnungsweite f_k in mm	
Streichen	Einfallen			< 0,5	< 1	< 3	< 5	< 10	> 10	Betrag	Füllung
121	5	E				x					
220	19	Hs				x					
221	4	Hs	6	x							
211	2	Hf	3	x							
227	5	Hs	43			x					
67	5	Hs	6	x							
72	18	He		x							
74	6	He	3			x					
71	9	He		x							
269	32	He	160	x							
85	17	He			x						
86	14	He	12		x						
268	31	He		x							
216	20	Hs	481	x							
220	12	Hs	37	x							
227	13	Hs		x							
200	5	Hf							x		
50	5	Hs				x				0,5	a
47	4	Hs	2			x					
49	9	Hs	2			x					
51	8	Hs	5			x					
63	5	Hs	8	x							
56	5	Hs					x			1	a
44	5	Hs	2			x					
204	14	Hf		x							
227	2	Hs	2085			x					
220	4	Hs	156		x						
231	4	Hs	6		x						
230	4	Hs	308			x					
24	4	Hf			x						
197	4	Hf				x					
202	9	Hf	9	x							

Zur Charakterisierung der Raumlage der Klüfte wird die Durchstoßrichtung der Flächennormalen (Lot) zur Kluftfläche in der unteren Halbkugel (Schmidtsches Netz) verwendet. Es sind zwei Winkel erforderlich, die Angabe erfolgt in Grad:

Streichen: Winkel zwischen der Lotprojektion auf die Horizontalebene und Nord; von Nord beginnend im Uhrzeigersinn bis 360 Grad

Einfallen: Winkel zwischen Lot und Horizontalebene; von der Horizontalebene beginnend bis 90 Grad nach unten

Für alle Klüfte wurde die Scharzuordnung nach folgender Nomenklatur angegeben:

Streichrichtung (Grad)	Schar	Symbol
1 - 30	rheinisch	R
31 - 90	erzgebirgisch	E
91 - 125	flachherzyn	Hf
126 - 160	steilherzyn	Hs
161 - 180	eggisch	He

Die Kluftabstände sind kluftscharbezogene Einzelabstände. In einigen Fällen wurde nur eine Einzelkluft gefunden. Die Klasseneinteilung der Ausbißlängen basiert auf der Arbeit von SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986). Eine Einteilung in 6 Klassen ist praktikabel und ausreichend.

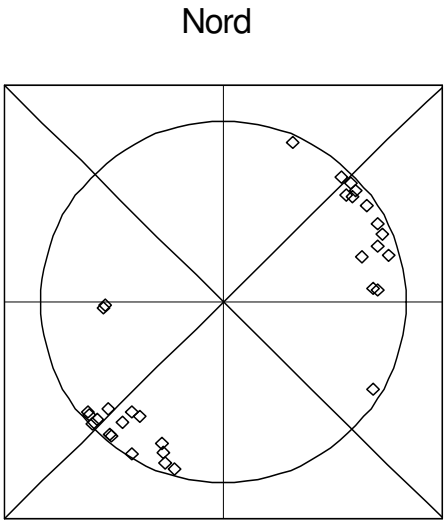


Abb. 4.2: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Hauptanhydritaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Die Klufterfassung im Untersuchungsbereich des Hauptanhydrits Pöthen ist in Abbildung 4.2 dokumentiert. Bis auf eine Ausnahme sind alle Klüfte herzyn oder eggisch mit steilem Einfallen ausgerichtet. Der mittlere Kluftabstand beträgt 175 cm. Die Ausbißlängen sind zu 56 % kleiner als 1 m. Die meisten Klüfte sind geschlossen.

Die Resultate stimmen mit der Arbeit von SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1987) mit folgenden Ergebnissen überein:

- Die Streichrichtungen im mittleren und östlichen Südharzgebiet sind vorwiegend steilherzyn mit steilen bis seigeren Einfallwinkeln.
- Der mittlere Kluftabstand beträgt 98 cm, wobei 49 % kleiner als 50 cm, 13 % größer als 2 m und 3 % größer als 4 m sind.
- Die mittlere Kluftausbißlänge liegt bei 2 m, wobei 66 % kleiner als 1 m und 9 % größer als 5 m sind.
- Die Klüfte im Hauptanhydrit sind zu 90 % geschlossen. Die offenen Klüfte sind zu etwa 50 % verheilt. Ihre Öffnungsweiten liegen im Mittel zwischen 0,5 und 2 mm.

Grauer Salzton in Volkenroda-Pöthen

Der Graue Salzton ist in Pöthen gleichfalls über die Wetterstrecke Ost aufgeschlossen. Der gewählte Messort befindet sich etwa 500 m entfernt in Richtung ENE von der Anhydritmesskammer in Richtung Volkenroda. Der Salzton ist dort nur im Firstbereich ab dem Rotbraunen Salzton bis zum Hauptanhydrit teilweise ausgebaut und seit Jahrzehnten aufgefahren. Die Teufe beträgt ebenfalls 1013 m.

Die feinstratigraphische Gliederung entspricht der Arbeit von LANGBEIN, R. (1963). In neueren Einteilungen wird der Gebänderte Anhydrit als Deckanhydrit bezeichnet und nicht zum Grauen Salzton gezählt. Jedoch ist die Einteilung nach LANGBEIN auch heute noch weit verbreitet und da im Rahmen der vorliegenden Arbeit Dünnschliff-Untersuchungen von Prof. Langbein am Hauptanhydrit und Grauen Salzton durchgeführt wurden, wird diese Unterteilung konsequenterweise angewandt.
Der Graue Salzton besitzt grundsätzlich ein von lokalen Strukturen unabhängiges, regionales Kluftsystem, das unabhängig von der lithologischen Gliederung angelegt ist. Bei SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986) findet sich die Aussage, dass der T3 eine "wenig geregelte Klüftung mit nur halbsteilem Einfallen und geringen Kluftabständen" aufweist. Die am Streckenaufschluss des Grauen Salztons aufgenommene Kluftkartierung (Tabelle 4.7)

bestätigt diese Aussage. Die Darstellung aller Klüfte im Schmidtschen Netz in Abbildung 4.3 zeigt keine bevorzugte Streichrichtung und halbsteile Einfallwinkel. An beiden Streckenstößen wurden insgesamt 34 Klüfte gemessen. Die Firste war z.T. ausgebaut.

Tabelle 4.7: Kluftaufnahmeprotokoll Salzton Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Raumlage der Klüfte in Grad Streichen	Einfallen	Schar	Kluftabstand d_k in cm	Ausbißlänge l_k in m < 0,5	< 1	< 3	< 5	< 10	Öffnungsweite f_k in mm Betrag	Füllung
Anhydritischer Grauer Salzton										
243	45	Hs			x				1,5	a
153	54	E		x					1	a
324	35	E		x					12,5	a
315	18	E		x						
198	45	Hf		x					0,75	a
243	70	Hs		x					0,5	a
270	36	He				x			6,5	a
50	41	Hs		x					1,5	a
126	0	E		x					3	a
207	32	Hf				x			0,5	a
135	32	E		x					4,5	a
135	20	E			x				0,5	a
288	68	R		x					4,5	a
Rotbrauner Salzton/ Wechselfolge										
14	32	Hf				x			0,5	h
297	68	R		x					5	a
306	18	E		x					0,25	a
252	59	He		x						
140	41	E		x					4	a
306	32	E		x					0,75	a
144	36	E		x					1,7	a
153	45	E		x					0,5	c
356	54	E		x					1,7	a
324	54	E		x					0,75	a
14	59	Hf		x					1,3	a
Braune Sandflaserlage										
117	59	R			x				0,75	a
306	21	E			x				0,5	c
306	21	E		x					0,5	c
Graue Sandflaserlage										
243	32	Hs				x			0,5	h
351	63	E		x					0,5	h
Magnesitbank										
189	63	Hf		x					7,5	h
Magnesitische Wechselfolge										
203	57	Hf				x			0,25	h
221	71	Hs		x					0,75	h
221	71	Hs		x					0,75	a
266	14	He			x				0,75	a

Es lässt sich folgende Kluftcharakteristik geben:

- Die Raumstellung der Kluftrichtungen im Grauen Salzton des Untersuchungsortes ist erwartungsgemäß im Allgemeinen breit gefächert. Dabei gehen einzelne Richtungsmaxima ineinander über und belegen eine in nahezu allen Richtungsquadranten auftretende Zerteilung des Grauen Salztones.
- Am Untersuchungsort wurden sämtliche fünf Kluftscharen, wenn auch mit sehr unterschiedlicher Kluftzahl, gefunden. So beschränken sich die rheinisch und die eggisch ausgerichteten Klüfte auf jeweils 3, flachherzyn und steilherzyn sind jeweils mit 6 Klüften vertreten. Die Zahl der erzgebirgisch ausgerichteten Klüfte ist mit 16 dagegen recht hoch und damit auch deutlich unterschiedlich zum Untersuchungsergebnis im A3.
- Alle Klüfte sind bei Öffnungsweiten von 0,5 bis 12,5 mm durch Anhydrit, Steinsalz oder Carnallit verheilt und fallen mittel bis steil, hinsichtlich der Einfallrichtung ohne einheitliches Bild, ein. Bei den Hf- und Hs - Klüften überwiegt mit 75 % das Einfallen nach NE bis N.

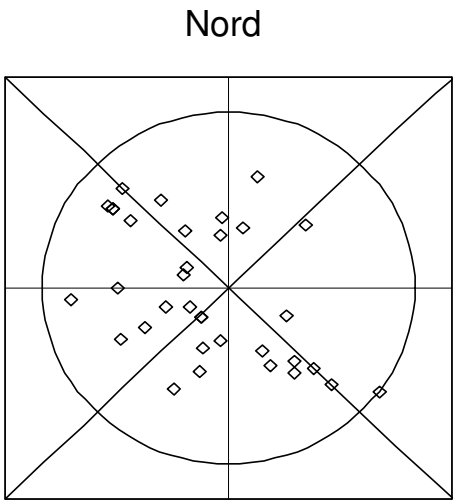


Abb. 4.3: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Salztonaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Bezüglich der Verteilung der Klüfte auf die einzelnen stratigraphischen Zonen des T3 lässt sich feststellen:

Gebänderter Anhydrit (α)

Er zeigt megaskopisch keine Bruchstrukturen, wohl aber häufig die Ausbildung von Harnischen auf den Schichtflächen als Folge von schichtparallelen Gleitbewegungen (Ausgleichsbewe-

gungen). Als Ursache für die bruchlose Verfaltung ist eine geringe Biegesteifigkeit, resultierend aus der dünnlagigen Ausbildung, anzusehen.

Anhydritischer Grauer Salzton (β_1)

Das petrologisch recht unterschiedliche Material (reiner Ton bis zum reinen Anhydrit mit entsprechenden Übergängen) reagiert unterschiedlich auf tektonische Beanspruchung. Es gibt einen deutlichen tektonischen Befund (38,2 % der gesamten erfassten Klüfte) mit Rissbildungen in verschiedensten Richtungen überwiegend nicht geradlinig scharf durchziehend. Dabei wurden nur die markanten Kluftbildungen aufgenommen. Es existieren daneben in großer Zahl kluftstatistisch nicht erfassbare Rissbildungen, deren Ursache wohl zuerst diagenetisch (Schrumpferscheinung) zu sehen ist.

Rotbrauner Salzton / Wechsellage (β_2)

Die Rissbildung (32,4 % der gesamten erfassten Klüfte) beschränkt sich auf Bänke unabhängig vom substanziellen Bestand.

Braune Sandfaserlage (γ_1)

Das tektonische Inventar ist in dieser Zone deutlich vermindert. Die "Grenzbank" von Staßfurt- zu Leineton zeigt eine interne Tektonik in Form kurzer Rupturen mit Anhydritfüllung.

Graue Sandfaserlage (γ_2)

Sie gleicht im Umfang ihres tektonischen Inventars der Zone γ_1. Zudem tritt in ihr eine mäßige Anzahl flach verlaufender oft sehr verbogener Schnitte teilweise mit Anhydrit verheilt, aber auch steiler gestellter Schnitte mit Carnallitfüllung auf. Sie dürften sich ebenfalls infolge der Diagenese gebildet haben.

Magnesitbank (δ_1)

Die Bank ist häufig zerbrochen (Zerrung). Das äußert sich in stufenartigen Absätzen mit Rupturen, die meist in das Innere der Bank konvergierend auslaufen und mit Steinsalz verheilt sind. Sie ergeben das Bild von mit Steinsalz gefüllten keilförmigen Gebilden unterschiedlicher Abmaße.

Die Öffnung erreicht nicht selten 15 - 30 mm (max. 90 mm) bei Kluftlängen bis 42 cm (maximal 118 cm). Vielfach ist die Bank durchgehend zerbrochen und ihre Teile sind gegeneinander verschoben.

Magnesitische Wechselfolge (δ_2)

Die Wechselfolge ist relativ häufig geklüftet bei unterschiedlichen Einfallswinkeln von senkrecht bis spitzwinklig zur Schichtung sowie auch Kluftlängen teilweise bis in den A3 hineinziehend. Außerdem wurde Kluftscharung mit d_K von 4, 7 und 10 cm beobachtet.

Hauptanhydrit in Bernburg

Als Versuchsort für die Auffahrung einer Kammer im Hauptanhydrit bot sich auf Grund der geologischen und der Aufschlusssituation der Wartungsplatz des Produktionsbereiches II am Wetterquerschlag 13 (Abbildung 4.4) an.

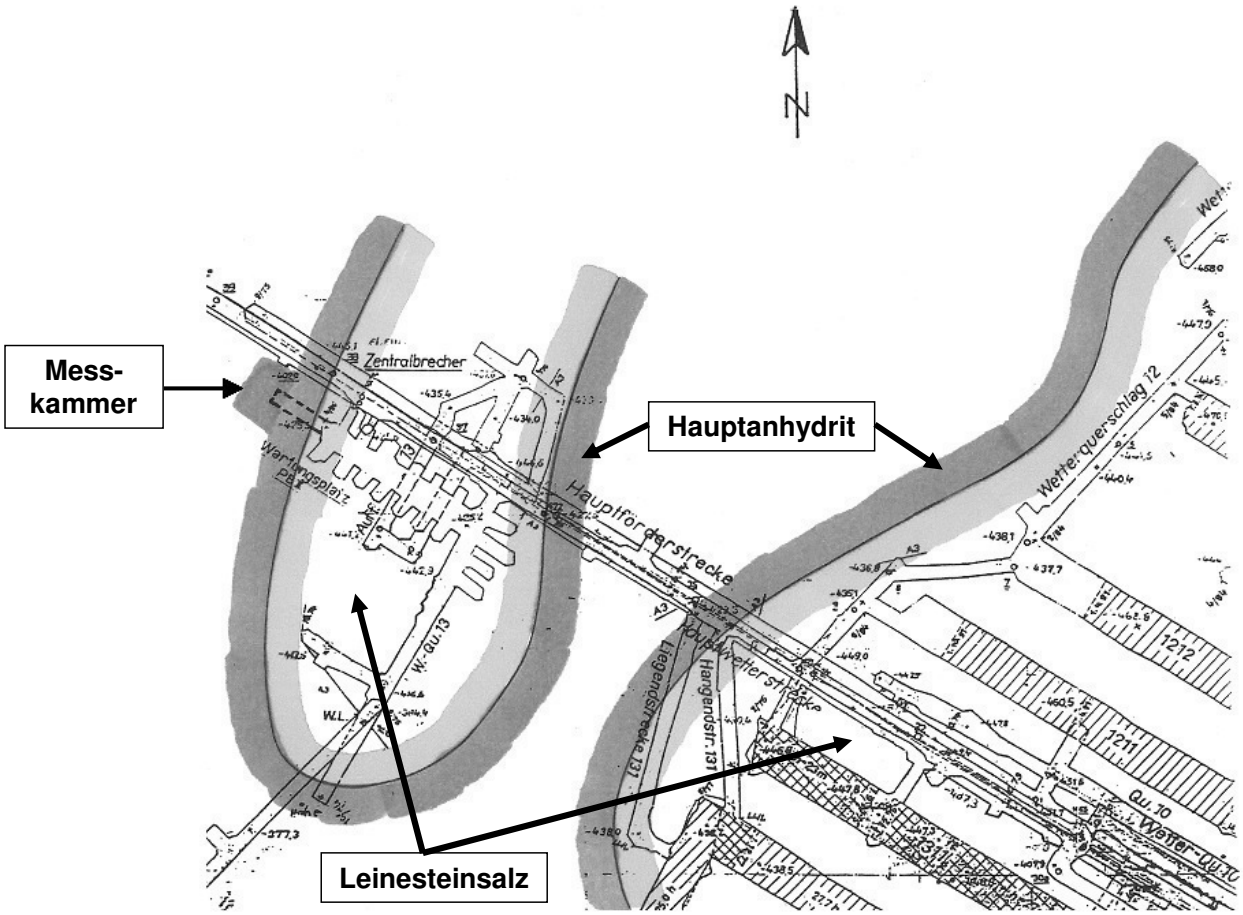


Abb. 4.4: Lage der Anhydritmesskammer am Wetterquerschlag 13 (WQ 13) in Bernburg, Teufe 510 m (Skizze von Kali und Salz GmbH)

In dem Vertikalschnitt in Abbildung 4.5 sind die Einbettung des Wartungsplatzes im Hauptanhydrit und die benachbarte Wallstruktur sichtbar. Diese wird von drei übereinanderliegenden Strecken durchstoßen, von denen die Bandstrecke 12.1 im Leinesteinsalz und die Hauptwetterstrecke (z.T. im Hauptanhydrit) befahrbar sind. Die untere ehemalige Hauptförderstrecke ist versetzt.

Auf Grund der ruhigen Lage ohne Fahrbetrieb und der guten Infrastruktur (Bewetterung, Elektroanschluss, Telefon) war diese Lokalität sehr gut geeignet, den an der nordwestlichen Ortsbrust anstehenden Hauptanhydrit zu untersuchen. Die Teufe beträgt 510 m. Der Wartungsplatz wurde 1986 aufgefahren. Die auf gleicher Höhe benachbarte Wetterstrecke in einer Entfernung von 12 m und die höher liegende Bandstrecke in 24 m Entfernung boten ideale Voraussetzungen für ein umfangreiches Messprogramm vor der Kammerauffahrung zur Erkundung der Ausgangssituation und Vorinstrumentierung und nach der Auffahrung zur Untersuchung der Gebirgsreaktion infolge der Hohlraumauffahrung.

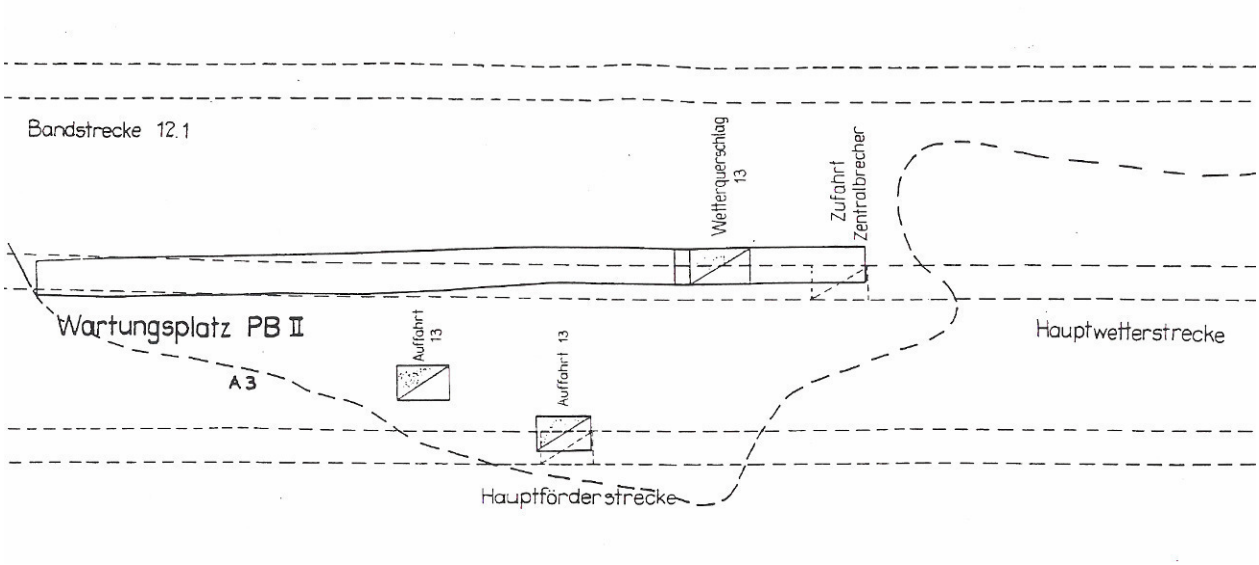


Abb. 4.5: Vertikalschnitt durch den Wartungsplatz am WQ 13 in Bernburg, Teufe 510 m, (Skizze Mitteldeutsche Salzwerke GmbH)

Die dargestellten Abweichungen von der Normalausbildung des Leinesteinsalzes sind nach HEMMANN, M. (1972) mehr oder weniger deutlich an Anschwellungen des Hauptanhydrits gebunden. Unter solchen Mächtigkeitsanschwellungen des Hauptanhydrits werden Veränderungen verstanden, welche die Normalmächtigkeit von 30 bis 35 m wesentlich überschreiten. Die Mächtigkeitsanschwellungen treten in zwei morphologisch unterscheidbaren Typen auf:

	Anhydritklippen	*Anhydritwälle*
Gesamtmächtigkeit	35 bis 90 m	ca. 70 m
"Streichende" Länge	Zehnermeter- bis Hundertmeterbereich, auch > 1 km	Kilometerbereich
Breite	einige Meter bis ca. 200 m	> 500 m

Auch hinsichtlich ihrer Genese unterscheiden sich Anhydritklippen und -wälle vermutlich. Anhydritklippen sind wahrscheinlich als frühdiagenetische Bildungen während der Ablagerungszeit des Leinesteinsalzes durch eine Entwässerung im Zusammenhang mit der Umbildung des primär sedimentierten Gipses zu Anhydrit entstanden. Anhydritwälle hingegen sind, wie aus dem Zechstein Thüringens, der Lausitz und Mecklenburgs seit langem bekannt und im Subherzyn vermutet bzw. nachgewiesen, als primär-sedimentäre Mächtigkeitsanschwellungen des Hauptanhydrits zu deuten. Wie in den anderen Gebieten mit Anhydritwällen könnte die Wallbildung an Untiefen des Abscheidungsbeckens oder/und abweichende Salinitätsverhältnisse der Beckenlösung gebunden sein.

Bei den Anhydritklippen gibt es beträchtliche Größenunterschiede. Kleinere Klippen ragen nur einige Meter bis max. 20 m über die Hauptanhydritoberfläche hinaus. Ihr Grundriss ist elliptisch oder kreisförmig und übertrifft kaum 100 m. Großklippen hingegen zeigen ähnlich den Anhydritwällen eine deutliche Längserstreckung. In dieser Richtung können sie eine Länge von über 1 km erreichen, wohingegen ihre Breite 200 m kaum überschreitet. Die Klippen, besonders Großklippen, haben häufig steile Flanken, oft durchsetzen sie nahezu senkrecht das umgebende Steinsalz. Nicht selten verlaufen einige Großklippen mehr oder weniger parallel zueinander oder verzweigen sich (Klippenschwärme). Es wird nicht ausgeschlossen, dass es morphologische und genetische Übergänge zwischen Großklippen und Wällen gibt.

Die "Streich"richtung der Großklippen im aufgeschlossenen Grubenfeld ist ebenso wie die des Anhydritwalles am Messort vorwiegend nordostgerichtet, untergeordnet tritt auch die Nord- bis Nordwestrichtung auf.

Im Sommer 1993 wurde zunächst auf einer Breite von 20 m an der nordwestlichen Ortsbrust (Abbildung 4.6) das noch anstehende Steinsalz abgetragen. Im Dezember 1993 erfolgte dann die sprengtechnische Kammerauffahrung in 4 Abschlägen zu je 2,5 m. Die aufgefahrene Messkammer hatte damit eine Tiefe von 10 m sowie eine Höhe von 4 m und eine Breite von 6 m. Der Hauptanhydrit weist im Messkammerbereich eine Mächtigkeit von etwa 85 m auf. In Firstrichtung befindet sich die Schichtgrenze Steinsalz/Anhydrit in einer Teufe von etwa 10 m. Die Schichtgrenze zum liegenden Grauen Salzton wurde auch mit einer 50 m tiefen Bohrung nicht erreicht und liegt nach den geologischen Unterlagen bei etwa 70 m Sohlenteufe.

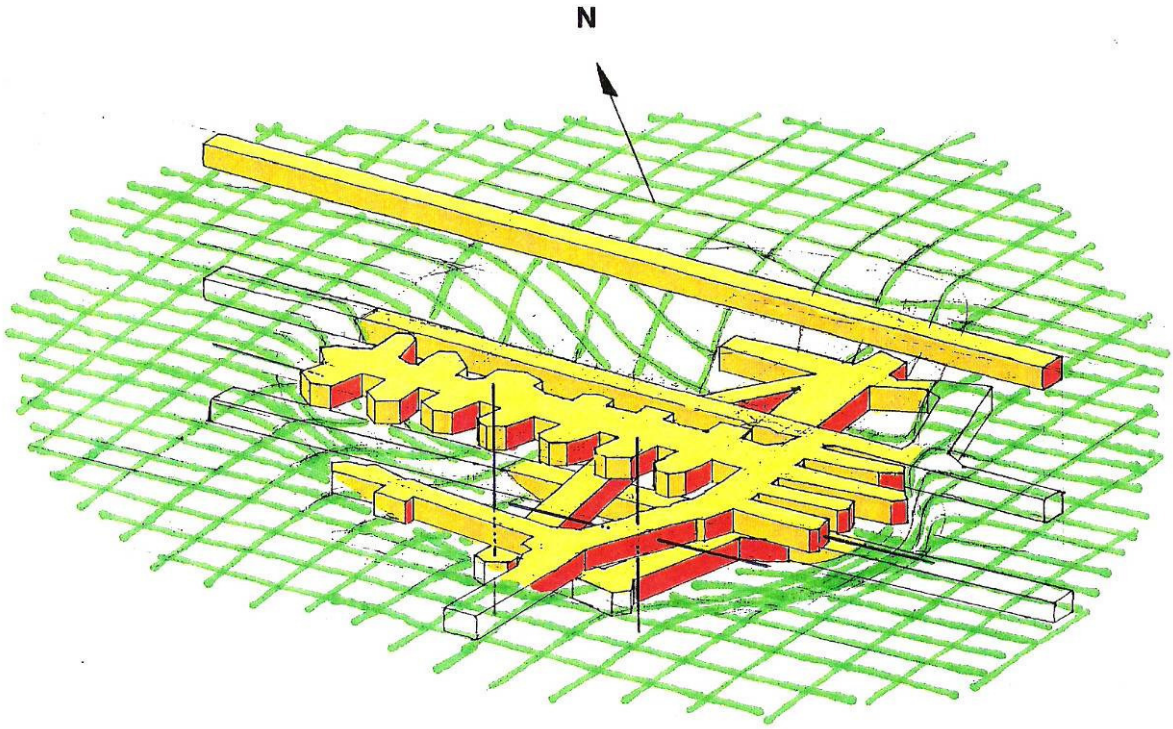


Abb. 4.6: Perspektivdarstellung Wartungsplatz WQ 13 in Bernburg, Teufe 510 m, vor der Auffahrung der Anhydritmesskammer

Wesentliches Kennzeichen der anormalen Hauptanhydritausbildung nach HEMMANN in der anstehenden Wallstruktur mit einer Breite von etwa 900 m und NE-SW streichenden Länge von etwa 1100 m ist die erhöhte Gesamtmächtigkeit. Sie kann bei wallartigen Strukturen weit über das Doppelte der Normalmächtigkeit von 35 m betragen. An der Mächtigkeitsanschwellung sind hauptsächlich die oberen Zonen gamma bis epsilon beteiligt. Die Messkammer und Hauptwetterstrecke befinden sich entsprechend dieser Gliederung eindeutig in der Zone A3 epsilon. In der gesamten Zone treten mit unterschiedlicher Intensität und Häufung Poren und Kavernen auf, die fast immer mit gelbbräunlichem bis farblosem Steinsalz gefüllt sind.

Zur Kluftkartierung im Hauptanhydrit wurden die Messkammer und die benachbarte Wetterstrecke auf der Höhe des Wartungsplatzes genutzt. Die Aufschlussverhältnisse in der Wetterstrecke waren dabei problematisch, da durch die starken Staubablagerungen wahrscheinlich Klüfte mit kleinen Ausbißlängen nicht mehr zu sehen sind. In der etwa 20-jährigen Standzeit der Wetterstrecke in diesem Bereich waren entspannungsbedingte Risse nicht auszuschließen, die es ebenso zu erkennen und von den geologischen Klüften zu trennen galt wie Sprengrisse.

Insgesamt konnten am Aufschluss 34 Klüfte erfasst und dokumentiert werden (Tabelle 4.8). Die meisten Klüfte (44 %) sind erzgebirgisch ausgerichtet. Die Raumstellung ist generell steil bis seiger. Diese Vorzugsrichtung ist jedoch nicht so eindeutig wie im Hauptanhydrit Pöthen. Der mittlere Kluftabstand ist mit 24 cm wesentlich kleiner als in Pöthen und die Ausbißlängen sind im Mittel wesentlich größer. Es wurde eine maximale Kluftöffnungsweite von 10 mm gefunden, die Füllung bestand ausschließlich aus Carnallit.

Tabelle 4.8: Kluftaufnahmeprotokoll Hauptanhydrit WQ 13 Bernburg, Teufe 510 m

Raumlage der Klüfte in Grad		Schar	Kluftabstand d_k in cm	Ausbißlänge l_k in m					Öffnungsweite f_k in mm	
Streichen	Einfallen			< 0,5	< 1	< 3	< 5	< 10	Betrag	Füllung
212	5	Hf					x			
63	4	Hs				x				
234	9	Hs						x		
243	9	Hs	46				x			
234	14	Hs						x		
81	5	He	30		x					
81	5	He					x		1	c
311	0	E						x	1	c
191	0	Hf					x			
349	0	E	15			x				
0	9	E	3	x						
0	9	E				x				
266	0	He						x		
167	2	E					x		0,8	c
324	0	E				x			6	c
104	2	R					x		10	c
162	5	E				x				
342	9	E						x	2	c
293	0	R					x		3	c
207	5	Hf				x				
324	9	E	45			x				
329	9	E			x					
315	5	E				x			1	c
288	0	R					x		5	c
252	0	He		x						
9	16	Hf					x			
315	11	E			x					
342	9	E			x					
308	5	E	4		x					
315	9	E				x				
81	5	He				x				
54	5	Hs	28				x			
59	5	Hs					x			
97	18	R				x				

Die Darstellung aller aufgenommenen Klüfte im Schmidtschen Netz ist in Abbildung 4.7 enthalten.

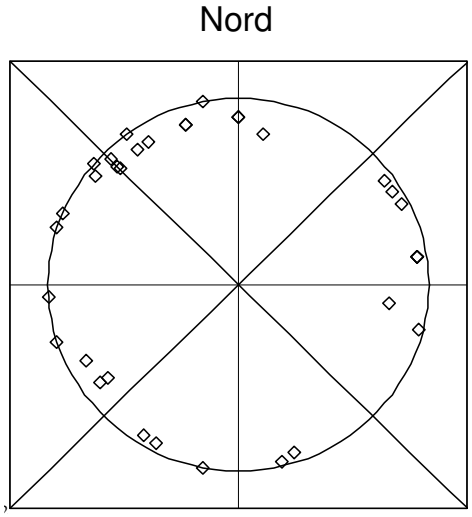


Abb. 4.7: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Hauptanhydritaufschluss WQ 13 Bernburg

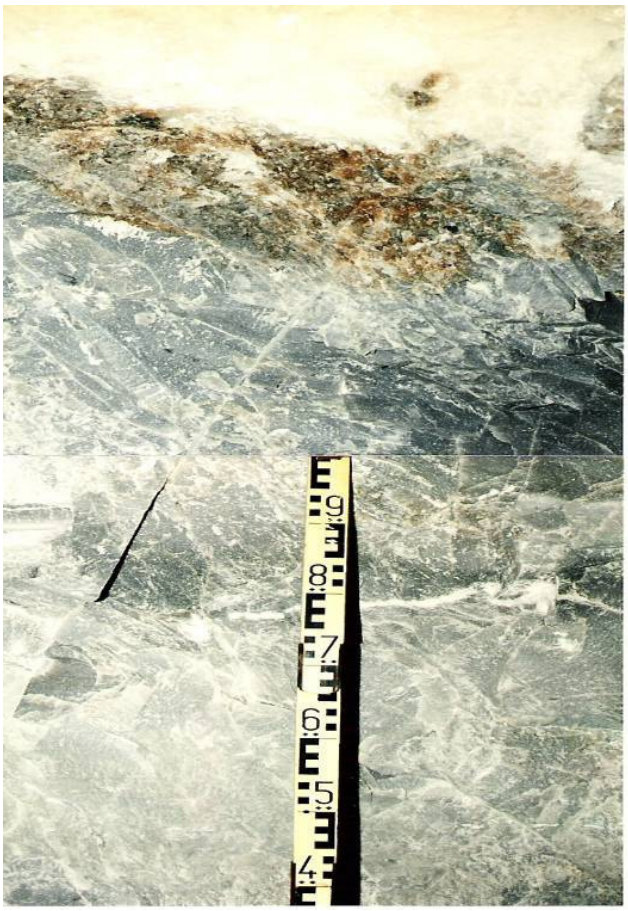


Abb. 4.8: Kluftaussetzen beim Übergang vom Anhydrit zum Steinsalz

Bezüglich der Charakterisierung lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei dem vorliegenden A3-Bereich handelt es sich um ein Gebiet mit vergleichsweise geringer bruchtektonischer Beanspruchung. Entsprechend der regionalgeologischen Beschreibung im Kapitel 3 wäre im Topbereich einer Anhydritanstauung eine intensivere Klüftung zu erwarten gewesen.
- Die Klüftung ist wenig geregelt, die erzgebirgische Richtung jedoch hervorgehoben. Damit liegt für die Hauptkluftschar Parallelität zur Streichrichtung der Wallstruktur vor.

- Sämtliche Klüfte fallen steil bis seiger ein, wobei kluftscharbezogen geringe Unterschiede in den Mittelwerten vorhanden sind.
- Die meisten Klüfte sind geschlossen. Die geöffneten mit Kluftweiten bis 10 mm sind durch Carnallit verheilt. Im Kluftscharvergleich wird deutlich, dass sich die carnallitverheilten Klüfte auf die erzgebirgische und rheinische Richtung konzentrieren und die flach- bis steilherzynen Klüfte dagegen geschlossen sind.
- Soweit makroskopisch sichtbar, setzen sich festgestellte Anhydritklüfte im hangenden Steinsalz nicht fort (Abbildung 4.8).

Die in KAMLOT, P.; U.A. (1995) bestimmten Kluftparameter ordnen sich sehr gut in den Gesamtbefund der Grube Bernburg-Gröna ein. Gleichfalls ist festzustellen, dass die Parameter der im Hauptanhydrit Pöthen vorherrschenden herzynen Kluftrichtung mit den entsprechenden Parametern der herzynen Strukturen in Bernburg übereinstimmen. Relativ lassen sich für beide Gruben folgende einheitliche Merkmale der Kluftscharen finden:

herzyne Kluftrichtung
- steile Raumlage
- größerer Abstand u. kürzere Länge (geringer geklüftet)
- weniger Klüfte geöffnet, aber davon relativ viel ohne Füllung

erzgebirgische Kluftrichtung
- steile Raumlage
- geringerer Abstand und größere Länge (stärker geklüftet)
- mehr Klüfte geöffnet, aber davon relativ viel verheilt

Eine größere hydrologische Wirksamkeit kann mit diesem Befund ohne weitere Untersuchungen keiner Kluftschar zugeordnet werden. Dazu sind die Kenntnis der geomechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Klüfte, die Lage von Laugespeichern, die Ausbildung von Schutzschichten bis zu den Grundwasserleitern u.a. notwendig.

Analog zum A3 Volkenroda-Pöthen soll auch der Hauptanhydrit Bernburg in den großräumigen Kluftbefund nach SCHWERTER, R., STÄUBERT, A. (1987) eingeordnet werden:

- Die Streichrichtungen im Nordharzgebiet sind vorwiegend erzgebirgisch mit steilen bis seigeren Einfallwinkeln.
- Der mittlere Kluftabstand beträgt 64 cm, wobei 65 % kleiner als 50 cm, 7 % größer als 2 m und 2 % größer als 4 m sind.
- Die mittlere Kluftausbißlänge liegt bei 1,3 m, wobei 65 % kleiner als 1 m und 3 % größer als 5 m sind.

- Die Klüfte sind zu etwa 60 % geschlossen. Die offenen Klüfte sind zu 60 % verheilt bei Öffnungsweiten von im Mittel 20 mm. Die unverheilten Klüfte besitzen Öffnungsweiten von im Mittel 1 mm.

Zusammenfassend wurden von SCHWERTER und STÄUBERT zu allen Hauptanhydritaufschlüssen folgende Einschätzungen gegeben:

- Der durchschnittlich 35 m mächtige Hauptanhydrit ist ein gegenüber hangenden und liegenden Schichten kompetentes Gestein. Daher ist er deutlich geklüftet, wobei die Klüfte stets steil bis seiger einfallen (75 bis 90°) und sich im Streichen meist 2 bis 3 Kluftscharen zuordnen lassen. Darunter gibt es eine Hauptkluftschar, die in der Regel durch mehrere Kluftparameter belegt wird (nicht nur durch die Abstände, sondern auch durch Kluftlängen und -weiten). Die Klüfte folgen entweder alten und saxonisch wiederbelebten tektonischen Linien oder neuen saxonischen Beanspruchungsrichtungen.
- Ein Zusammenhang der dominierenden Streichrichtungen mit dem großtektonischen Schollenbau ist deutlich. Im Hauptanhydrit des westlichen Südharz-Kalireviers überwiegen ± N-S-gerichtete und herzyne Bruchstrukturen. Untergeordnet treten erzgebirgische Klüfte auf.
- Der Einfluss der rheinischen Bruchlinien (Ohmgebirgs-Grabenzone im östlichen Randbereich des Leinegrabens) und der eggischen Richtung (Störungen im Paläozoikum des Mittelharzes) nimmt nach Süden und Osten in Richtung Thüringer Becken und östliches Harzvorland ab. Folglich erreichen analog zum regionaltektonischen Bauplan herzyne Klüfte ausgeprägte Dominanz. Erzgebirgische Klüfte bleiben untergeordnet. Im Gegensatz hierzu treten trotz herzyn gerichteter Sattelstrukturen in der Subherzynen Senke bevorzugt erzgebirgische Klüfte auf. Offensichtlich war ein Durchpausen/Wiederbeleben der alten angelegten subsalinaren Linien durch das extrem mächtige Staßfurtsteinsalz (300 - 500 m) im Zuge der saxonischen Tektogenese nicht möglich, so dass während der erzgebirgisch gerichteten Pressung (jungmesozoisch-alttertiär) und den dadurch ausgelösten Aufsattelungen eigenständige Hauptklüfte entstanden. Der Zerrungscharakter dieser Klüfte wird durch häufige Verheilungen unterstrichen.
- Gibt es unverheilte Klüfte im Hauptanhydrit, so sind sie meist weniger als 2 mm weit. Bis zu 35 % aller Klüfte können in Einzelaufschlüssen mineralisiert sein, oft mit beträchtlichen Verheilungsweiten (Nordharz, westliches Südharzgebiet). Unabhängig von tektonischen und Lagerungsverhältnissen wurden trotz Abbau- und Gebirgsdruckwirkungen ab ca. 800 m keine offenen Klüfte im Hauptanhydrit beobachtet.

Eine Teufenabhängigkeit von Kluftabständen und -längen ist dagegen nicht nachweisbar.

Grauer Salzton in Bernburg

Der Graue Salzton ist auf Grund seiner geringen Festigkeit im Grubenfeld Bernburg-Gröna in der Regel ausgebaut. Als Messort kam deshalb nur ein ausgebauter Streckenabschnitt in Frage, von dem der Horizont über Bohrungen erreicht werden konnte. Dazu wurde die Transportstrecke XII unmittelbar am Sicherheitspfeiler des Schachtes Gröna ausgewählt. Hier ließ sich in einer Streckenerweiterung die Bohrtechnik unterbringen und waren die notwendigen infrastrukturellen Bedingungen gegeben. Die Teufe beträgt 410 m.

Bei der feinstratigraphischen Aufnahme wurde die für das Nordharz-Kaligebiet typische T3-Gliederung gefunden:

- karbonatische bzw. tonig magnesitische Partie im Hangenden
- tonige bzw. tonig sandige Partie im mittleren Teil
- anhydritische bzw. tonig anhydritische Partie im Liegenden.

Am Grauen Salzton Bernburg konnten infolge der Abdeckung durch den Ausbau weder Kluftaufnahmen durchgeführt werden, noch lagen strukturgeologische Befunde aus früheren Arbeiten vor.

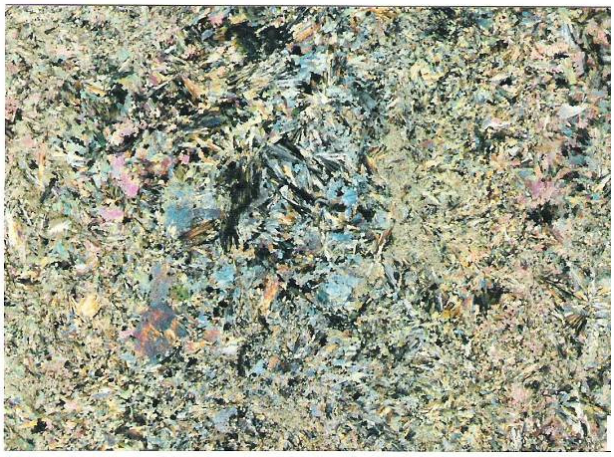
4.7 Petrographisch-petrologische Untersuchungen an Dünnschliffen

Für die petrographischen Untersuchungen, deren Ergebnisse im Folgenden zusammenfassend (weitere Befunde in KAMLOT, P.; U. A. (1995)) dargestellt sind, wurden Kerne von Bohrungen beprobt. Die Anhydritbohrung in Bernburg wurde mit 10° ansteigend aus dem Wartungsplatz in nordwestliche Richtung in den Anhydritwall gestoßen. Sie befindet sich im Teufenniveau der Messkammer in der feinstratigraphischen Zone A3ε. Vom Hauptanhydrit der Grube Volkenroda-Pöthen standen kurze Kernstrecken ebenfalls aus der Zone A3ε zur Verfügung.

Der Anhydritische Graue Salzton aus Volkenroda-Pöthen wurde mit einer geringen Probenanzahl und der Rotbraune Salzton, einschließlich der Braunen Sandflaserlage, mit einer größeren Schliff-Serie hinsichtlich Eigenschaften und Variabilität untersucht. Vom Profil des Grauen Salztons in Bernburg wurden mit 12 Proben die wichtigsten Typen für die

Untersuchung ausgewählt. Das Profil überstreicht den gesamten stratigraphischen Bereich des T3.

Ausgehend von den zu erzielenden Aussagen zum Gefüge und der tektonischen Beanspruchung wurde als günstigste Methode die mikroskopische Untersuchung von Groß-Dünnschliffen verwendet. Die Dokumentation der Untersuchungsergebnisse erfolgte in Kurz-Protokollen mit Fotos in 10facher Vergrößerung. Als besonders geeignet erwies sich dabei für die Anhydrite eine ungewöhnliche Technik unter Anwendung von zwei parallel gestellten Polarisationsfiltern, da damit sowohl die Anhydrit-Struktur als auch gleichzeitig die Texturen der Verunreinigungen deutlich werden.



(In den Abbildungen 10fache Vergrößerung)

Abb. 4.9: A3 Pöthen mit fein- und grobkörnigem Gefüge

Abb. 4.10: A3 Bernburg mit Steinsalzporen

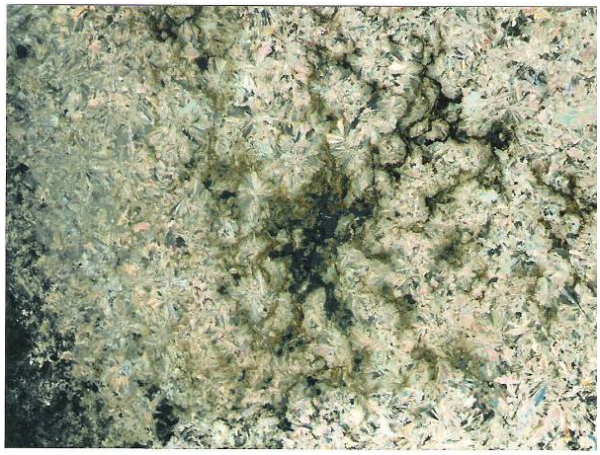


Abb. 4.11: A3 Bernburg mit Bitumen-Suturen und Porenstruktur

Die primären Gefügetypen sind während der zechsteinzeitlichen Sedimentation und Kristallisation entstanden, stellen also den primären Stoffbestand dar. Die sekundären

Gefügetypen haben teilweise den primären Porenraum der Sulfate ausgefüllt und sind damit ebenfalls quasi sedimentär. Sie können aber auch während einer tektonischen Überprägung die entstandenen Klüfte ausgefüllt, oder gar während der Salinar-Subrosion die primären Gefüge durch Rekristallisation überprägt haben. Die Gefügecharakterisierung erfordert damit eine spezielle Untersuchung der jeweiligen Probe.

Zusammenfassend lassen sich für den **Hauptanhydrit** folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Mikroskopisch wurde in Pöthen ein "gewachsenes" Gefüge ohne Hinweise auf tektonische Beanspruchungen nachgewiesen. Auch in Bernburg wurden im Dünnschliff keine Kluftfüllungen und Risse, die auf solche Beanspruchungen hinweisen, gefunden. Jedoch ist hier anzumerken, dass nur ausgewählte kompakte Bohrkerne zur Präparation an Prof. Langbein übergeben wurden. Strukturelemente sind sedimentär bis frühdiagenetisch zu erklären. Generell ist im Hauptanhydrit die Variabilität der Zusammensetzung sehr gering. Die anhydritische Substanz in Pöthen ist weitgehend karbonatisch verfestigt und innig verwachsen (Abbildung 4.9). In Bernburg dagegen ist eine Reaktionsanhydritstruktur festzustellen, die stark von halitgefüllten Poren durchsetzt ist (Abbildung 4.10). Einzelne Texturbereiche sind durch tonig-bituminöse Schmitzen voneinander getrennt (Abbildung 4.11).

Das gehäufte Auftreten von Reaktionsanhydrit lässt eine salinarsubrosive Beeinflussung vermuten. Geomechanisch ist vom Bernburger Anhydrit eine größere Verformbarkeit und geringere Festigkeit relativ zum Pöthener Anhydrit zu erwarten. Innerhalb der Profile sind nur graduelle Unterschiede wahrscheinlich. Allein die Abweichungen in den Texturen dürften geomechanisch nicht relevant sein. Inhomogenitäten stellen lediglich die Poren und bituminösen Schmitzen dar. Eine ausgeprägte Schichtung wurde im Hauptanhydrit nicht gefunden. Mit *Suturen* werden Spuren der Auflösung des Sedimentgesteins in der frühen Diagenese bezeichnet. Bei einer Umkristallisation und Gefüge-Verdichtung wird die unlösliche bituminöse Substanz in Suturen angereichert. Diese sind von besonderem Interesse, da sie ausgeprägte mechanische Inhomogenitätsbereiche darstellen.

Bezüglich des zu erwartenden geomechanischen Verhaltens ist einzuschätzen, dass der Anhydrit aus Bernburg und aus Pöthen jeweils unterschiedlich reagieren wird, während innerhalb der jeweiligen Profile nur graduelle Unterschiede zu erwarten sind. Im Profil Bernburg sind einzelne, mm bis cm große Texturbereiche des Anhydrites durch tonig-bituminöse Schmitzen voneinander getrennt. Kontaktstellen Anhydrit/Anhydrit sind in unterschiedlicher Häufigkeit nur zurücktretend entwickelt. Da von den "Schmitzen" oder Suturen nur eine geringe Festigkeit zu erwarten ist, sollte nach einer anfänglichen Belastbarkeit der Proben (bis

zur Zerstörung der Kontakte) ein Zerfall in durch Bitumen-Schmitzen abgegrenzte Bereiche erfolgen.
Im Profil Pöthen fehlen tonig-bituminöse Schmitzen weitgehend. Hier liegt eine enge und innige Verwachsung mit dolomitischem Karbonat vor. Da es sich bei beiden Mineralen um relativ feste Gesteinsbildner handelt, sind keine Inhomogenitäten im Gefüge zu erwarten. Lediglich die reliktisch erhaltenen Schichtungsfugen im Dolomit werden bei höherer Belastung zum Tragen kommen, und zwar umso mehr, je höher der zusammenhängende Karbonatanteil ist.

An den Dünnschliffuntersuchungen am **Grauen Salzton** wurde beobachtet, dass die sedimentären Gefüge (Abbildung 4.12) außerordentlich gut erhalten sind (Pöthen) bzw. eine primär frühdiagenetische Anlage (Bernburg) vorhanden ist. In Bernburg liegt auf Grund des gefundenen Reaktionsanhydrits in häufig durchgehenden schichtparallelen Klüften weiterhin eine tektonische bzw. salinar subrosive Beeinflussung nahe (Abbildung 4.13).

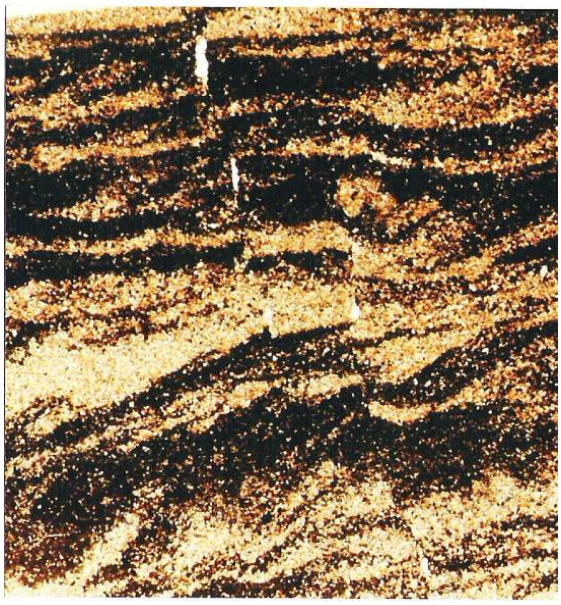


Abb. 4.12: Grauer Salzton Pöthen, flaserschichtiger Ton-Siltstein mit zwei anhydritgefüllten Mikroklüften (10fache Vergrößerung)

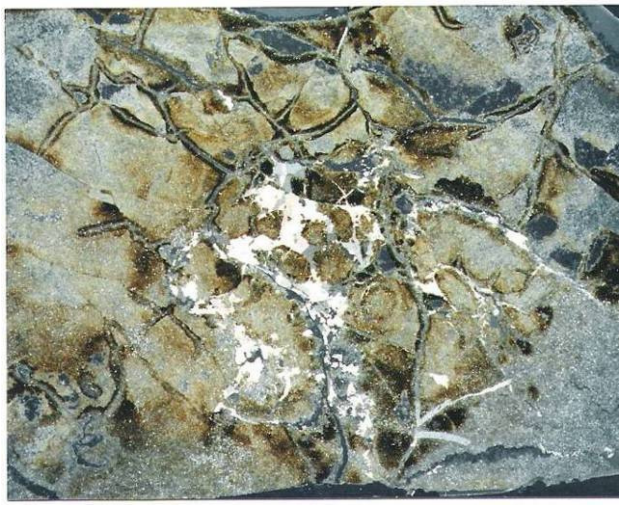


Abb. 4.13: Grauer Salzton Bernburg, intensive Klüftung mit Schwundrissen (gefüllt mit Reaktionsanhydrit), Ausgangspunkt für Verwitterung (10fache Vergrößerung)

Ungewohnt und nur in Bernburg zu beobachten war eine Bröckelstruktur in den reinen Tonlagen, von denen eine Verwitterung ausging. Eine Salinarsubrosion ist der Oberkreide bzw. dem frühen Tertiär zuzuordnen. Anzeichen einer rezenten Subrosion wurden nicht gefunden.

Bezüglich der Feinstratigraphie besitzt der Rotbraune Salzton die geringste Festigkeit. In Pöthen ist der Halit das wichtigste Zementationsmaterial, welches die Festigkeit dominierend beeinflusst. Bezogen auf den Standort ist in Bernburg eine geringere Festigkeit zu erwarten. Eine intensive Zementation fehlt hier, der Anhydrit kann keinen Zement, sondern nur diskrete Lagen oder Knoten bilden.
Im Südharz spielen quellfähige montmorrilonitische Minerale eine relativ große Rolle. Hier ist bei Feuchtigkeitskontakt eine Quellung zu erwarten, die auf Grund des Rekristallisationsgrades in Bernburg nur eine untergeordnete Bedeutung besitzt.

Die Klüfte und Risse im Salzton lassen sich nur schwer einem Beanspruchungsplan zuordnen. Es finden sich viele Trockenriss-Strukturen bis hin zu intensiven Zerstückelungen. Diese sind meist synsedimentär gefüllt und nicht tektonisch verursacht. Die ingenieurgeologisch erfassten Klüfte fallen unter verschiedenen Winkeln ein und konnten keiner Vorzugsrichtung zugeordnet werden. Die Ausbißlänge lag im Mittel unter 0,5 m. Die meisten Klüfte waren geöffnet mit Weiten bis 12,5 mm, jedoch alle verheilt, meist mit Anhydrit.
Bezüglich der hydrogeologischen Relevanz kann aus der Klüftigkeit allein, wie beim Anhydrit, noch kein Gefährdungsszenario abgeleitet werden.

Im Grauen Salzton liegt, im Gegensatz zum Hauptanhydrit, meist eine ausgeprägte Schichtung vor.

5. Ergebnisse der Laborversuche am Hauptanhydrit und Grauen Salzton

5.1 Dichten, elastische Parameter, Festigkeiten und Gaspermeabilitäten

Dichten und elastische Parameter

Als grundlegende Materialparameter wurden zunächst ρ (Dichte), E (Elastizitätsmodul) und ν (Poissonzahl) ermittelt. Bei der dargelegten geologisch-tektonischen Ausbildung waren ausgeprägte Streuungen der Kennzahlen infolge der vorhandenen natürlichen Klüfte, Mikrorisse und unterschiedlichen Materialzusammensetzungen zu erwarten.

Die Bestimmung der elastischen Parameter erfolgte ausgehend von hydrostatischen Spannungswerten $\sigma = \sigma_1 = \sigma_3$ in Triaxialversuchen mit Belastungszyklen $\Delta\sigma$ der Vertikalspannung σ_1 (Konstanthaltung des Manteldrucks) und des Manteldrucks σ_3 (Konstanthaltung der Vertikalspannung) sowie in uniaxialen Versuchen mit Entlastungsschleifen unter Messung der Querdehnung der Proben. In der Tabelle 5.1 sind für etwa 20 Proben je Gesteinsart die Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben (soweit nicht gesondert ausgewiesen, werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich die Stichproben-Standardabweichungen verwendet). Das Höhen- zu Durchmesserverhältnis (Schlankheitsgrad) lag generell bei 2. Die Prüfkörperhöhen betrugen 80 bzw.192 mm.

Tabelle 5.1: Dichten und elastische Parameter

	Dichte (g/cm^3)	**Elastizitätsmodul (GPa)**	**Poissonzahl**
Hauptanhydrit Pöthen	2,92 ± 0,04	62,5 ± 10,0	0,25 ± 0,06
Hauptanhydrit Bernburg	2,92 ± 0,01	59,7 ± 10,0	0,26 ± 0,04
Grauer Salzton Pöthen	2,58 ± 0,13	23,9 ± 5,7	0,14 ± 0,06
Grauer Salzton Bernburg	2,55 ± 0,12	17,3 ± 6,5	0,16 ± 0,04

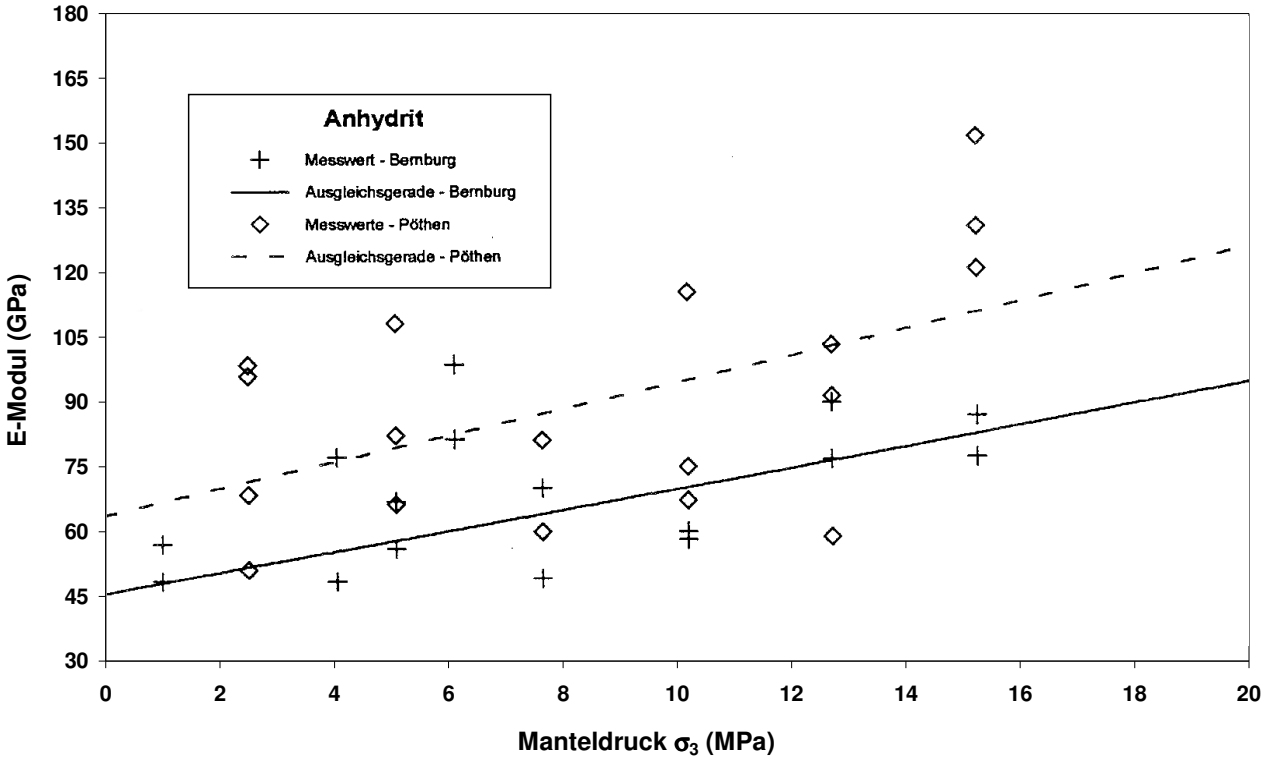


Abb. 5.1: Manteldruck-Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls (GPa) von Anhydrit

Auf Grund der natürlichen Materialvielfalt zeigte sich z. T. eine deutliche Spannungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls, die bei geklüfteten oder stark porenhaltigen Proben größer war als bei kompakten Prüfkörpern. In Abbildung 5.1 ist exemplarisch für den Anhydrit die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls vom Manteldruck dargestellt.

Uniaxiale Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit

Die Ermittlung der uniaxialen Bruchfestigkeit erfolgte mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ %/s = 0,06 %/min. Der Schlankheitsgrad betrug 2 bei einer Prüfkörperhöhe von 192 mm.

Die Resultate sind in Tabelle 5.2 enthalten. Für den Anhydrit Pöthen wurde ein Mittelwert von 78,5 MPa (7 Versuche) gefunden, wobei die geringeren Festigkeiten z.T. mit Klüften in Verbindung stehen, die makroskopisch nicht immer erkennbar waren. Der Anhydrit Bernburg (5 Versuche) zeigte insgesamt ein sehr einheitliches Festigkeits- und Verformungsverhalten. Die geringere Streuung belegt diese Aussage.

Die Festigkeiten des Salztons aus Pöthen (10 Versuche) und Bernburg (5 Versuche) sind im Mittel wesentlich niedriger. Bei einzelnen Prüfkörpern der anhydritischen und magnesitischen Zonen kam es jedoch zu einer Überschneidung mit den Streubereichen der Festigkeitswerte des Anhydrits.

Tabelle 5.2: Uniaxiale Druckfestigkeit

	σ_D **(MPa)**
Hauptanhydrit Pöthen	78,5 ± 14,3
Hauptanhydrit Bernburg	63,4 ± 8,8
Grauer Salzton Pöthen	32,4 ± 11,7
Grauer Salzton Bernburg	48,5 ± 12,6

Die Zugfestigkeit wurde, da eine direkte Messung bei den zu untersuchenden Gesteinen besondere versuchstechnische Voraussetzungen erfordert hätte, im indirekten Zugversuch (Spaltzugversuch) an jeweils 10 Proben je Gesteinsart ermittelt. Es wurden zylindrische Prüfkörper mit einem Längen- zu Durchmesserverhältnis $h/d \approx 1$ und $d \leq 50$ mm durch Streifenkräfte bis zum Bruch belastet. Die diametral wirkenden Druckkräfte führen im Bruchpunkt zu einer Aufspaltung der Proben. Die Belastung der Proben erfolgte in Verformungsregelung, wobei die Verformungsgeschwindigkeit so gewählt wurde, dass die Versuchsdauer auf ca. fünf Minuten beschränkt blieb. Die Rissbildung sollte zwar theoretisch vom Inneren der Probe ausgehen, begann aber bei der überwiegenden Anzahl der Versuche an den Krafteinleitungsstellen. Man muss in diesem Fall davon ausgehen, dass der Bruch vor dem Erreichen der maximal möglichen Zugspannung erfolgte und in örtlichen Festigkeitsüberschreitungen im Bereich der Lasteinleitung begründet ist. Die ermittelten Festigkeitswerte sind deshalb als eine untere Schranke des Streubereiches der tatsächlichen Zugfestigkeit zu betrachten.

Die Versuche am Salzton Pöthen umfassten nahezu alle Bereiche der feinstratigraphischen Unterteilung des T3. Dabei zeigte Rotbrauner Salzton Spaltzugfestigkeiten $\sigma_{SZ} \leq 1$ MPa und an Proben aus dem Bereich der Sandflaserlagen wurden mittlere Spaltzugfestigkeiten von $\sigma_{SZ} \approx 2$ MPa gemessen. Die Werte für anhydritischen und magnesitischen Salzton sind mit denen von Anhydrit vergleichbar und betragen $\sigma_{SZ} \approx 3 - 6$ MPa. Der Salzton aus der Grube Bernburg zeigte bezüglich der Spaltzugfestigkeit ein homogeneres Bild, da die Proben im Wesentlichen aus den anhydritischen und magnesitischen Zonen entnommen wurden. Für beide Gruben wurde ein Mittelwert $\sigma_{SZ} = 2{,}8 \pm 1{,}5$ MPa gefunden.

Einheitlicher als beim Salzton stellten sich die Spaltzugfestigkeiten von Anhydrit dar. Im Mittel betrug die gemessene Spaltzugfestigkeit von Anhydrit beider Probenahmeorte $\sigma_{SZ} = 7{,}6 \pm 1{,}3$ MPa. In Tabelle 5.3 sind alle Resultate dargestellt.

Tabelle 5.3: Spaltzugfestigkeit und triaxiale Festigkeitsparameter

	σ_{SZ} (MPa)	Reibungswinkel (Grad)	Kohäsion (MPa)
Hauptanhydrit Pöthen	7,6 ± 1,3	46,2	16,7
Hauptanhydrit Bernburg	7,6 ± 1,3	41,5	17,0
Grauer Salzton Pöthen	2,8 ± 1,5	37,0	9,9
Grauer Salzton Bernburg	2,8 ± 1,5	38,0	7,6
Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage	< 1,5	37,0	4,2

Triaxiale Druckfestigkeit

Die triaxialen Festigkeitsversuche wurden als Kompressionversuch (TC) in Triaxialzellen nach dem Kármán - Prinzip in Verformungsregelung durchgeführt. Dabei ist wegen der rotationssymmetrischen Spannungsverteilung $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{min}$. Die Belastung erfolgte zuerst hydrostatisch durch eine Lastaufgabe bis zum petrostatischen Teufendruck der Entnahmestelle mit einer Rate von 0,1 MPa/s. Danach erfolgte eine Entlastung auf $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{min}$ und schließlich die eigentliche Belastung mit einer vertikalen Stauchungsrate von $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ %/sec = 0,06 %/min. Der Schlankheitsgrad betrug 2 und die Prüfkörperhöhe 192 mm. Während des Versuches wurden der Manteldruck, die Axialkraft und die Axialstauchung registriert.

Die Festigkeitsuntersuchungen zeigen, dass für Anhydrit und Salzton im geprüften Untersuchungsbereich in erster Näherung ein linearer Ansatz zur Darstellung des Zusammenhanges von vertikaler Spannung und Manteldruck gerechtfertigt ist. Die graphischen Darstellungen in den Abbildungen 5.2 bis 5.5 machen jedoch deutlich, wie stark die Messergebnisse streuen. An den Anhydrit- und Salztonproben sind bei den Einzelmessungen durchaus Abweichungen von über 50 % von der Ausgleichsgerade zu beobachten. Für die Festigkeitsbewertungen sind in Tabelle 5.3 die Kohäsionen und Reibungswinkel aufgeführt.

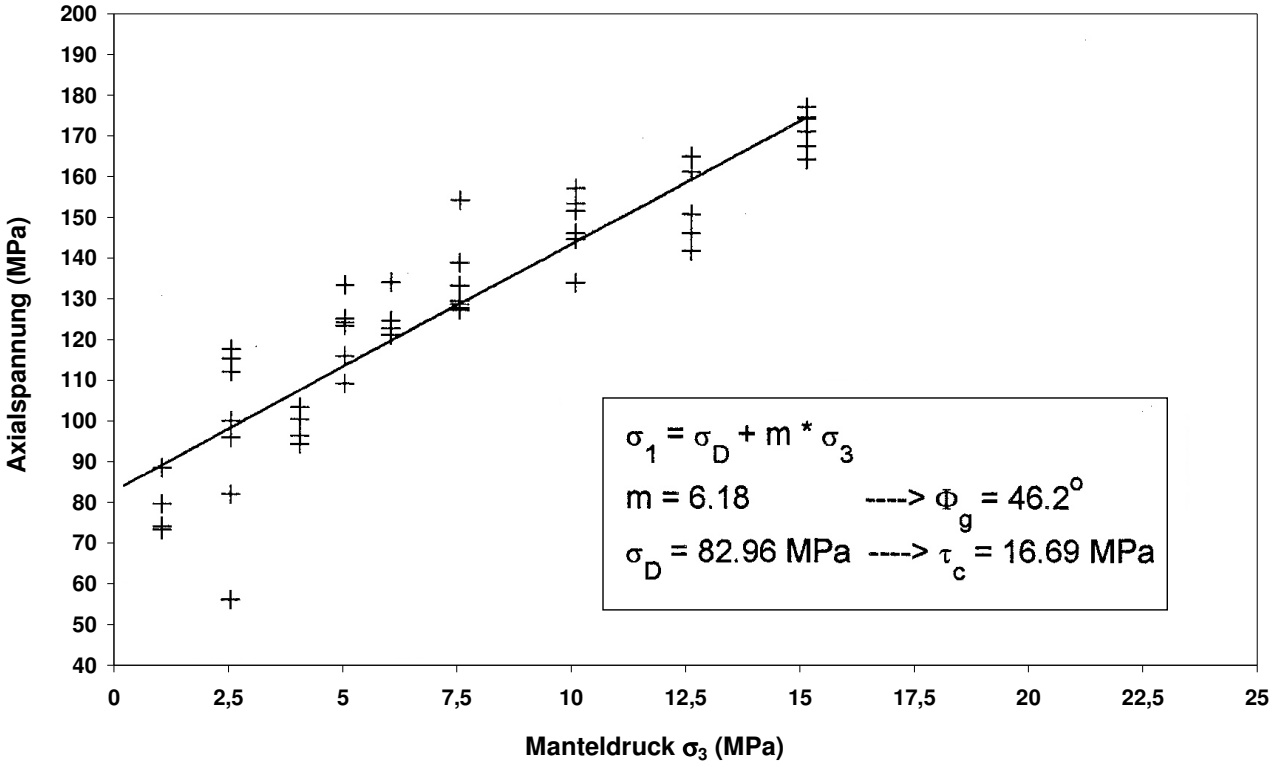


Abb. 5.2: Festigkeit A3 Pöthen in Abhängigkeit vom Manteldruck

In den Darstellungen sind für das Koordinatensystem $\sigma_1 - \sigma_3$ die Ausgleichgeraden

$$\sigma_1 = \sigma_D + m \cdot \sigma_3 \tag{5.1}$$

angegeben. Die Berechnung der Kohäsion und des Reibungswinkels in Tabelle 5.3 für die Festigkeitsgerade

$$\tau = \tau_c + \tan(\Phi_g) \cdot \sigma \tag{5.2}$$

des Koordinatensystems $\tau - \sigma$ wird vorgenommen mit den Beziehungen

$$\Phi_g = \arcsin\frac{m-1}{m+1} \quad \text{und} \tag{5.3}$$

$$\tau_c = \frac{\sigma_D}{(m+1)\cdot\cos(\arcsin(\frac{m-1}{m+1}))} \tag{5.4}$$

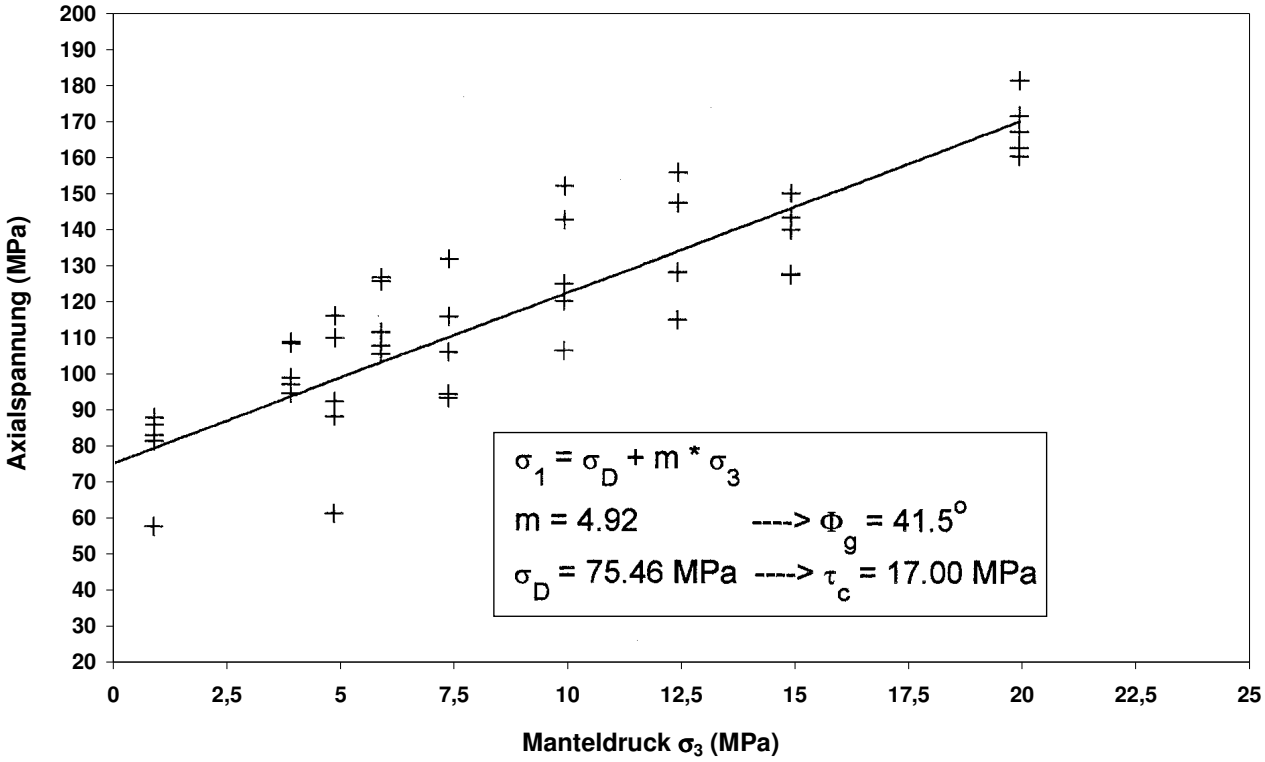


Abb. 5.3: Festigkeit A3 Bernburg in Abhängigkeit vom Manteldruck

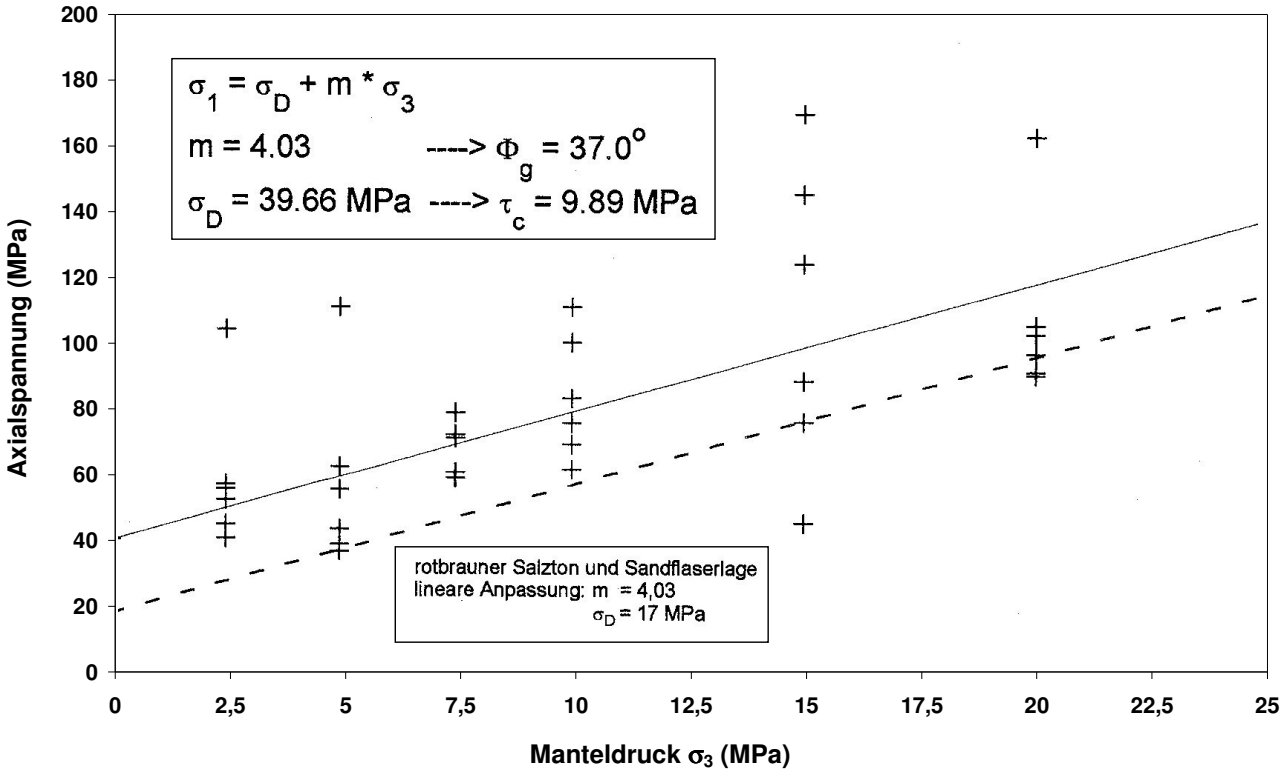


Abb. 5.4: Festigkeit T3 Pöthen in Abhängigkeit vom Manteldruck

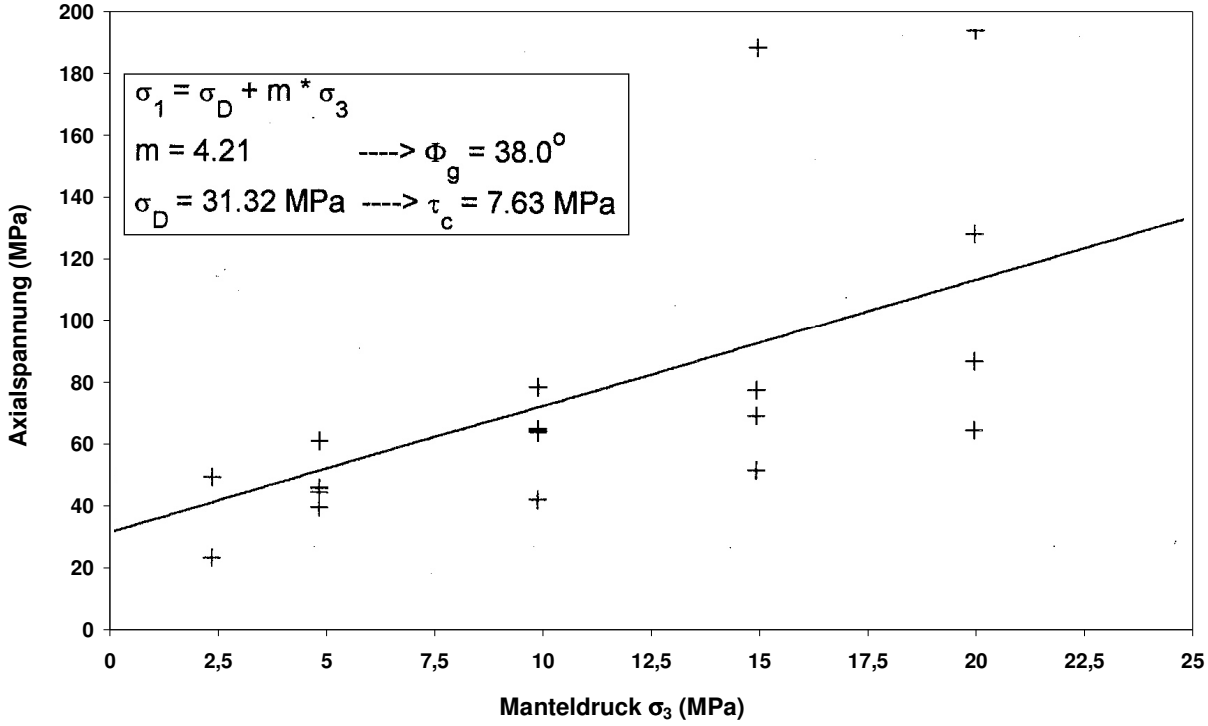


Abb. 5.5: Festigkeit T3 Bernburg in Abhängigkeit vom Manteldruck

In den Abbildungen 5.6 und 5.7 sind für den Anhydrit Pöthen und Bernburg die im Bruchpunkt erreichten Bruchdeformationen, wieder in Abhängigkeit vom Manteldruck, dargestellt. Auch diese Abhängigkeiten lassen sich mit folgenden linearen Ausgleichsgeraden beschreiben:

Anhydrit Pöthen $\varepsilon_{Br} = 0{,}19\ \% + 0{,}017\ \%/\text{MPa} \cdot \sigma_3$ (5.5)

und Anhydrit Bernburg $\varepsilon_{Br} = 0{,}17\ \% + 0{,}017\ \%/\text{MPa} \cdot \sigma_3$ (5.6)

Das Spannungs-Verformungsverhalten von Anhydrit ist durch eine nahezu elastische Verformung bis zum Bruch und einen sprödbruchartigen Übergang in den Nachbruchbereich gekennzeichnet.

Der Anhydrit Pöthen besitzt eine höhere triaxiale Festigkeit als der Anhydrit Bernburg. Die Festigkeiten des Salztons beider Probenahmeorte sind vergleichbar, bedürfen aber einer Differenzierung bezüglich der feinstratigraphischen Merkmale in einen magnesitisch-anhydritischen Bereich mit Festigkeiten vergleichbar zum Anhydrit und eine Zone des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage mit geringerer Festigkeit.

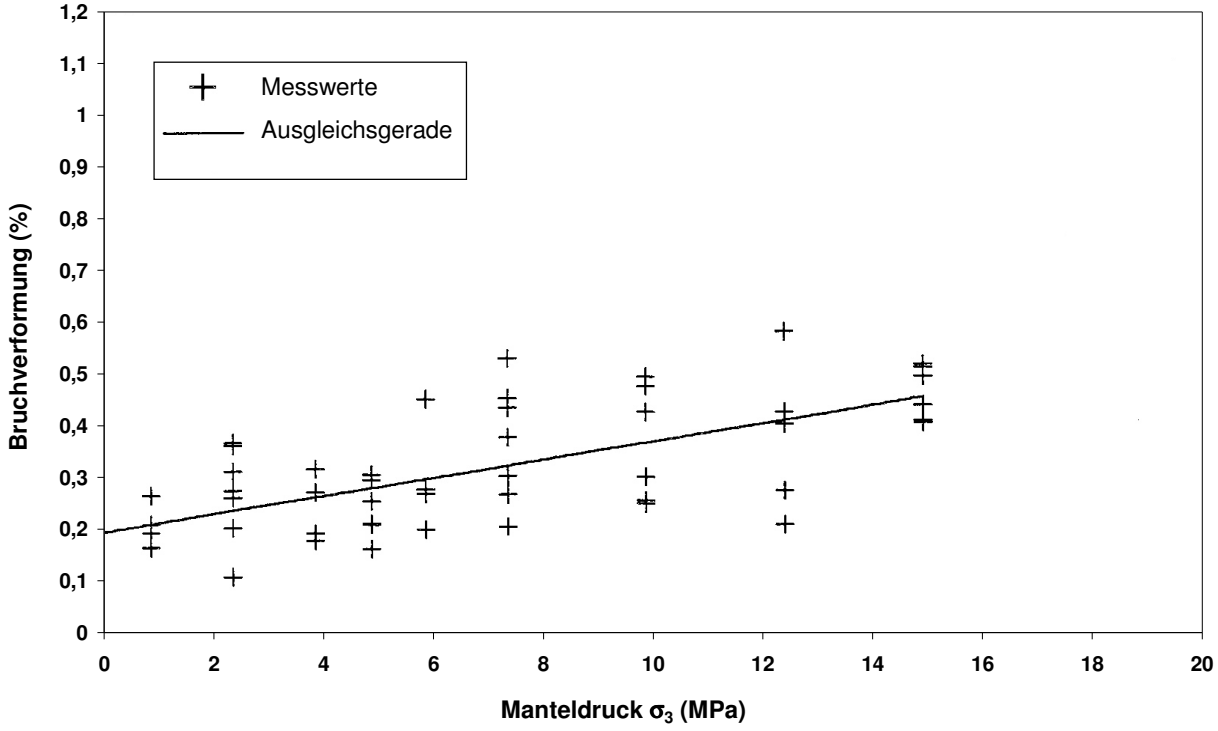


Abb. 5.6: Abhängigkeit der Bruchverformung A3 Pöthen vom Manteldruck

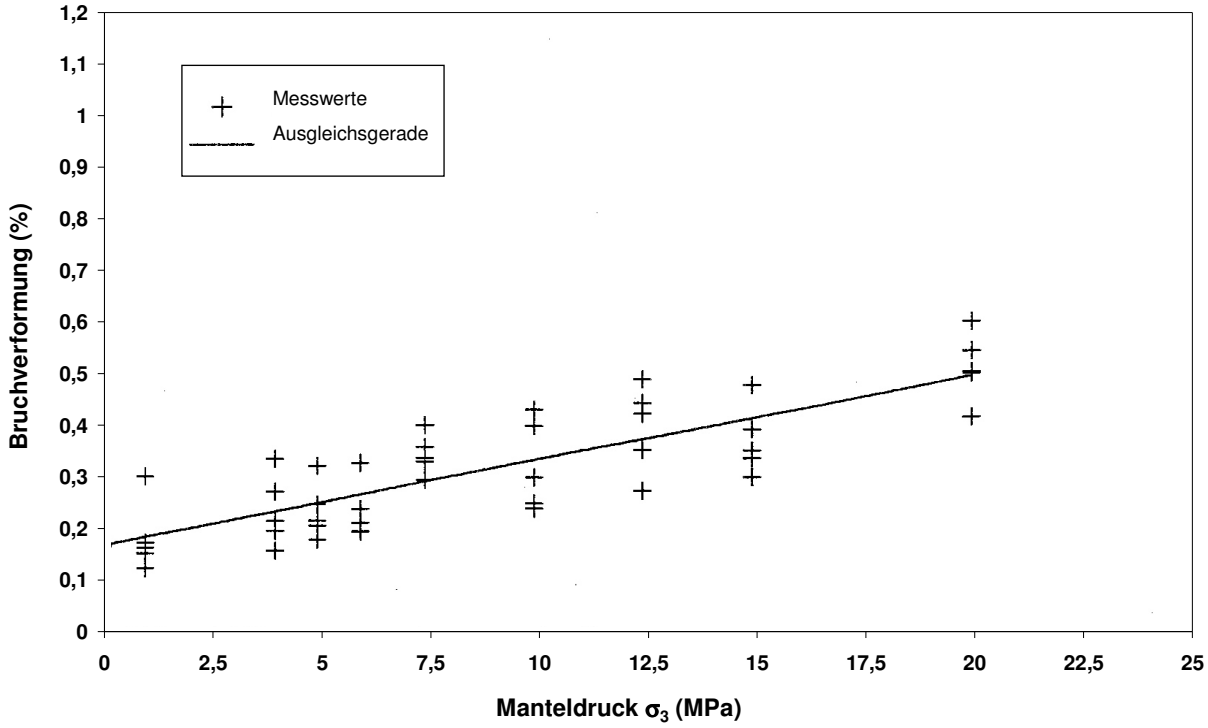


Abb. 5.7: Abhängigkeit der Bruchverformung A3 Bernburg vom Manteldruck

Da der Hauptanhydrit und Graue Salzton vielfach geklüftet sind, wurde in einem speziellen Laborprogramm das Augenmerk auf die Kluftfestigkeiten gerichtet. Das wurde notwendig, da in den oben beschriebenen Einzelversuchen nur in wenigen Fällen eine Aktivierung der

geologischen Klüfte als Bruchfläche zu beobachten war. Die Aktivierung war abhängig von der Lage der Kluft im Prüfkörper relativ zur Krafteinleitungsrichtung der Prüfmaschine. Ein steiles Einfallen oder offene Klüfte begünstigten das Versagen auf den Klüften. Die Verteilung der Einfallwinkel der Klüfte war bezogen auf die Längsachse der Zylinderproben unterschiedlich und die Kluftöffnungen lagen zwischen 0,05 und 0,1 mm.
Für die Ermittlung der Kluftfestigkeiten kamen triaxiale Mehrstufenversuche, beginnend in einem isotropen Spannungsniveau, zur Anwendung, bei denen das Einsetzen der Festigkeitsüberschreitung und die Nachbrucheigenschaften auf den Kluftflächen unter unterschiedlichen minimalen Druckeinspannungen untersucht werden können. Voraussetzung dafür sind eine deformationsgeregelte Fahrweise der Prüfmaschine und die präzise Kontrolle des Spannungsverlaufes (weitere einzuhaltende Versuchsbedingungen siehe ARBEITSKREIS 3.3 DER DGGT (2009)). Nach der Bestimmung dieser Kennwerte unter einem bestimmten Manteldruck wird der Prüfkörper auf den isotropen Ausgangszustand entlastet, ein neuer Startwert eingestellt und in Verformungsregelung mit einem neuen (niedrigeren) Manteldruck erneut belastet. Mit dieser Versuchsdurchführung bei einer Deformationsrate = $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ %/sec (Schlankheitsgrad = 2, Prüfkörperhöhe = 192 mm) war die Bestimmung der Festigkeitsgrenze und danach die Untersuchung der Restfestigkeiten auf den Bruchflächen möglich.
Zur Untersuchung erfolgte eine Auswahl natürlich geklüfteter Proben aus Pöthen und Bernburg mit deutlich ausgeprägten Trennflächen möglichst parallel zur Beanspruchungsrichtung. Bei den geklüfteten Salztonproben war eine ausgeprägte Verwachsung der Klüfte mit Steinsalz kennzeichnend und im Anhydrit existierten einzelne Klüfte oder Kluftsysteme, die sich als weiße Bänderung abbildeten.

Die Auswertung der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen im Vorbruchbereich (Einsetzen der Festigkeitsüberschreitung) erfolgte nach den für den einstufigen triaxialen Druckversuch angegebenen linearen Beziehungen 5.1 bis 5.4. Die Resultate sind in Tabelle 5.4 aufgeführt. Die Parameterbestimmung erfolgte für Anhydrit, magnesitischen und anhydritischen Salzton sowie für den Rotbraunen Salzton und die Sandflaserlage, gemittelt für die Proben aus beiden Bergwerken. Die Abweichungen der Ergebnisse ein- und mehrstufiger triaxialer Druckversuche (Vergleich mit Tabelle 5.3) sind dadurch verursacht, dass bei den Mehrstufenversuchen keine Messwerte für die uniaxiale Druckfestigkeit ermittelt wurden und deshalb die Ausgleichsgeraden für den Einspannungsbereich $\sigma_3 < 5$ MPa systematisch zu hoch liegen. Das führt zu einer Überschätzung der Druckfestigkeiten σ_D in Tabelle 5.4. Für eine Festigkeitsbewertung im niedrigen Einspannungsbereich sollten deshalb die Parameter der Einzelversuche und nicht die Resultate der Ausgleichsrechnungen verwendet werden.

Tabelle 5.4: In Mehrstufenversuchen ermittelte Maximalfestigkeiten (Pöthen und Bernburg gemittelt, Beginn der Festigkeitsüberschreitung)

	m	**σ_D (MPa)**	**Φ_g (Grad)**	**τ_c (MPa)**
Hauptanhydrit	4,2	113,1	38,0	27,6
Magnesitischer und anhydritischer Salzton	4,4	75,8	39,2	18,0
Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage	3,0	36,8	29,6	10,7

Bei der Beschreibung der Festigkeiten im Nachbruchbereich nach Überschreiten der Maximalfestigkeit und Ausbildung einer Bruchfläche wurde davon ausgegangen, dass dieses Nachbruchverhalten von den gebrochenen Kluftflächen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einspannungsverhältnissen bestimmt wird. Zur Beschreibung kommt, abweichend vom Verhalten im Vorbruchbereich, ein nichtlinearer Zusammenhang, bezogen auf den Manteldruck σ_3, zur Anwendung. Die Festigkeit der Schwächeflächen wird dabei wesentlich durch den Reibungswiderstand geprägt und dieser weitgehend von der Oberflächengeometrie beeinflusst. Die natürliche Rauigkeit der Trennflächen (Kluft oder Bruchfläche) begründet den Restreibungswiderstand, während Unebenheiten einen zusätzlichen Widerstand hervorrufen, der mit dem Aufgleitwinkel beschrieben wird. Die Restfestigkeit auf einer Scherbruchfläche τ_R in Abhängigkeit von der Normalspannung σ_n ist nach MINKLEY, W.; WÜSTE, U. (1979) durch den Restreibungswinkel Φ_R, den Aufgleitwinkel i und den Bruchwinkel α bestimmt.

$$\tau_R = \sigma_n \cdot \tan(\Phi_R + i) \tag{5.7}$$

mit dem experimentellen Befund

$$i = i_0 \cdot \exp(-k \frac{\sigma_n}{\sigma_D}) \tag{5.8}$$

und dem Bruchwinkel am Spannungskreis mit der Grenzgeraden

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\Phi_R + i) \tag{5.9}$$

Mit den Beziehungen des Spannungskreises

$$\sigma_3 = \sigma_n - \tau_R \cdot \tan(\alpha) \quad \text{und} \quad \sigma_1 = \sigma_n + \tau_R \cdot \cot(\alpha) \tag{5.10}$$

ist die Umrechnung der Festigkeitsbeziehung in das σ_1-σ_3-Koordinatensysten möglich. Die Festigkeitsparameter sind in Tabelle 5.5 aufgeführt.

Tabelle 5.5: In Mehrstufenversuchen ermittelte Rest- und Kluftfestigkeiten (Pöthen und Bernburg)

	i_0 (Grad)	**k**	**Φ_R (Grad)**	**σ_D (MPa)**
Hauptanhydrit	25	0,97	36	76,7
Magnesitischer und anhydritischer Salzton	24	0,46	30	52,4
Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage	29	0,55	25	24,3

Die Nichtlinearität tritt besonders im Bereich niedriger Manteldrücke und damit verbundener geringer Normal- und Tangentialspannungen auf, wobei die Aufgleitung einen bestimmenden Einfluss auf die Festigkeit hat. Mit zunehmender Einspannung geht dieser Einfluss zurück, da Unebenheiten der Schwächeflächen nicht durch Aufgleitung sondern durch Abscherung überwunden werden. Die Verschiebung auf der Bruchfläche oder geöffneten Kluft wird durch die Restreibung bestimmt.

Die Versuchsergebnisse bestätigen prinzipiell die nach den einstufigen Festigkeitsversuchen getroffene Aussage, dass anhydritischer und magnesitischer Salzton sowie Anhydrit einen Homogenbereich bilden, während der Rotbraune Salzton und die Sandflaserlage zu einem anderen Bereich gehören. In den graphischen Darstellungenin der Abbildungen 5.8 bis 5.10 sind die Maximalfestigkeiten den Rest- bzw. Kluftfestigkeiten gegenübergestellt.

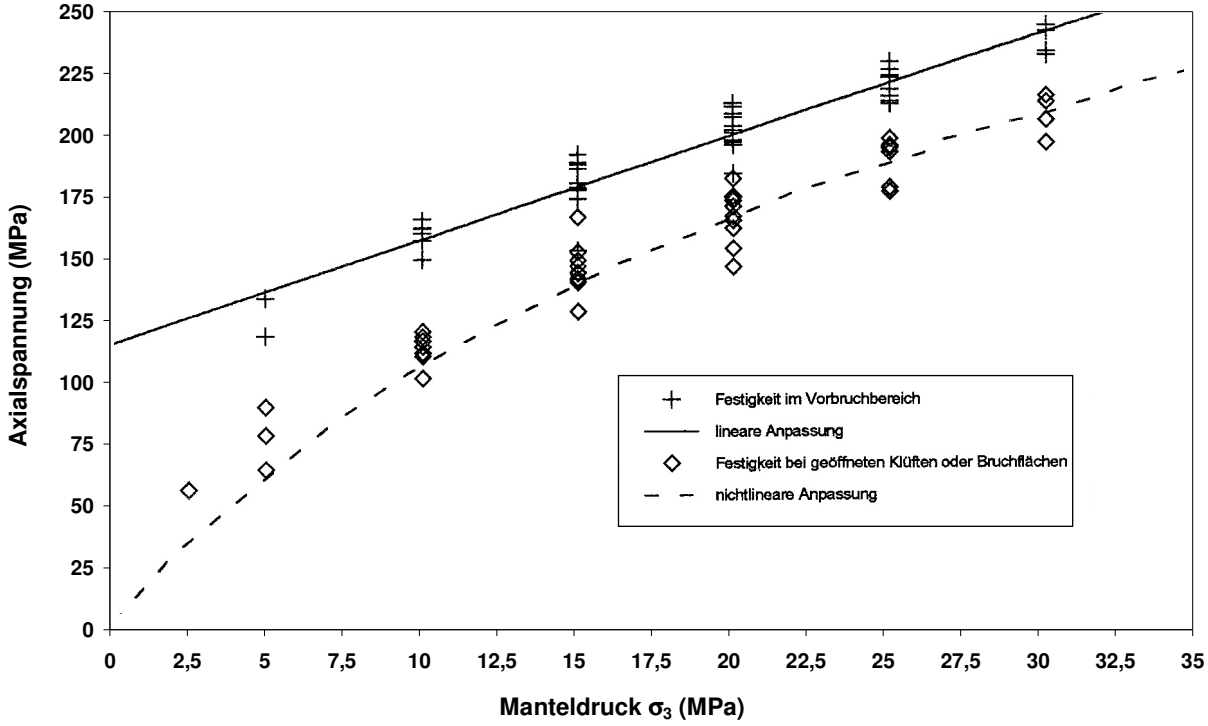


Abb. 5.8: Triaxiale Mehrstufenversuche am Anhydrit (Maximalfestigkeit und Kluftfestigkeiten)

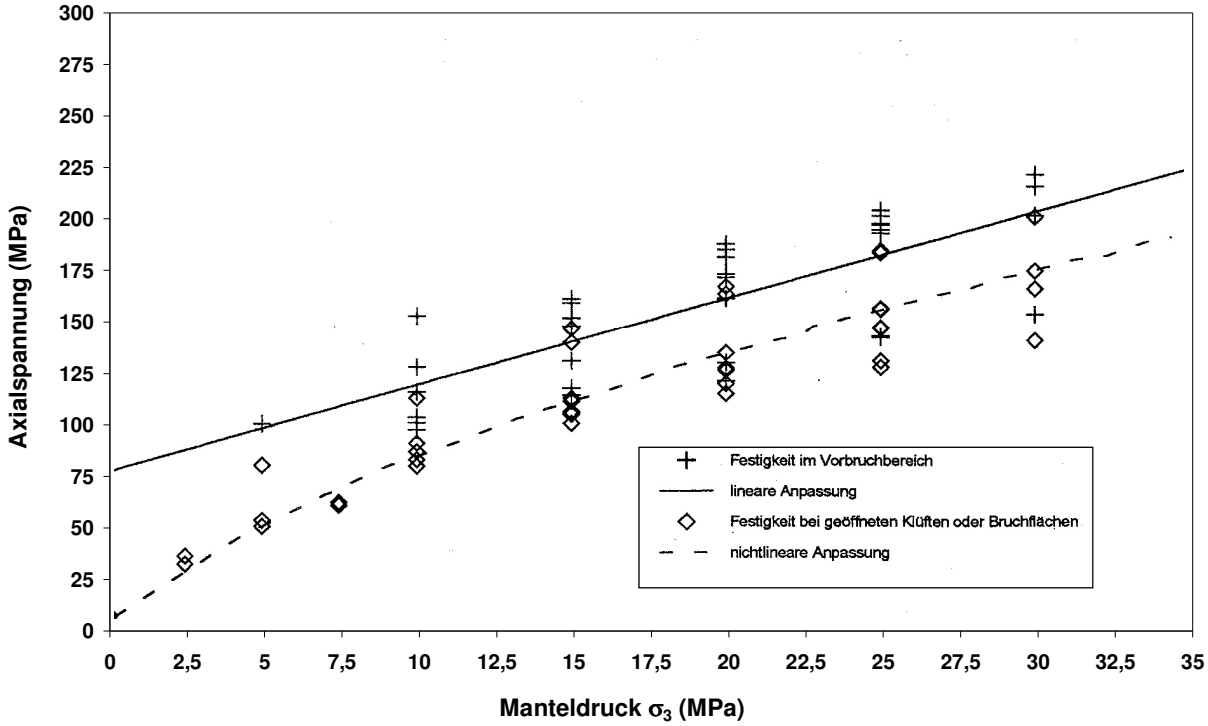


Abb. 5.9: Triaxiale Mehrstufenversuche an den anhydritischen und magnesitischen Zonen des Grauen Salztons (Maximalfestigkeit und Kluftfestigkeiten)

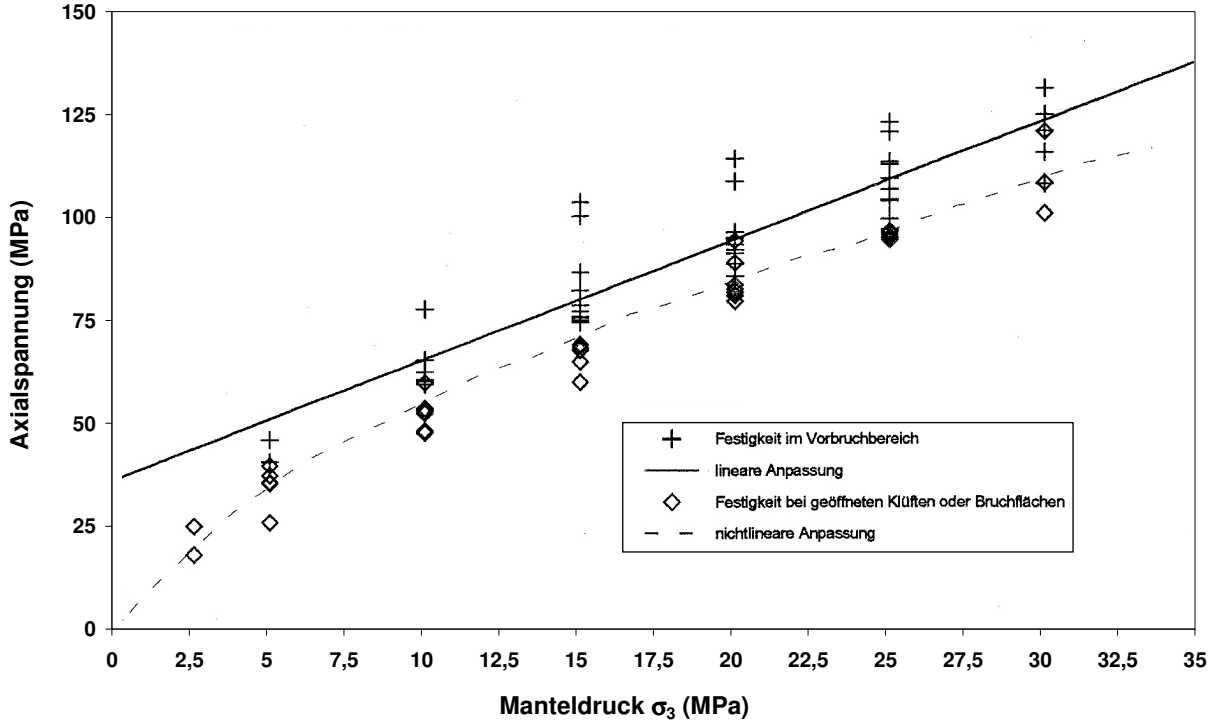


Abb. 5.10: Triaxiale Mehrstufenversuche an den Bereichen des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage (Maximalfestigkeit und Kluftfestigkeiten)

Kriech- und Relaxationsverhalten

Zum rheologischen Deformationsverhalten lassen sich aus den durchgeführten Festigkeits- bzw. Kriech- und Relaxationsversuchen (Schlankheitsgrad 2, Probenhöhe 80 bzw. 192 mm) folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Bei Anhydrit überwiegt das elastische Verhalten und inelastisches Verhalten tritt erst kurz unterhalb der Materialfestigkeit auf und ist mit Rissbildung bzw. Bruchflächenausbildung verbunden. Im unteren Spannungsbereich ($\sigma_1 \approx 0{,}5\ \sigma_D$) können Abweichungen vom linear elastischen Verhalten durch das Schließen von Mikrorissen auftreten.
- Die Bruchverformungen liegen zwischen ca. 0,1 bis ca. 0,5 % bei triaxialer Beanspruchung bis σ_3 = 15 MPa. Die Festigkeiten liegen meist weit über den bergbaurelevanten Beanspruchungen, so dass das rheologische Verhalten überwiegend als untergeordnet und vernachlässigbar angesehen werden kann.
- Bei Salzton (mit Ausnahme des quellfähigen Salztons) liegen die Bruchdeformationen abhängig vom Manteldruck meist zwischen 0,3 und 1,1 %. In wenigen Fällen liegen höhere Bruchdeformationen bzw. sogar ein ausgeprägtes plastisches Verhalten vor. Die zeitabhängigen Materialeigenschaften (Kriechen und Relaxation) sind stärker ausgeprägt als bei Anhydrit.

- Das Kriechverhalten von Anhydrit unter relativ hohen Differenzspannungen von 20 und 30 MPa bei bergbaurelevanten Minimalspannungen und Temperaturen von 295 und 343 K war im Wesentlichen als elastische Nachwirkung zu charakterisieren, die bereits nach Stunden oder wenigen Tagen (t < 5 d) abgeklungen ist. Die Verformungsraten lagen an der Nachweisgrenze der Versuchseinrichtung von 10^{-12} s^{-1}, so dass der gesicherte Nachweis von Kriecheigenschaften im Untersuchungszeitraum und bei den gegebenen Randbedingungen nicht möglich war. Dieses Ergebnis steht in Überstimmung mit den Relaxationsversuchen und mit der in den Festigkeitsuntersuchungen gewonnenen Erfahrung, dass plastische Verformungsanteile erst bei Spannungen beobachtet werden, die mindestens 80 % der späteren Bruchspannung erreicht haben.
  Für höhere Spannungen bzw. Temperaturen kann ein Kriechen nicht ausgeschlossen werden, jedoch stellt sich hier die Frage nach der bergbaulichen Relevanz.
- Für den Salzton lassen sich bezüglich des Kriechverhaltens der Bereich des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage von den anhydritischen und magnesitischen Zonen abgrenzen. Die Proben aus dem erstgenannten Bereich zeigen eine um den Faktor 3 - 5, bei geringen Belastungen sogar eine um den Faktor 10, höhere Kriechrate als aus dem zweitgenannten Bereich. Dieses Verhalten ist in Bezug auf die Festigkeit plausibel, da bei entsprechender Belastung der Proben jene aus dem Bereich des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage eine wesentlich höhere Auslastung der Bruchspannung erfahren. Soweit es der untersuchte Belastungsbereich ausweist, ist eine signifikante Spannungsabhängigkeit jedoch erst bei Spannungsdifferenzen > 25 MPa nachweisbar. Die Kriechraten liegen in der Größenordnung von 10^{-11} s^{-1} (0,3 ‰ pro a) bei einem Spannungsexponenten von 1.
  Die Prüfkörper des anhydritischen und magnesitischen Salztons zeigen ein dem Anhydrit ähnliches Verformungsverhalten ohne nachweisbares Kriechen.

<u>Permeabilitätsmessungen mit Stickstoff</u>

Die Zielstellung der Permeabilitätsmessungen bestand in der Untersuchung der Dichtheit von Salzton und Anhydrit in Abhängigkeit vom Spannungszustand und dem anstehenden Gasdruck. Die zylindrischen Prüfkörper (Schlankheitsgrad 2, Höhe 192 mm) aus kompaktem und geklüftetem Anhydrit und Salzton wurden in einem servohydraulischen Prüfsystem (Abbildung 5.11) einem vorgewählten Spannungszustand analog den In-situ-Bedingungen unterworfen. Als Druckmedium für die Durchströmung kam Stickstoff zur Anwendung.

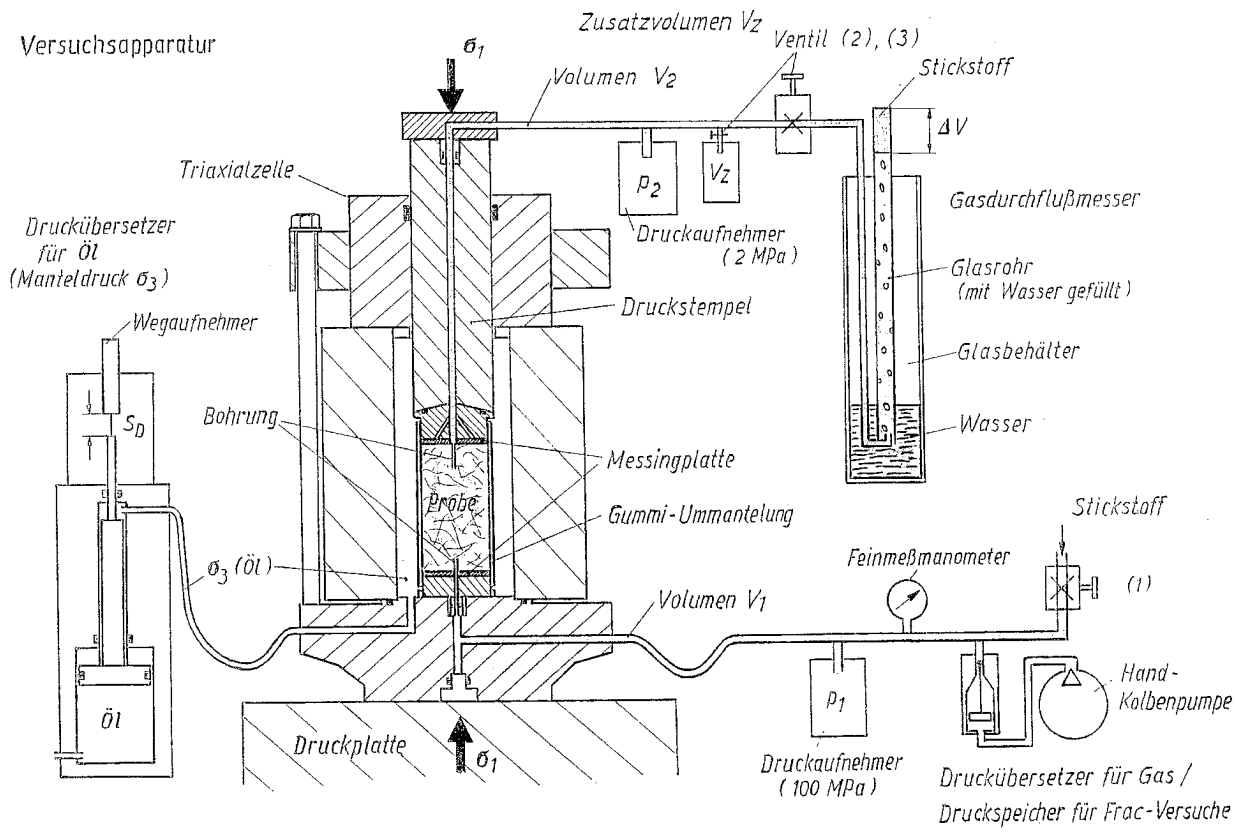


Abb. 5.11: Versuchsapparatur für Permeabilitätsmessungen mit Stickstoff

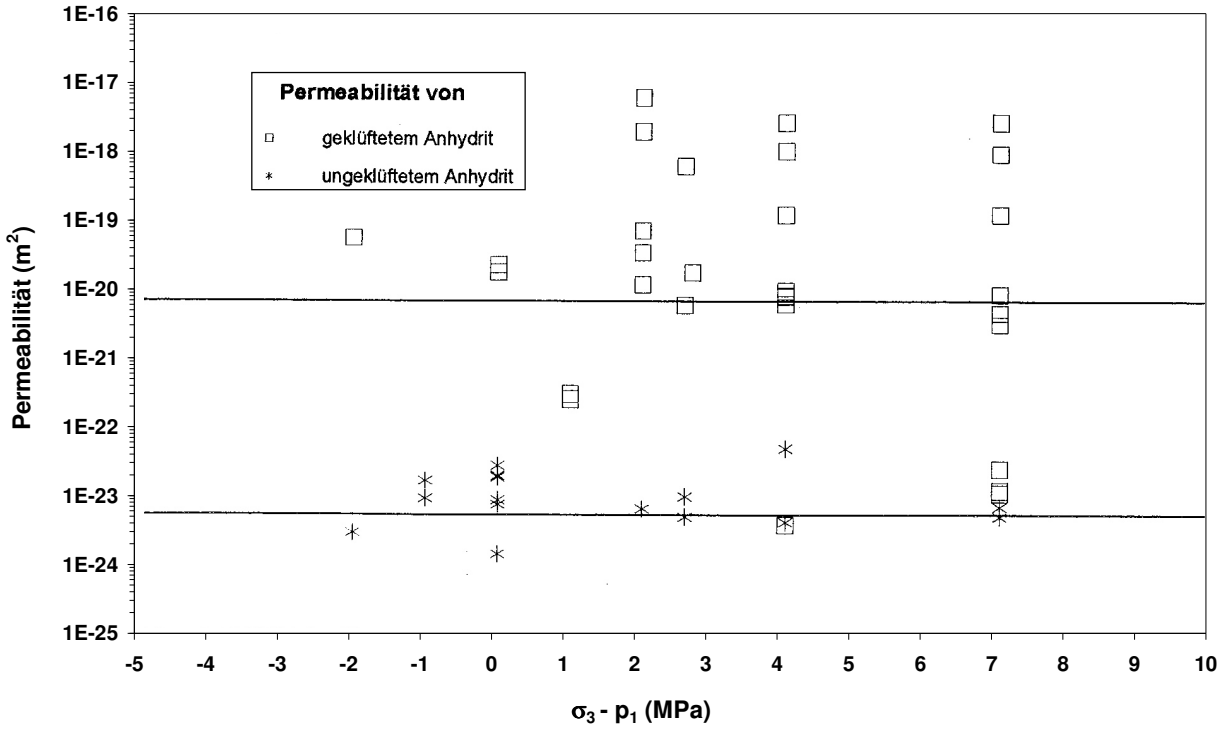


Abb. 5.12: Permeabilität von kompaktem und geklüftetem Anhydrit in Abhängigkeit von der Differenz der minimalen Druckeinspannung zum Gasdruck

Für die Permeabilitätsmessungen standen insgesamt 15 Proben aus dem Hauptanhydrit und dem Grauen Salzton der Grube Pöthen zur Verfügung. Die Resultate sind in den Abbildungen 5.12 und 5.13 dargestellt.

Die Permeabilität K von kompaktem Anhydrit liegt mit einem Mittelwert von $5 \cdot 10^{-24}$ m² nur geringfügig über der Nachweisgrenze der Apparatur von ca. $2 \cdot 10^{-24}$ m^2. Kompakter Anhydrit ist auch bei $\sigma_3 = p_1$ (σ_3 = minimale Druckeinspannung, p_1 = Gasdruck) als impermeabel einzuordnen. Eine Abhängigkeit der Permeabilität von der Druckdifferenz (σ_3 - p_1), wie sie bei Salzgesteinen (Steinsalz, Carnallitit, Hartsalz) beobachtet wird, tritt bei kompaktem Anhydrit nicht auf. Die Ursache dafür liegt in der hohen Festigkeit des Anhydrits, die für $\sigma_3 = p_1$ bzw. negative Differenzen σ_3 - p_1 bis -2 MPa eine Materialauflockerung verhindert.
Geklüfteter Anhydrit besitzt Permeabilitätswerte von < 10^{-23} m^2 bis 10^{-17} m^2 mit einem Mittelwert von $7 \cdot 10^{-21}$ m². Auch für geklüfteten Anhydrit konnte keine Druckabhängigkeit K von (σ_3 - p_1) nachgewiesen werden. Zur Überprüfung wurden Messungen an Prüfkörpern, die durch Hydrofrac erzeugte Risse enthielten, durchgeführt. Bei einem durchgängigen Riss und einem Spannungszustand von σ_1 = 20 MPa, σ_3 = 13 MPa erhöhte sich die Permeabilität geringfügig mit $K = 3 \cdot 10^{-19}$ m^2 bei p_1 = 1 MPa auf $K = 8 \cdot 10^{-19}$ m^2 für p_1 = 11 MPa.

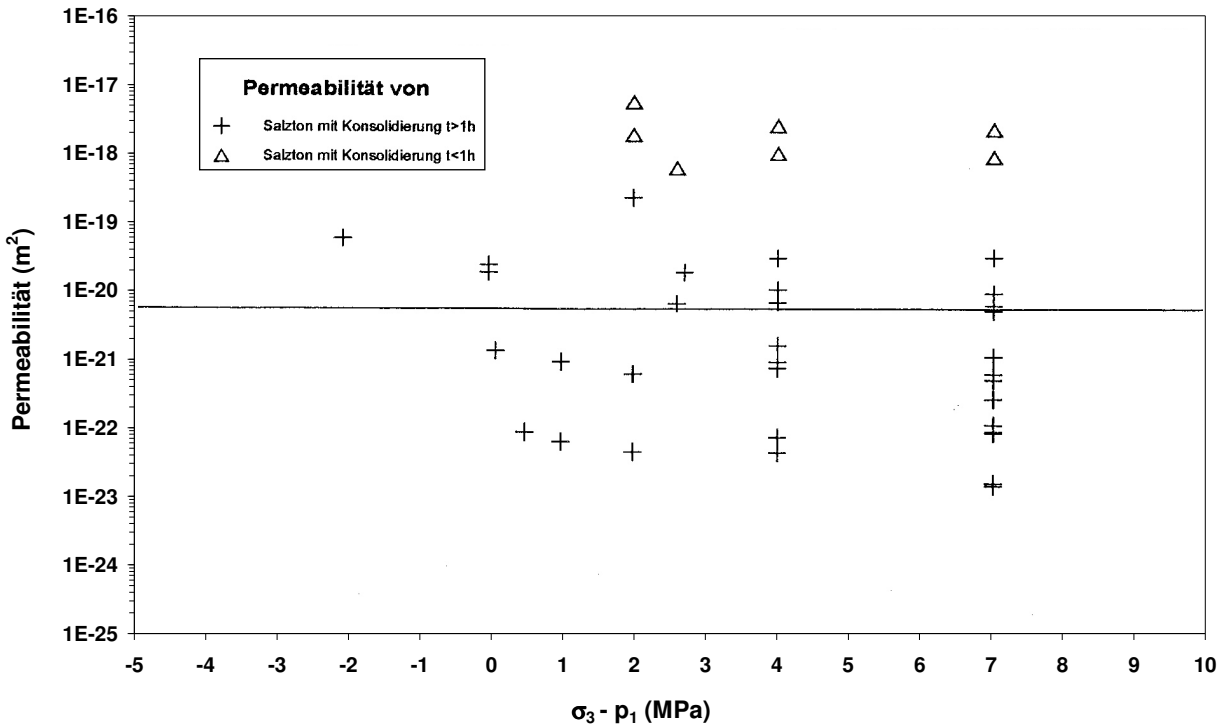


Abb. 5.13: Permeabilität von Salzton in Abhängigkeit von der Differenz der minimalen Druckeinspannung zum Gasdruck

Für geklüfteten Salzton wurden Permeabilitäten zwischen 10^{-23} m^2 und 10^{-17} m^2 ermittelt. In drei Fällen wurde die Druckabhängigkeit der Permeabilität durch eine Erhöhung des Manteldrucks σ_3 bei konstantem p_1 gemessen. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Zeitdauer als auch die Druckdifferenz $(\sigma_3 - p_1) = \Delta\sigma$ die Permeabilität beeinflussen können: Höhere (positive) Druckdifferenzen $\Delta\sigma$ und längere Einwirkungszeiten verringern die Permeabilität. Im Vergleich zu Steinsalz und Hartsalz ist diese Druckabhängigkeit der Permeabilität jedoch nur schwach ausgeprägt.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass kompakter Anhydrit als gasdicht einzustufen ist. Dies gilt für $\sigma_3 = p_1$ und damit erst recht für positive Druckdifferenzen. Geklüfteter Anhydrit und Salzton sind bei vergleichbaren Belastungsbedingungen als gasdurchlässig einzustufen, wenn durchgehende Klüfte offen und ausreichend durchtrennt sind. Die Permeabilitäten sind in der Größenordnung von 10^{-19} m^2 jedoch begrenzt.

5.2 Untersuchungen zur Hydrofrac-Rissbildung im Anhydrit, Salzton und Steinsalz sowie zur Kluftpermeabilität im Anhydrit

5.2.1 Anwendbarkeit der klassischen Interpretation von Spannungssondierungen mittels der Hydrofracmethode im Steinsalz

Aus den Ausführungen zur geologischen Ausbildung des zur Salinarabfolge gehörenden Hauptanhydrits und Grauen Salztons sowie zu den im Labor ermittelten gesteinsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften ergibt sich, dass für einen belastbaren Integritätsnachweis zuverlässig der Gebirgsspannungszustand im Anhydrit und den benachbarten Gebirgsschichten ermittelt werden muss. Nach einer Darstellung des Kenntnisstandes zum Hydrofracverhalten im Steinsalz liegt der Schwerpunkt im Folgenden bei der Bestimmung der hydraulischen Aufreißfestigkeiten sowie der geometrischen und hydraulischen Rissparameter als wesentliche Grundlagen für eine solche Bewertung.

Die klassischen Modellvorstellungen nach HAIMSON, B.C. (1974) und KEHLE, R.O. (1964) zur Interpretation der Hydrofracergebnisse basieren auf einem elastischen Stoffgesetz im homogenen und isotropen Gebirge und unterscheiden zwei Risslagen:

Axiale Risslage (Längsriss des Bohrlochs)

Das Bohrloch soll relativ zum Durchmesser sehr lang sein, so dass zur Berechnung des Spannungsfeldes die Annahme des ebenen Deformationszustandes gerechtfertigt ist. Eine der wirkenden Hauptspannungen (Primärspannung σ_3) soll in Bohrlochrichtung wirken. Das Gestein wird als impermeabel betrachtet.

Für die sekundären Spannungen σ_r und σ_ϕ am kreisförmigen Hohlraum gilt:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} (1 - \rho^2) - (1 - 4\rho^2 + 3\rho^4) \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\phi \tag{5.11}$$

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} (1 + \rho^2) + (1 + 3\rho^4) \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\phi \tag{5.12}$$

ϕ = Drehwinkel ab Abszisse entgegen Uhrzeigersinn

ρ = Quotient aus Bohrlochradius und radialem Abstand

σ_1, σ_2 = Hauptspannungen in der Ebene (σ_1 vertikal, σ_2 horizontal, $\sigma_2 < \sigma_1$)

Die Tangentialspannung an der Kontur beträgt:

$$\sigma_\phi = \sigma_1 + \sigma_2 + 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\phi \tag{5.13}$$

Es werden die Extremwerte von σ_ϕ gesucht:

$$\frac{d\sigma_\phi}{d\phi} = 4 \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\phi = 0 \tag{5.14}$$

$\Rightarrow$ Extremwerte bei 0, 90°, 180° und 270°

Es werden die Minima gesucht:

$$\frac{d^2\sigma_\phi}{d\phi^2} = 8 \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \cos 2\phi > 0 \tag{5.15}$$

$\Rightarrow$ Minima bei 90° und 270°

Bei 90° und 270° ergibt sich die Tangentialspannung zu $\sigma_\phi = 3\sigma_2 - \sigma_1$.

Wird weiterhin die Gesteinsfestigkeit σ_z in Wirkrichtung der Tangentialbeanspruchung berücksichtigt, muss der Innendruck im Bohrloch einen Aufreißdruck p_A erreichen von:

$$p_A = 3\ \sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_z \tag{5.16}$$

Es bildet sich ein Riss von der Kreiskontur in Richtung der größeren Primärspannung σ_1 aus. Die Bohrlochachse liegt in der Rissebene, senkrecht zur Rissebene wirkt die kleinere Primärspannung σ_2.

Normale Risslage (Querriss zum Bohrloch)

Diese Risslage ist denkbar, wenn die in Bohrlochrichtung wirkende Hauptnormalspannung σ_3 wesentlich kleiner als die beiden senkrecht zur Bohrlochachse wirkenden Hauptspannungen ist. Das ist zu erwarten, wenn von einem untertägigen Hohlraum aus ein Bohrloch gestoßen und in dem Gebirgsbereich gefract wird, der vom sekundären Spannungsfeld des Grubenbaus beeinflusst wird.

KEHLE, R.O. (1964) hat in seinen Untersuchungen festgestellt, dass der Aufreißdruck einen Betrag

$$p_A = \frac{\sigma_3 + \sigma_z}{0{,}94} \tag{5.17}$$

erreichen muss. Er leitet jedoch ab, dass ein normaler Riss nur bei steifen und unnachgiebigen Packern auftritt. Bei Gummipackern reißt das Bohrloch axial und der Riss soll dann in Richtung der beiden großen Hauptspannungen umschwenken, bis die kleinste Gebirgsspannung σ_3 zur Flächennormalen wird. In der Konsequenz wird von zwei Ruhedrücken unmittelbar nach dem Aufreißen der Kontur und nach einer Risserweiterung beim Umschwenken normal zur kleinsten Gebirgsspannung ausgegangen.

Nach den eigenen Erfahrungen des Autors ist im Packerbereich vorwiegend mit hohen Scherbeanspruchungen und einer unmittelbaren Rissausrichtung nach dem lokalen Spannungsfeld (und nicht nach dem Bohrloch) zu rechnen. Nach dem Überbohren von Sondierungslöchern wurden normale, axiale und auch schräge Risse gefunden.

Ausgewählte versuchstechnische Belege für Abweichungen vom elastischen Tangentialspannungsaufbau im Steinsalz

Von KIERSTEN, P. (1983) wurden Laborergebnisse zum Hydrofracverhalten von Salzgestein veröffentlicht. Er untersuchte anhand zylindrischer Probekörper die Abhängigkeit des

Aufreißdruckes p_A vom wirkenden rotationssymmetrischen Spannungszustand, von der Druckrate, der Viskosität der Fracflüssigkeit und von der Dauer der Lasteinwirkung auf den Probekörper. Die Steinsalzhohlzylinder hatten einen Durchmesser von ca. 195 mm und eine Höhe von 220 bzw. 290 mm. Der Durchmesser der Innenbohrung in der Symmetrieachse betrug 40 mm. Es wurden Belastungszustände gewählt, bei denen der Manteldruck kleiner (1/3 und 1/2) bis gleich der Axialspannung war. Zum Rissnachweis wurden der Innendruck in der Bohrung, die akustischen Emissionen im Probekörper und der Verpresskolbenweg der Frac-Apparatur erfasst. Die Registrierung der SE-Signale während der Druckbeaufschlagung war notwendig, da schon vor dem Einsetzen einer Rissausbreitung ein Eindringen des Fluids entlang der Salzkristalle, verbunden mit Schallemissionen, beobachtet wurde.

Die Abhängigkeit zwischen dem Aufreißdruck p_A und den rotationssymmetrischen Spannungsrandbedingungen an der Mantelfläche des Prüfzylinders wurde in drei Versuchsreihen ermittelt. Es bildeten sich ausschließlich axiale Risse aus. Das war auch der Fall bei Existenz einer Störungszone quer zum Bohrloch bzw. schon vorhandenen Querrissen. Obwohl also eine "Sollbruchstelle" existierte, stellte sich der Riss entsprechend der äußeren Lastbedingungen in Richtung der großen Hauptspannung ein.

Folgende Resultate liegen vor (σ_3 = Axialspannung und $\sigma_1 = \sigma_2 = p$ = Manteldruck):

p_A als Fkt. der Axialspannung	Randbedingung	p_A als Fkt. des Manteldrucks
$p_A = 1{,}03\ \sigma_3 + 2{,}4$	$\sigma_3 = p$	$p_A = 1{,}03\ p + 2{,}4$
$p_A = 0{,}55\ \sigma_3 + 2{,}7$	$\sigma_3 = 2\,p$	$p_A = 1{,}10\ p + 2{,}7$
$p_A = 0{,}34\ \sigma_3 + 2{,}6$	$\sigma_3 = 3\,p$	$p_A = 1{,}02\ p + 2{,}6$

Die axiale Risslage war entsprechend der klassischen Modellvorstellungen zu erwarten, die Beträge der Aufreißfestigkeit weichen jedoch von der klassischen Theorie ab. Entsprechend der elastischen Beziehungen für eine axiale Rissbildung müsste die Aufreißfestigkeit unter den Randbedingungen $\sigma_1 = \sigma_2 = p$ einen Betrag von $p_A = 2\,p + \sigma_z$ erreichen. Im Steinsalz kommt es aber an der Bohrlochkontur zu einer Tangentialspannungsrelaxation auf etwa die Hälfte des elastischen Betrages.

Bezüglich der Rate bei der Innendruckbeaufschlagung im Bohrloch wurde ein Einfluss auf die Größe der Aufreißfestigkeit ab etwa 20 MPa/h gefunden. Danach kommt es zu einer signifikanten Steigerung der Aufreißfestigkeit. Andere Autoren geben als Grenzwert etwa 36 MPa/h bzw. 4 MPa/h an.

Die Abhängigkeit des Aufreißdruckes von der Viskosität des Fracmediums wurde für Spannungszustände $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = p$ untersucht. Es zeigte sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Differenz p_A - p und dem Logarithmus der kinematischen Viskosität. Die Aufreißspannung p_A steigt mit der Zähigkeit des Fracmediums. Ein zähes Fracmedium kann nicht so leicht in die Kornzwischenräume eindringen und deshalb erfolgt der Frac bei einem höheren Innendruck als bei Verwendung eines weniger viskosen Mediums bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen. Zur repräsentativen Versuchsdurchführung sollte ein Fluid mit vergleichbarer Viskosität zum in situ tatsächlich angreifenden Medium verwendet werden.
Als weitere zeitabhängige Beeinflussung zeigte sich eine Erhöhung der Aufreißfestigkeit mit steigender Belastungszeit der durchbohrten Proben vor dem Hydrofracversuch. Dies deutet darauf hin, dass eine Bohrlochkonvergenz infolge Kriechen, wie sie experimentell nachgewiesen ist, zu einem Spannungsabbau an der unmittelbaren Kontur und zu einer Belastungsumverteilung in tiefere Konturbereiche führt. Abgesehen von einer entlasteten relaxierten Konturzone, in die das Fracmedium schon vor dem eigentlichen Riss dringt, können tiefere Bereiche dadurch höher belastet sein und erst bei höheren Innendrücken aufreißen. Als praktische Konsequenz aus diesen Beobachtungen für die Hydrofracmessungen in situ ergibt sich eine notwendige Berücksichtigung der Standzeit der Bohrung bis zum Aufreißversuch. Eine lange Standzeit wird umso kritischer, je höher die Belastungen am Messort sind. Einer derartigen Beeinflussung des Aufreißdruckes unter dem Gesichtspunkt der Vergleichbarkeit der Ergebnisse kann nur mit einer möglichst kurzen Zeitspanne zwischen Bohren und Fracversuch begegnet werden.
Infolge der Steigerung der Viskosität der Fracflüssigkeit und der Bohrlochstandzeit wurden zwar Erhöhungen der Aufreißdrücke bis zur Größenordnung der Beträge bei innen an der Bohrlochkontur mit Gießharz versiegelten Proben erzielt, trotzdem waren aber die zur Erzeugung eines Risses notwendigen Innendrücke geringer als bei Voraussetzung elastischen Materialverhaltens.

Die von SCHLÜTER, K. (1986) veröffentlichten Ergebnisse bauten auf den Untersuchungen von Kiersten auf. Neben den zylindrischen wurden auch würfelförmige Proben untersucht. Schlüter ersetzte die elastische Beziehung für axiale Risse unter rotationssymmetrischer Spannung $p_A = 2 \cdot p + \sigma_z$ für Salz durch die Beziehung $p_A = f \cdot p + \sigma_z$ und fand für würfelförmige Proben bei gleich großen Seitendrücken $\sigma_1 = \sigma_2 = p$ Faktoren von f = 1,27.
Bei einer Erhöhung der Horizontalspannungen $\sigma_1 = \sigma_2$ normal zum Bohrloch gleichzeitig mit dem Innendruck kam es in der Relaxationsphase nur zu einem unbedeutenden Abbau der Tangentialspannung. Dies äußerte sich in wesentlich höheren Rissdrücken im Vergleich zu Proben, bei denen mit gleichen äußeren Spannungen ohne Innendruck ein zeitlicher Tangentialspannungsabbau an der Kontur und erst danach die Innendruckbeaufschlagung

erfolgte. Damit wird bestätigt, dass Relaxationen bei hohen Spannungsdifferenzen intensiver ablaufen.
Eine Erhöhung der Temperatur der Probe bis 60° C beeinflusste nicht vorrangig die Gesteinsfestigkeit, sondern die Viskosität des Fracmediums. Eine erhöhte Temperatur verringert die Zähigkeit des Mediums und auf Grund der schon diskutierten Abhängigkeit treten geringere Rissdrücke ein.
Weitere Untersuchungen zur Dauerstandfestigkeit der unter Außen- und Innendruck stehenden zylindrischen Proben sollten eine Aussage bezüglich eines Grenzwertes der Druckdifferenz p_i - p (p = Manteldruck, p_i = Innendruck) liefern. Die Drücke wurden bis zu 33 Stunden aufrechterhalten. Es zeigte sich, dass ab etwa p_i - p > 1 MPa das Fracmedium in das Salz eindringt und entlang der Korngrenzen migriert. Eine solche Permeationszone erstreckt sich bis zur Außenwand der Probe, ohne dass ein offener spaltartiger Riss erzeugt wird. Von Schlüter wird die Schlussfolgerung gezogen, dass in Konturbereichen um Steinsalzhohlräume bis zu Differenzdrücken p_i - p von etwa 2,1 MPa bis 2,9 MPa keine Rissbildung eintritt. Andere Autoren fordern hier jedoch eine Begrenzung des maximalen Innendruckes bis zur minimalen Hauptspannung mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren. Die Zugfestigkeit des Gesteins bildet dabei eine (wenn auch geringe) Sicherheitsreserve.

Von BOYCE, G.M. u.a. (1984) wurde folgende detaillierte Begründung für die Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Rissortung gegeben:
Die Fracrisse im Salz bildeten sich nicht, wie es von sprödem Material bekannt ist, als einzelne und abgegrenzte Risse aus. Sie ordneten sich an den Korngrenzen an und bildeten diffuse Zonen von 1 - 2 cm Breite. Obwohl im Hydrauliköl ein Farbstoff enthalten war, konnten die feinen Risse nur sehr schwer erkannt werden. Es war jedoch möglich, die beeinflusste Zone mit einer SE-Aufzeichnung während des Aufreißens zu lokalisieren. Sie bildete sich wieder quer zur kleinen Horizontalspannung aus. Die Risszone stellt nach diesen Untersuchungen auch bei hoher Innendruckrate kein Gebiet mit einer deutlichen Durchtrennung der Struktur, sondern lediglich eine Zone mit erhöhter Flüssigkeitsmigration dar. Aus diesem Grund raten die Autoren von der Verwendung von Abdruckpackern und Bohrlochfernsehen zur Ermittlung der Risslage ab und schlagen die akustischen Methoden als einzig Erfolg versprechende Möglichkeit vor.
Die seismische Aktivität erreichte ihr Maximum, bevor der Innendruck im Bohrloch deutlich abfiel. Das deutet darauf hin, dass mit der Schallemissionsmessung eine Gefügeaufweitung angezeigt wird, bevor das Fracmedium an der Probenaußenseite austritt. Bei einer Wiederholung der Druckbeaufschlagung in der gleichen Probe waren wieder deutliche SE-Signale feststellbar. Offenbar sind nach dem Frac immer noch zahlreiche Materialbrücken vorhanden.

Die SE-Signale treten alternierend in zeitlich relativ kleinen Abständen auf. Das zeigt, dass der Hydrofrac kein kontinuierlich bis zum Riss verlaufender Vorgang, sondern eine Serie von Ereignissen in einer größeren Beeinflussungszone darstellt, welche zusammengenommen den "Hydrofrac" ausmachen.
Die SE-Ereignisse und Mikrorisse können an einer Bohrlochseite stärker ausgebildet sein als an der gegenüberliegenden Seite. Theoretisch, ohne einen Gefügeeinfluss, müsste sich der Riss symmetrisch ausbilden.
Alle Ereignisse konnten mit ausreichender Qualität bezüglich ihrer Ursache mit einem Zugbruch erklärt werden. Ohne Zweifel treten beim Hydrofrac aber auch Scherrisse auf, wie sich in neueren Untersuchungen (MANTHEI, G. (2005)) gezeigt hat.

Konzeption für Würfelfracversuche

In Auswertung der Literaturrecherche wurden folgende Untersuchungsschwerpunkte für ein Laborprogramm an Gesteinswürfeln festgelegt:

- Bewertung anisotroper dreidimensionaler Spannungszustände hinsichtlich ihres Einflusses auf den Aufreißdruck,
- Feststellung der Risslage und des Rissverhaltens in Abhängigkeit vom Spannungszustand,
- Ableitung eines optimalen Versuchsregimes für die In-situ-Versuche,
- Prüfung von unterschiedlichen Gesteinen (Steinsalz, Carnallitit, Sylvinit, Anhydrit und Salzton) und
- Feststellung der Rissöffnung und -durchlässigkeit im Anhydrit.

Auf weitere, in der Literatur z.T. sehr umfangreich diskutierte, Modellvorstellungen zur Erklärung gegenüber der Elastizitätstheorie verminderter Aufreißdrücke beim Hydrofrac, wie poroelastische Parameter, Entlastungskoeffizienten, Spannungsintensitätsfaktoren oder die Kerbtheorie, wird kein Bezug genommen. Mit diesen Modellen wird eine phänomenologisch vergleichbare Reaktion beschrieben, deren Parametrisierung jedoch noch schwieriger erscheint, als nachfolgend dokumentiert.

5.2.2 Fracversuche und Permeabilitätsmessungen an Gesteinswürfeln

5.2.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Um allgemeine Belastungsfälle, die auf Grund der Spannungsgeometrie Risse parallel und quer zum Bohrloch erwarten lassen, gezielt untersuchen zu können, wurden Würfelfracversuche mit einem echten Triaxialgerät in Verbindung mit einer 5-MN-Prüfmaschine durchgeführt. Als Prüfkörper kamen Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm aus Steinsalz, Sylvinit, Carnallitit, Hauptanhydrit und Grauem Salzton zum Einsatz. Die Salzgesteine stammten aus dem Werra-Kalirevier und aus dem Steinsalzwerk Bernburg und wurden aus Vergleichsgründen zum Hydrofracverhalten des Steinsalzes in das Untersuchungsprogramm einbezogen. Der Hauptanhydrit und Graue Salzton konnten im Werk Bernburg gewonnen werden. Das Probematerial wurde in Form ausgebohrter Blöcke und Bohrkerne an das IfG geliefert und mittels Schneiden und Abdrehen erfolgte die Herstellung von Gesteinswürfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm.
In die Würfel wurde in eine Innenbohrung mit einem Durchmesser von 16 mm eine Minifracsonde eingesetzt. Die Abdichtung des mittleren Druckbeaufschlagungsintervalls mit einer Länge von etwa 40 mm erfolgte mittels Packern aus einem Zweikomponentenklebstoff. Diese besaßen Längen von jeweils 30 mm. Der Innendruck wurde hydraulisch mit einer Hochdrucklaborpumpe erzeugt. Als Fracmedium kam ein dünnflüssiges Spindelöl mit einer Viskosität vergleichbar zu einer hochkonzentrierten Salzlösung (dynamische Viskosität etwa 7 mPa·s) zur Anwendung.

Bei den erwarteten geringen Gesteinspermeabilitäten war es notwendig, eine Pumpe mit Volumensteuerung für sehr kleine Raten von wenigen ml/h, andererseits jedoch gleichzeitig für hohe Drücke zum Aufreißen des Gesteins zu verwenden. Erst nach umfangreichen Marktrecherchen gelang es, von der Firma Lewa eine Hochdrucklaborpumpe für Raten von minimal 0,1 ml/h bei maximalen Drücken bis 500 bar zu erwerben. Diese Präzisionsdosierpumpe wird über einen Schrittmotor angetrieben und über ein frontseitiges Bedienfeld ist eine rechnergestützte Menüsteuerung unterschiedlicher Profilprogramme für konstante und variable Injektionsraten möglich. Die Innendruckaufzeichnung erfolgte mittels einer tragbaren Datenerfassungsanlage, die auch bei den untertägigen Spannungssondierungen zum Einsatz kam.

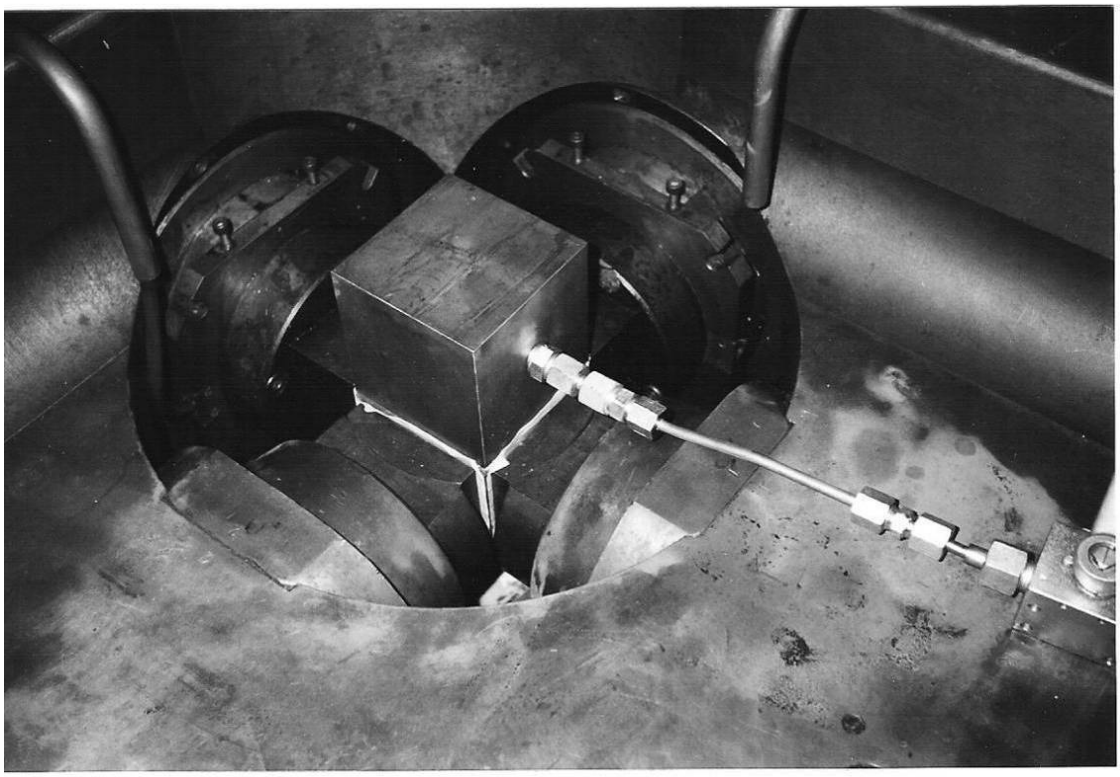


Abb. 5.14: Im Seitendruckaggregat eingesetzter Gesteinswürfel mit aufgesetztem Stahlwürfel zur Innendruckerzeugung

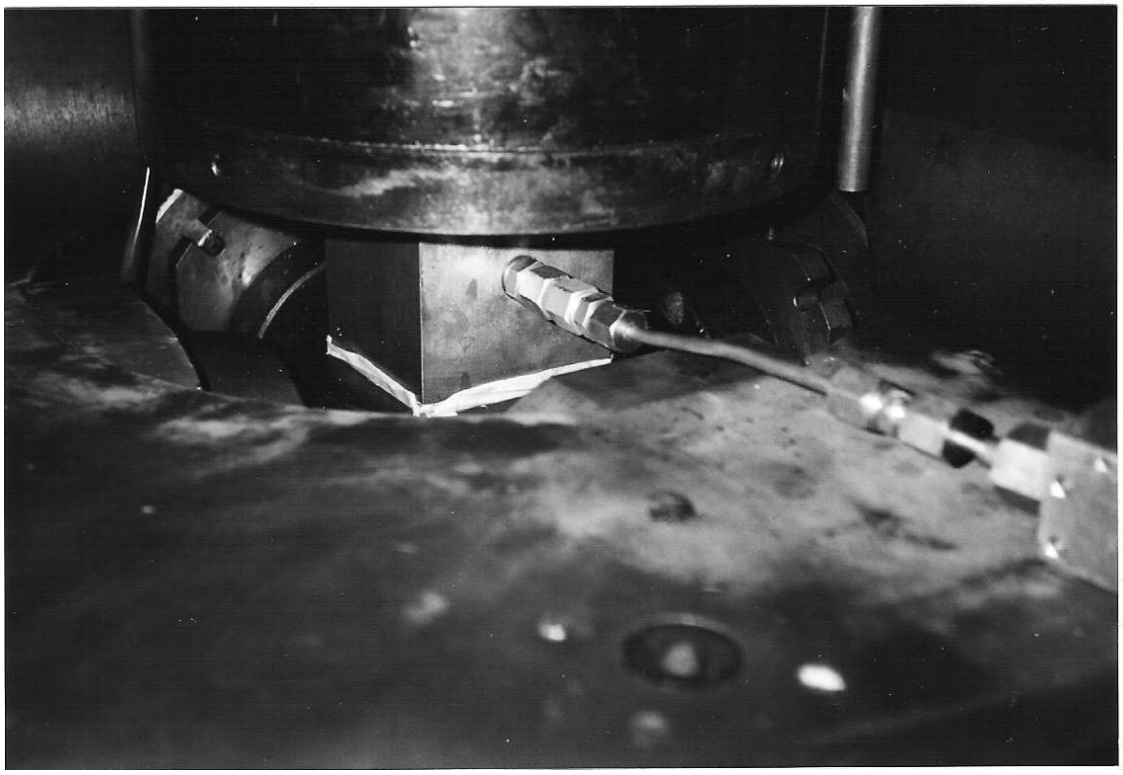


Abb. 5.15: Kompletter Einbauzustand des Gesteinswürfels im Seitendruckaggregat mit herangefahrenem Prüfmaschinenstempel

In den Abbildungen 5.14 und 5.15 ist der im Seitendruckaggregat eingesetzte Gesteinswürfel mit dem aufgesetzten Stahlwürfel zur Innendruckeinleitung bzw. der aufgesetzte Druckstempel zur Einleitung der Vertikalspannung zu erkennen. Die beiden Horizontalspannungen wurden über das Seitendruckaggregat erzeugt. Zur Verminderung der Reibung zwischen Gesteinswürfel und Stahl (es sollen nur Normalspannungen und keine Scherspannungen eingetragen werden) waren Teflonfolien eingelegt. Die Innendruckübertragung von der Pumpe wurde über eine Hydraulikleitung aus Stahl realisiert. Die Abdichtung der Minifracsonde gegen den Stahlwürfel erfolgte über einen Rundring in der eingefrästen Sonde. Vor jedem Versuch war eine Entlüftung der Druckleitung und des Fracraumes im Würfel notwendig.

Die Randspannungen an den Würfeln wurden so festgelegt, dass parallel zur Vertikalbohrung die Hauptspannung σ_3 und normal die Spannungen σ_1 und σ_2 wirkten. Wie in KIERSTEN, P. (1983) beschrieben, wurden auch bei diesem Versuchsregime Setzungszeiten nach der Aufgabe der Außenlasten von etwa 1 Stunde abgewartet.

Folgendes Versuchsregime wurde realisiert:

- Einsetzen des Prüfwürfels in das Triaxialgerät,
- Anschluss der Minifracsonde über den Stahlwürfel an die Laborpumpe,
- Realisierung der Randlasten mit einer Belastungsgeschwindigkeit von etwa 60 MPa/h mit Beträgen, die den untertägigen Belastungen entsprechen,
- Setzungszeit von etwa 60 Minuten,
- Dichtheitsnachweis für das druckbeaufschlagte Fracintervall mit einer geringen Injektionsrate ≤ 2 ml/h,
- Frac und ggf. Refrac mit konstanter Injektionsrate (die Einstellung eines Ruhedruckes im Gleichgewichtszustand zur Minimalspannung wurde auf Grund des begrenzten Prüfkörpervolumens nicht erwartet und war deshalb kein Untersuchungsgegenstand) und
- Untersuchung der Abströmwiderstände im Rissgebiet.

5.2.2.2 Ergebnisse der Würfelfracversuche

<u>Steinsalz</u>

Die meisten Versuche wurden am Steinsalz durchgeführt und dabei die unterschiedlichsten Spannungsgeometrien vorgegeben. In Abbildung 5.16 ist ein typischer Versuchsablauf im Steinsalz mit Dichtheitsnachweis, Frac und Refrac und in Abbildung 5.17 die ermittelte Risslage quer zum Bohrloch dargestellt. Die Vertikalspannung σ_3 ist die kleinste Hauptnormalspannung und demzufolge war ein horizontaler Querriss zu erwarten.

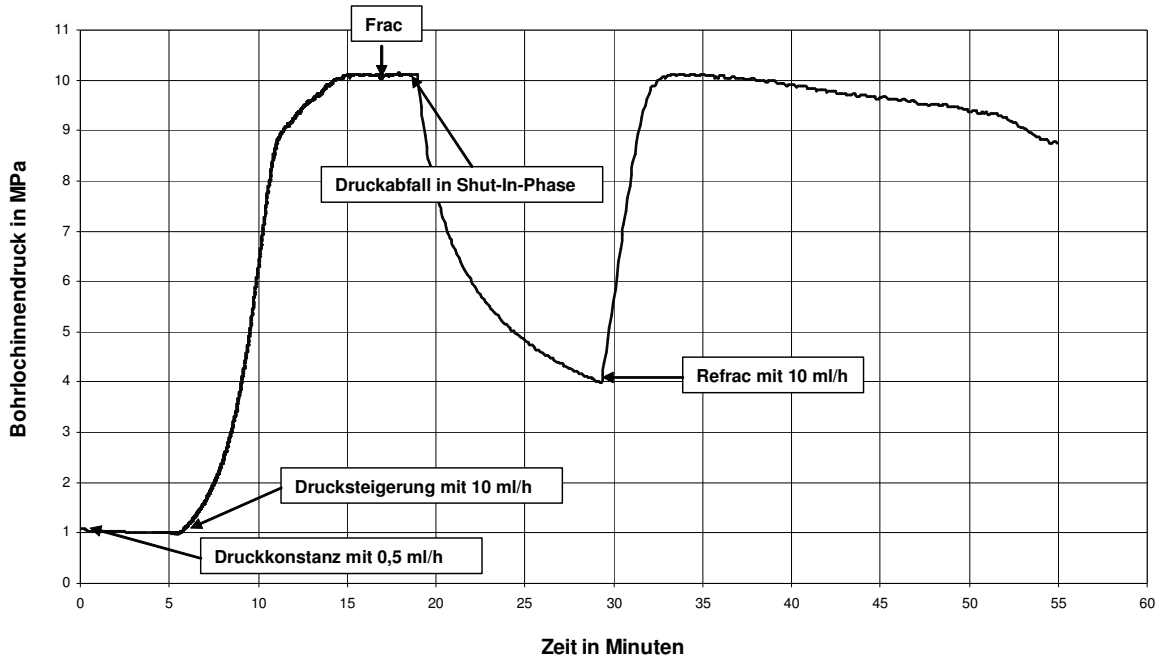


Abb. 5.16: Versuchsablauf im Steinsalz mit Dichtheitsnachweis, Frac und Refrac

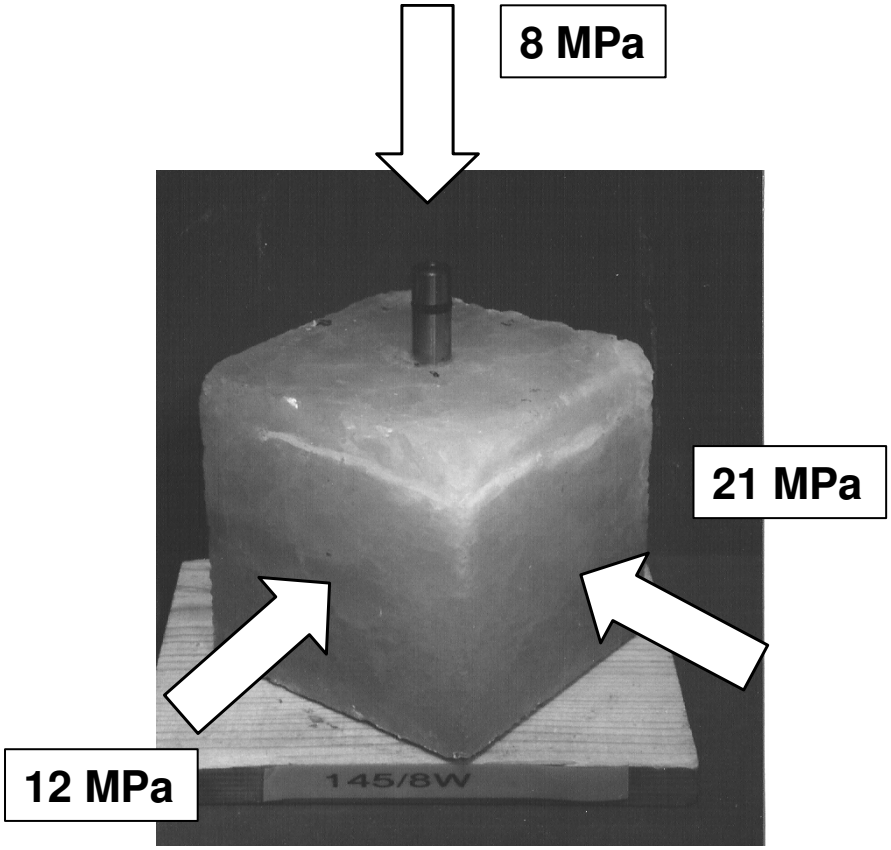


Abb. 5.17: Steinsalzwürfel mit Querriss nach dem Ausbau

Mit einer geringen Injektionsrate von 0,5 ml/h konnten infolge der Prüfkörperherstellung nicht auszuschließende geringste Durchlässigkeiten kompensiert und der Dichtheitsnachweis geführt werden. Die Injektionsrate zur Drucksteigerung bis zum Frac (im Beispiel 10 ml/h) wurde so gewählt, dass sich der Druckanstieg bei noch vorhandener Integrität deutlich vom geringeren Druckanstieg bei der beginnenden Rissbildung im Gefüge unterscheidet. Der Hydrofrac erfolgte bei einem Bohrlochinnendruck von 10,1 MPa und war damit eindeutig der vertikalen Minimalspannung von 8 MPa unter Berücksichtigung einer Gesteinsfestigkeit σ_z von 2,1 MPa zuzuordnen. Danach wurde die Injektion eingestellt und das Druckintervall geschlossen. Es erfolgte ein schneller Druckabfall und das Öl trat an der Außenseite des Würfels aus. Ein Druckgleichgewicht zur Minimalspannung ist nur bei einer Rissausdehnung in einem größeren Gesteinsvolumen zu erwarten.
Mit dem Refrac, gleichfalls mit einer Rate von 10 ml/h, konnte der Druckabfall ab etwa 10 MPa bestätigt werden. Der gegenüber der Minimalspannung von 8 MPa erhöhte Wert wird auf noch zu durchtrennende Materialbrücken und die hohe Drucksteigerungsrate von über 100 MPa/h zurückgeführt. Bei deutlich geringeren Drucksteigerungsraten überwog jedoch die Fluidpermeation in das Salzgefüge, es war kein deutlicher Hydrofrac mehr feststellbar und z.T. wurde die Lage der Permeationsfläche vom Gefüge stärker beeinflusst als von der Spannungsgeometrie. Das Öl migrierte entlang der Korngrenzen in den Würfel und füllte das gesamte Prüfkörpervolumen aus, ohne das eine Vorzugsfläche zu erkennen war.

In Abbildung 5.18 ist dargestellt, dass bei einem Prüfkörper mit durchlässigerem Gefüge schon zum Dichtheitsnachweis eine höhere Injektionsrate von 2 ml/h verwenden werden musste. Die danach folgende Drucksteigerung mit 10 ml/h führte zu keinem erfolgreichen Fracversuch. Der Innendruckabfall ab 1,7 MPa wird auf eine Fluidpermeation in das Gefüge ohne durchgängige Rissbildung zurückgeführt. Mit einer Rate von 100 ml/h ist dann wieder der deutliche Hydrofrac bei 5,8 MPa Innendruck erkennbar. Die Minimalspannung quer zur Bohrung beträgt 4 MPa und es kann von einer Zugfestigkeit von 1,8 MPa ausgegangen werden. Der Längsriss ist entsprechend der Spannungsgeometrie so orientiert, dass σ_{min} zur Flächennormalen wird.

Mit den erhöhten Drucksteigerungsraten konnten bei allen Proben Risslagen entsprechend der Spannungsgeometrie ermittelt werden. Zur besseren Visualisierung des Rissgebietes wurde dem Öl Fluoreszin beigemischt.

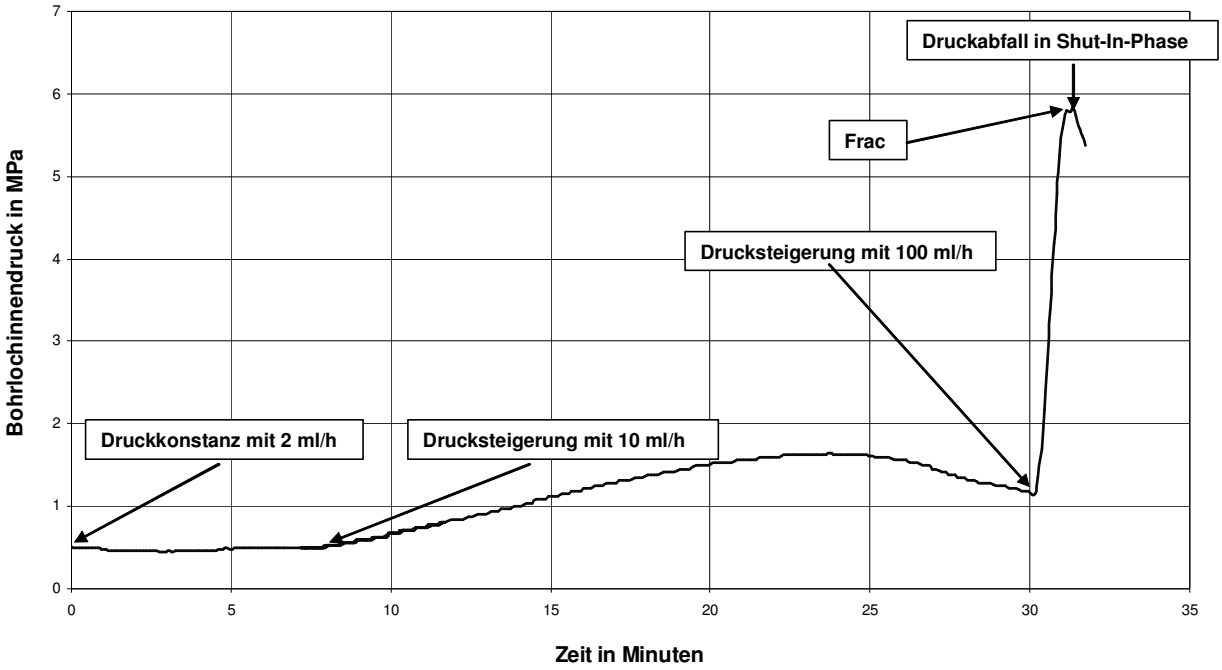


Abb. 5.18: Versuchsablauf im Steinsalz mit Dichtheitsnachweis und unterschiedlichen Drucksteigerungsraten bis zum Frac

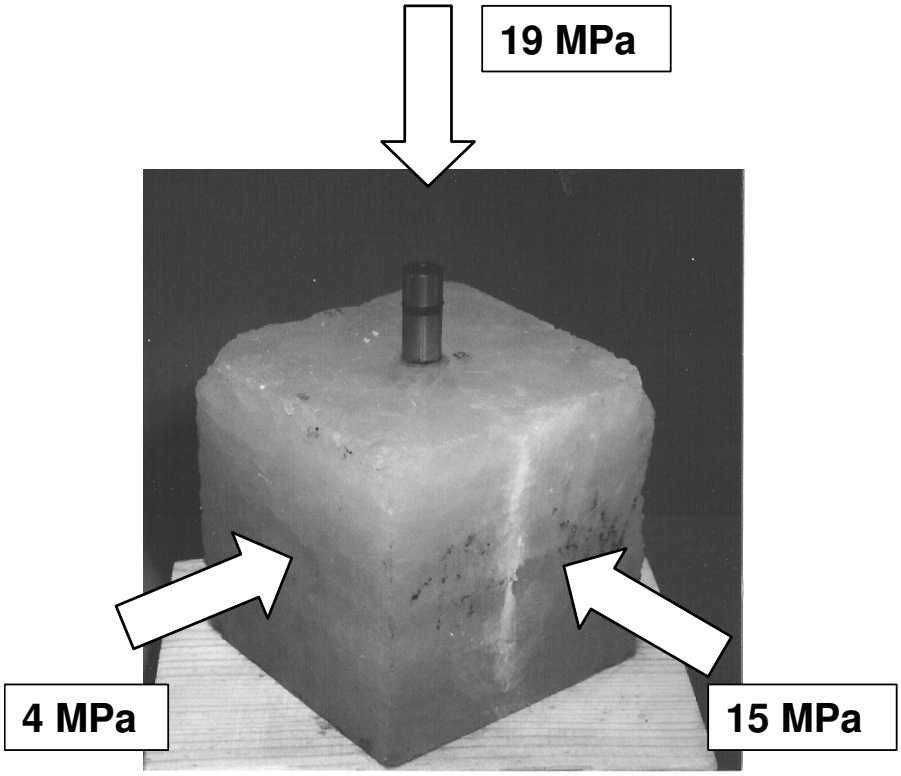


Abb. 5.19: Steinsalzwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

Die Fotografien unter Mischlicht (Fotolampe und UV-Licht) in den Abbildungen 5.17 und 5.19 zeigen, dass im Ergebnis ein Nachweis der Risslagen recht gut möglich ist. Wie schon im obigen Abschnitt dargestellt, verursacht der Riss keine vollständige Gefügetrennung, sondern ist meist nur einseitig an der Prüfkörperaußenfläche nachweisbar. Eine Auftrennung der Würfel an den Rissflächen war nur mit einem Meißel möglich.

Zusammenfassend lassen sich aus den Hydrofracversuchen am Steinsalz folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die einleitenden Aussagen zum Hydrofracverhalten im Steinsalz (insbesondere die Untersuchungen von Kiersten und Schlüter) konnten bestätigt werden. Beim Aufriss bildet sich keine scharf begrenzte Rissfläche, verbunden mit einem deutlichen Innendruckabfall, aus, sondern es kommt zu einer verstärkten Permeation entlang der Korngrenzen in einer räumlichen Zone und der Innendruckanstieg im Rissgebiet wird bei konstanter Injektionsrate geringer.
- Die Rissflächen (penetrierte Gefügebereiche) richten sich überwiegend entsprechend der Spannungsgeometrie am Würfel aus. Die Rissfläche wird von der maximalen und mittleren Hauptspannungsrichtung aufgespannt.
- Bei der Spannungssondierung in situ muss bzgl. der Injektionsrate ein Kompromiss zwischen der Überschätzung der Aufreißfestigkeit bei zu hohen Raten sowie der nur bei hohen Raten eindeutigen Rissausrichtung nach der Spannungsgeometrie und SE-Rissortung gefunden werden. Mit Injektionsraten, die Drucksteigerungsraten von 20 bis 50 MPa/h entsprechen, konnte eindeutig die Minimalspannung sondiert werden. Dies war bei axialen und normalen Rissen der Fall. Eine Zuordnung der Aufreißspannung zur elastischen Tangentialspannungsverteilung am Bohrloch (Theorie von Haimson) war nicht möglich.
- Nach dem Hydrofrac stellte sich kein Ruhedruck ein. Die Fracflüssigkeit trat an den Seitenflächen zwischen Gesteinswürfel und Druckplatten der Prüfmaschine aus.
- Mit einer Erhöhung der Normalspannung zur Rissfläche konnte das Rissgebiet nicht verdichtet und der Abströmwiderstand entlang der Rissfläche nicht erhöht werden.

<u>Grauer Salzton</u>

Auf Grund der geringen Festigkeit war es schwierig, aus dem Salzton eine größere Anzahl von Gesteinswürfeln herzustellen. In den Abbildungen 5.20 und 5.21 ist ein ausgewählter typischer Versuchsablauf von insgesamt drei Versuchen dargestellt.

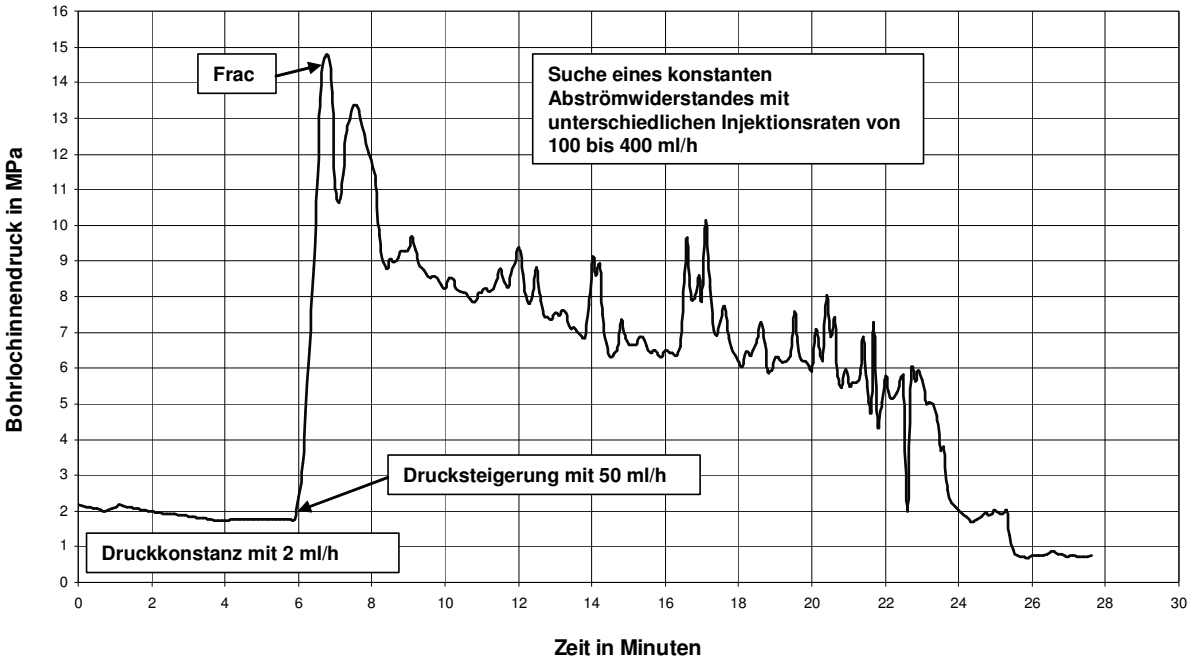


Abb. 5.20: Versuchsablauf im Salzton mit Dichtheitsnachweis, Frac und unterschiedlichen Injektionsraten zur Ermittlung eines konstanten Abströmwiderstandes

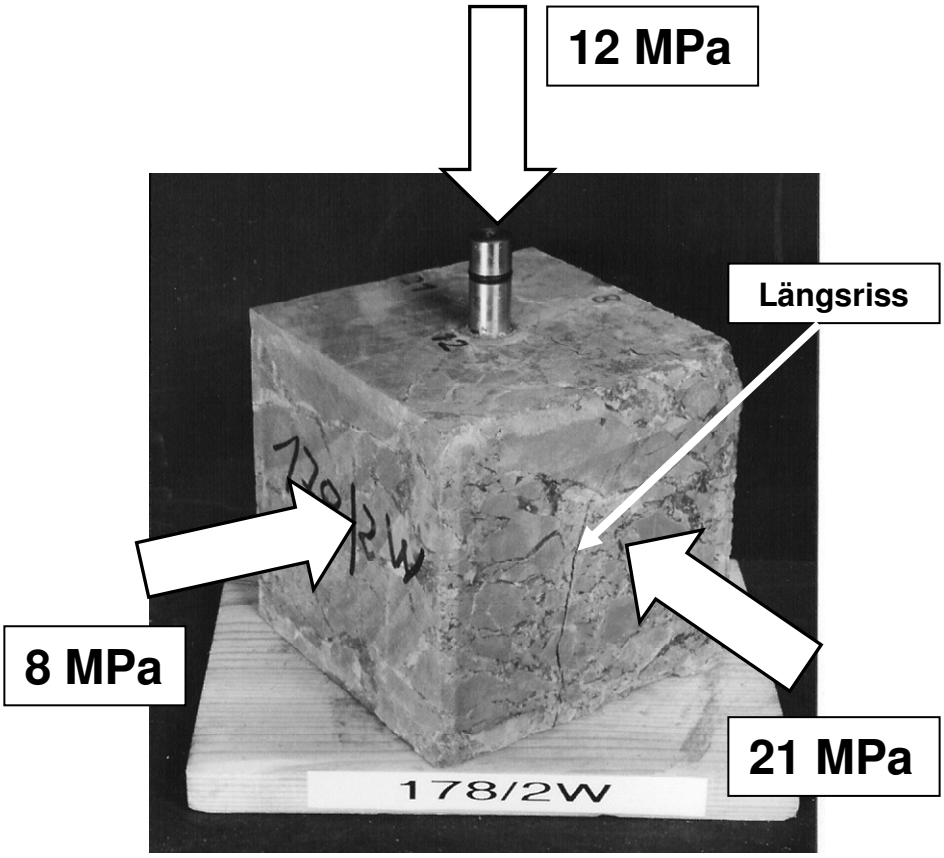


Abb. 5.21: Salztonwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

Da sich im Salzton offene Risse einstellten, war eine Verwendung von Fluoreszin zum Rissnachweis nicht notwendig.

Der axiale Riss in Richtung der großen und mittleren Hauptspannung ist in Abbildung 5.21 auf der rechten Vorderseite deutlich erkennbar. Der Riss zeigt sich in der Druckkurve in Abbildung 5.20 mit einem schlagartigen Druckabfall bei 15 MPa. Als Gesteinsfestigkeit wird ein Wert von etwa 7 MPa ausgewiesen, der analog zum Steinsalz infolge der hohen Injektionsrate von 50 ml/h vergrößert ist. Ein mehr oder weniger konstanter Abströmwiderstand nach dem Riss konnte im Salzton nicht ermittelt werden. Es existiert eine Rissschar, die den Würfel axial und normal durchläuft. Die Ursache dafür ist in der inhomogenen Gefügeausbildung zu suchen. Die Hauptrisse orientieren sich jedoch entsprechend der Spannungsgeometrie. Eine Korrelation zur elastischen Tangentialspannung am Bohrloch ist nicht erkennbar.

Hauptanhydrit

Der untersuchte Hauptanhydrit stammte aus der Grube Bernburg und wurde als überwiegend homogen ohne erkennbare Schichtung und tektonische Strukturen beschrieben. Im gesteinsmechanischen Laborversuch zeigte er ein vorrangig elastisches Verhalten mit relativ hoher Festigkeit. Auf Basis dieser petrographischen Beschreibung war beim Anhydrit ein zum Steinsalz und Salzton abweichendes Hydrofracverhalten zu erwarten, welches der elastischen Modellvorstellung sehr nahe kommen dürfte. Im elastischen Gestein besitzt die Druckbeanspruchungsrate nicht mehr den dominierenden Einfluss wie bei den Salzgesteinen und beim Salzton.

Beim Anhydrit wurden Injektionsraten (Spindelöl mit Fluoreszin) von 20 - 50 ml/h gewählt, die zu Innendruckraten von etwa 400 MPa/h führen. Bei allen Versuchen stellten sich die Risse entsprechend der Spannungsgeometrie ein. Besonders auffällig waren der schlagartige Druckabfall nach dem Aufriss und die Ausbildung einer scharf begrenzten Rissfläche. Diese Rissfläche kann sich in Einzelfällen auch verzweigen und ist meist nur an einer Seite der Bohrung ausgebildet. In den Abbildungen 5.22 und 5.23 sind die Versuchskurve und der Rissverlauf nach dem Ausbau dargestellt.

Die Aufreißspannung ist eindeutig der Minimalspannung zuzuordnen, wobei für den Anhydrit eine Zugfestigkeit von 1 - 5 MPa anzusetzen ist. Auch in diesem homogenen und überwiegend elastisch reagierenden Gestein ist keine Interpretation der Aufreißspannung gemäß der elastischen Tangentialspannungsverteilung am Bohrloch möglich. Nach dem Abschalten der Pumpe stellt sich auch im Anhydrit kein Ruhedruck entsprechend der Minimalspannung ein. Der Refracwert liegt geringfügig unter der Minimalspannung.

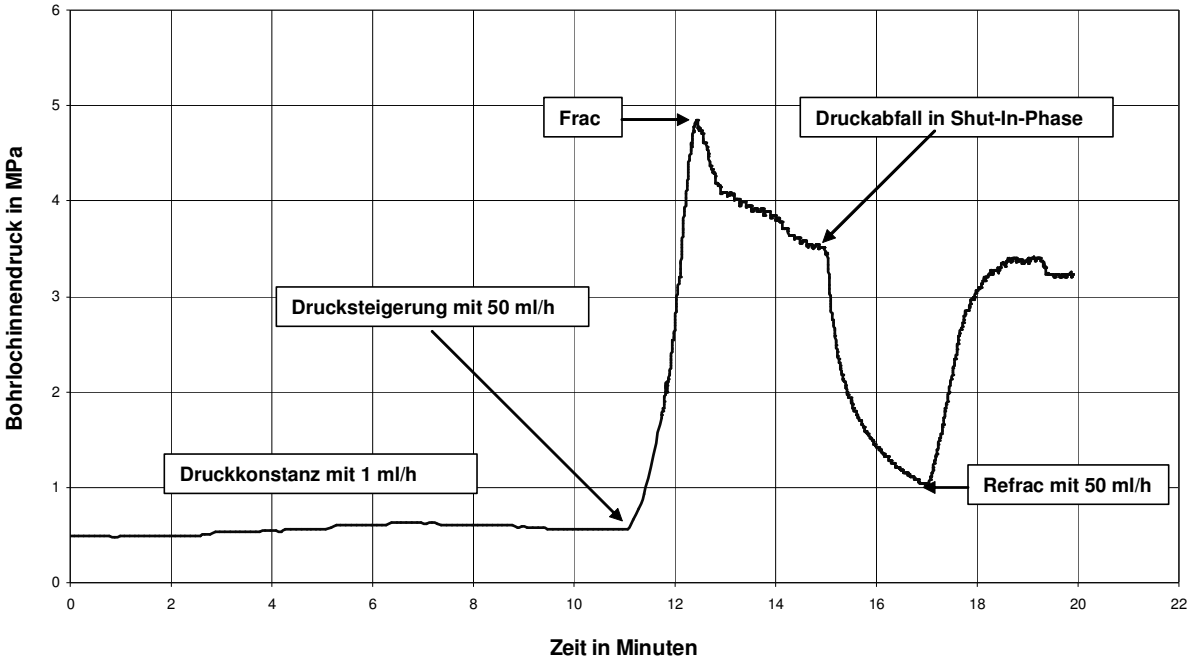


Abb. 5.22: Versuchsablauf im Anhydrit mit Dichtheitsnachweis, Frac und Refrac

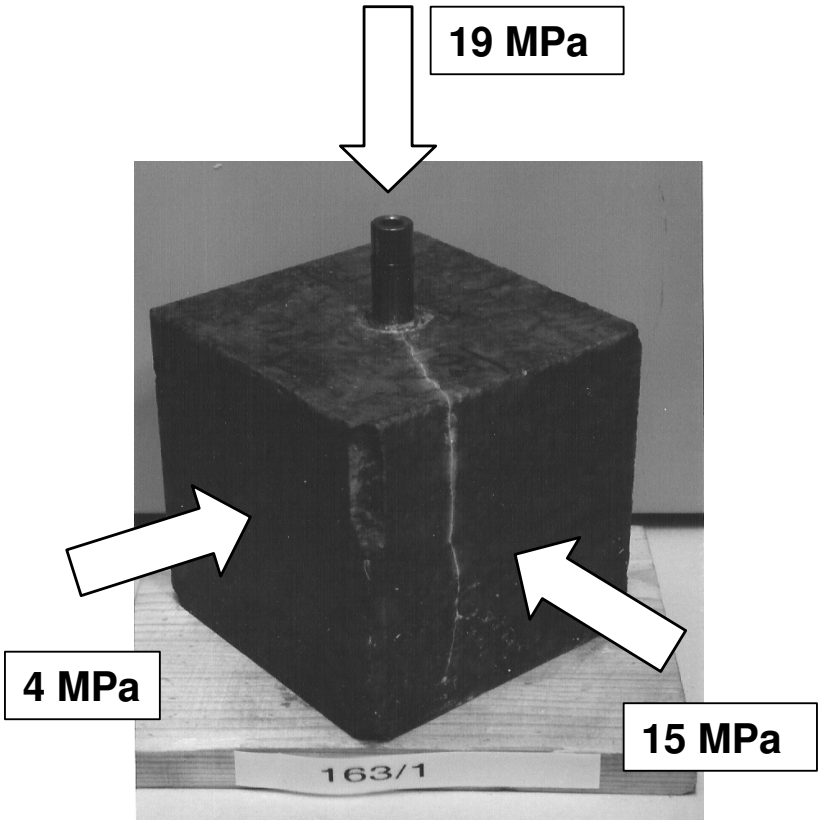


Abb. 5.23: Anhydritwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

5.2.2.3 Kluftpermeabilitätsmessungen im Anhydrit

Im Unterschied zum Steinsalz und Salzton war es im Anhydrit möglich, nach dem Hydrofrac mit der Dosierpumpe konstante Innendrücke in der Bohrung und damit konstante Abströmwiderstände des Öls im Rissgebiet von der Innenbohrung bis zu Würfelaußenseite einzustellen. Ein Beispiel für die erreichten stationären Verhältnisse ist in Abbildung 5.24 zu sehen. Der Anhydritwürfel war in diesem Fall parallel zur Bohrung mit 14 MPa und normal mit 19 und 21 MPa belastet. Es bildete sich ein horizontaler Riss aus.

Das Ziel dieser Untersuchungen bestand darin, zu prüfen, ob das kubische Fließgesetz für die Kluftströmung in dem künstlich erzeugten Riss sinnvoll angewendet und die hydraulisch wirksame Kluftöffnung im Rissgebiet berechnet werden kann. In der Theorie des kubischen Fließgesetzes werden dabei eine hydraulisch glatte Kluft unter Voraussetzung eines konstanten laminaren Volumenstromes unter stationären Verhältnissen bei einer konstanten Injektionsrate und einem konstanten Bohrlochinnendruck vorausgesetzt.

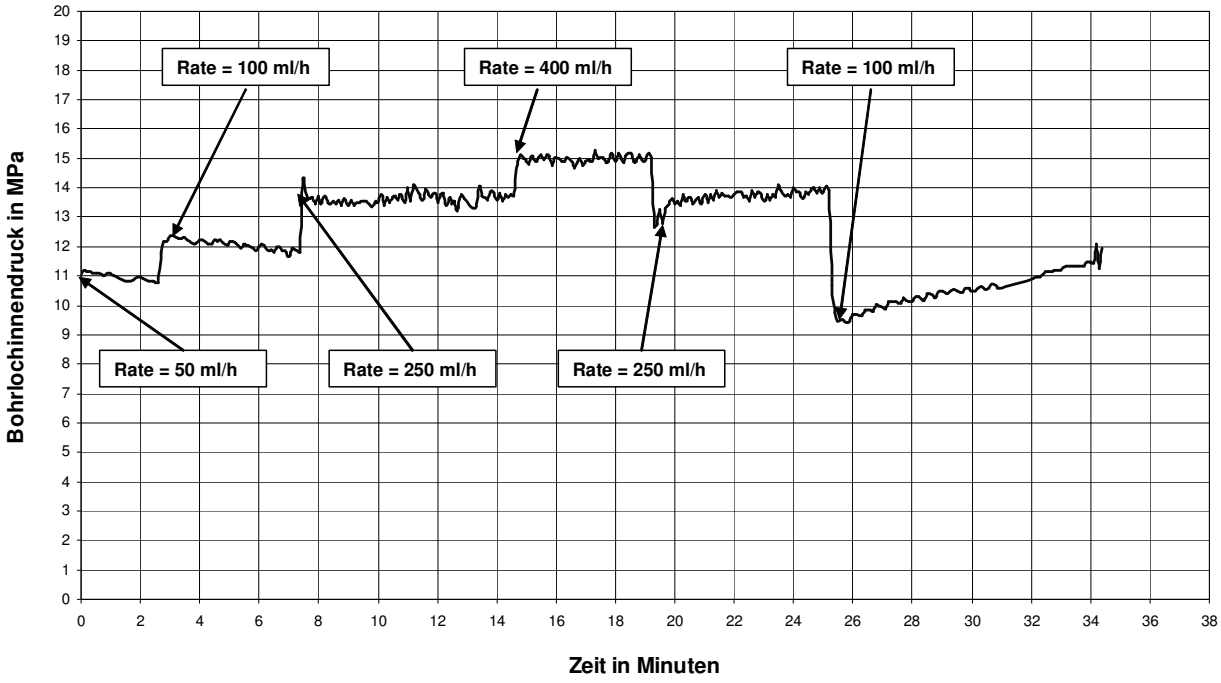


Abb. 5.24: In einem Hydrofracriss im Anhydrit erreichte stationäre Strömungsverhältnisse

Bei der Ausbildung von Längs- und Querrissen zur Bohrung muss das Fließgesetz für eine axiale und normale Risslage verwendet werden. Wie in Abbildung 5.23 zu sehen, bildeten sich in den meisten Fällen Einzelrisse aus, die axial eine halbseitige Verbindung zu den Außenflächen herstellten bzw. normal den gesamten Bohrlochumfang umfassten.

Für die axiale Kluftströmung (Längsriss am Bohrloch) gilt:

$$q_a = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot a \cdot \frac{p_i}{L} \tag{5.18}$$

mit q_a = axialer Volumenstrom in der Kluft

b = hydraulisch wirksame Kluftöffnung

μ = dynamische Viskosität des Öls mit $6{,}8 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{Pa \cdot s}$

a = Risslänge (im Mittel 10 cm)

p_i = Bohrlochinnendruck

L = Risstiefe von der Bohrung bis zur Außenfläche (im Mittel 5 cm)

Für die normale Kluftströmung (Riss quer zum Bohrloch) gilt:

$$q_n = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot 2\pi \cdot \frac{p_i}{\ln(\frac{r_a}{r_i})} \tag{5.19}$$

mit q_n = normaler Volumenstrom in der Kluft

b = hydraulisch wirksame Kluftöffnung

μ = dynamische Viskosität des Öls mit $6{,}8 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{Pa \cdot s}$

p_i = Bohrlochinnendruck

r_i = Bohrlochradius 0,8 cm

r_a = mittlere radiale Entfernung bis zur Würfelaußenfläche 6 cm

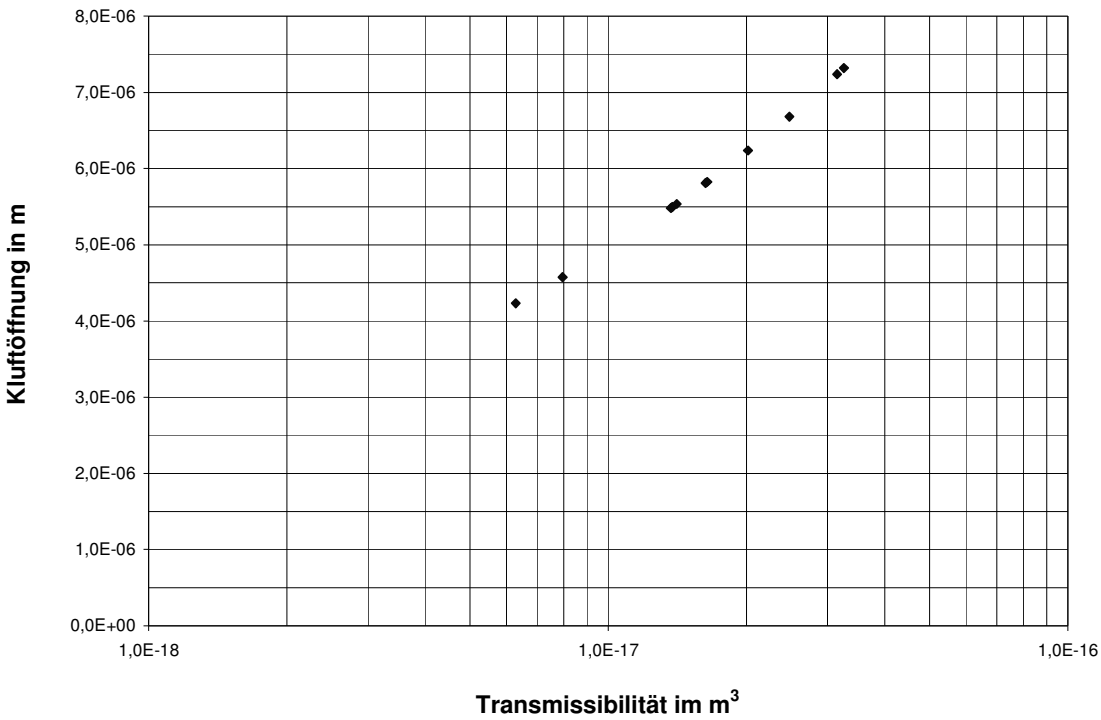


Abb. 5.25: Unter stationären Verhältnissen in Anhydritrissen berechnete hydraulisch wirksame Kluftöffnungen bzw. die entsprechenden Transmissibilitäten

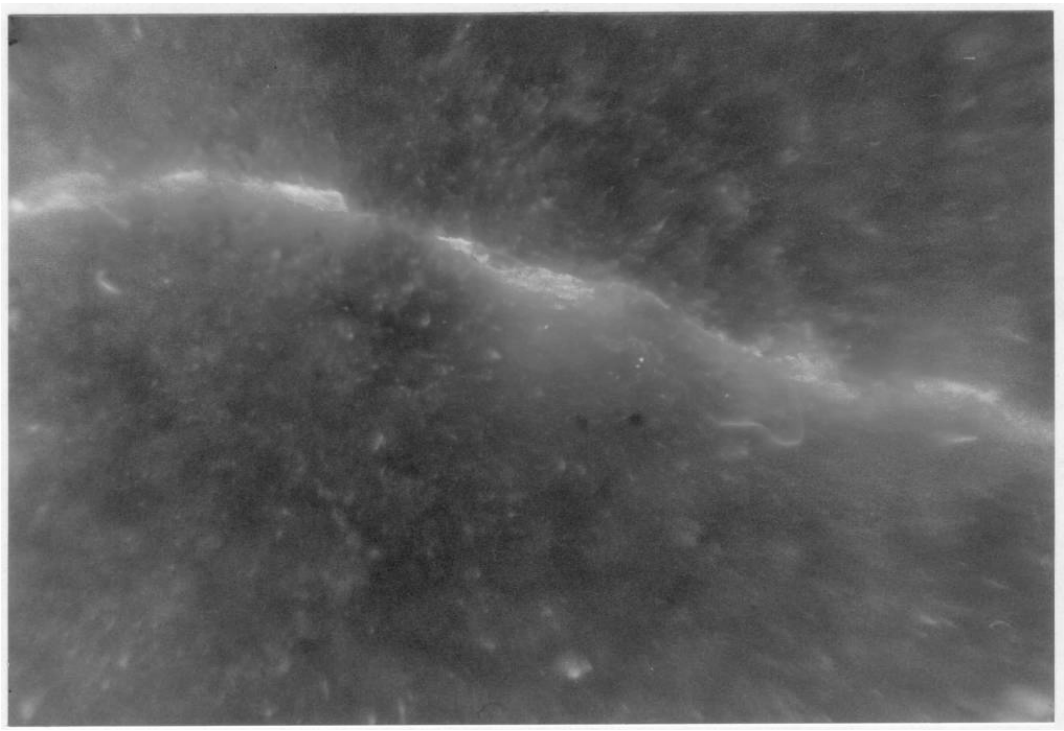


Abb. 5.26: Einzelriss in einer Anhydritprobe nach dem Hydrofrac (hundertfache Vergrößerung, Druckmedium fluoreszierendes Öl)

In Abbildung 5.25 ist dargestellt, dass sich unter den gegebenen Randbedingungen und geometrischen Verhältnissen hydraulisch wirksame, mittlere effektive Kluftöffnungen von 4 bis 8 µm ergeben. Entsprechend der Rissausbildung wurden axiale oder normale Kluftströmungen vorausgesetzt. Der Mittelwert liegt bei 6 µm.
In der hundertfachen Vergrößerung des Hydrofracrisses in Abbildung 5.26 ist zu erkennen, dass solche Öffnungsweiten im Anhydrit tatsächlich auch gemessen werden konnten. Die Vermessung führte zu Beträgen zwischen 5 und 15 µm.

Zum Vergleich mit bekannten hydraulischen Parametern wurde in Abbildung 5.25 die Kluftöffnung der Transmissibilität gegenübergestellt. Diese berechnet sich mit

$$T = \frac{b^3}{12} \tag{5.20}$$

und erreicht Beträge zwischen $6 \cdot 10^{-18}$ bis $3 \cdot 10^{-17}$ m^3.

Ein Bezug der normalen Kluftströmung in einem Riss mit der Öffnungsweite b quer zum Bohrloch zur axialsymmetrischen Strömung nach Darcy von der Bohrlochkontur aus über eine Prüfintervallhöhe H lässt sich herstellen mit

$$Q_n = \frac{K}{\mu} \cdot 2\pi H \cdot \frac{p_i}{\ln(\frac{r_a}{r_i})} \tag{5.21}$$

mit Q_n = Volumenstrom quer zum Bohrloch in radialer Richtung
K = Permeabilität im Prüfintervall
μ = dynamische Viskosität
H = Prüfintervallhöhe
p_i = Bohrlochinnendruck
r_i = Bohrlochradius
r_a = Außenradius der Permeationsfront

Die Transmissibilität berechnet sich hier aus dem Produkt von K und H und der Vergleich der Formeln 5.19 und 5.21 zeigt, dass die Permeabilität K dem Quotienten $b^2/12$ und die Prüfintervallhöhe H (Abströmmächtigkeit) der Kluftöffnung b entspricht. Da bei einer Kluft der Volumenstrom nur innerhalb der Öffnungsweite b vorausgesetzt wird, ist es sinnvoll, das Produkt $b^3 / 12$ zu verwenden.

Bei unterschiedlichen Permeabilitäten in einer Schicht lässt sich eine mittlere Transmissibilität für die Schicht berechen, wobei die Permeabilitäten jeweils mit der Teilschichtmächtigkeit multipliziert werden. In der Grundwasserhydraulik (z.B. in BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K. (1993)) kommt sinngemäß analog die Transmissivität als Produkt des K_f-Wertes und der Teilschichtmächtigkeit (Einheit m^2/s) zur Anwendung. Durch die Integration über alle Schichten liefert die Transmissivität praktisch einen Durchschnittswert bzw. den Mittelwert der Durchlässigkeit über alle Inhomogenitäten innerhalb eines Aquifers.
Bei einer Höhe des Bezugsabschnittes (mittlere hydraulisch wirksame Kluftöffnung) von 6 µm würden die Klufttransmissibilitäten in Abbildung 5.25 zwischen $6 \cdot 10^{-18}$ bis $3 \cdot 10^{-17}$ m^3 einer Kluftpermeabilität in der Größenordnung von 10^{-12} m^2 entsprechen.

Bei einem Bezug der Transmissibilität auf die Klüfte ist darauf zu achten, dass der hydraulische Parameter zunächst nur für eine Einzelkluft gilt. Zur Charakterisierung der integralen Durchlässigkeit eines größeren Gebirgsabschnittes muss der mittlere Kluftabstand bzw. die mittlere Anzahl der transportwirksamen Klüfte berücksichtigt werden.

5.2.2.4 Gesamtauswertung

In der Tabelle 5.6 sind alle Würfelfracresultate zusammenfassend dargestellt. Insgesamt konnten 70 Gesteinswürfel untersucht und damit eine statistisch auswertbare Korrelation zwischen der Aufreißspannung σ_A und den wirkenden Hauptspannungen erreicht werden. Die Korrelation zur Spannung σ_3 parallel zum Bohrloch sowie zur elastischen Tangentialspannung am Bohrloch $3\sigma_2 - \sigma_1$ ist mit Bestimmtheitsmaßen von 0,48 und 0,63 unbefriedigend. Die beste Abhängigkeit zeigt sich zwischen dem Aufreißdruck σ_A und der minimalen Hauptspannung σ_{min} unabhängig von der Richtung.

In Abbildung 5.27 ist der graphische Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95 angegeben. Für alle untersuchten Salinargesteine lässt sich eine mittlere Zugfestigkeit von 2,8 MPa ableiten.

Tabelle 5.6: Zusammenfassung der durchgeführten Würfelfracversuche

Lfd. Nr.	σ_1 in MPa	σ_2 in MPa	σ_3 in MPa	R_A in ml/h	σ_A in MPa	σ_{min} in MPa	$3*\sigma_2-\sigma_1$ in MPa	Gestein
1	23	6	15	20	7,5	6	-5	Anhydrit
2	21	19	14	50	17,3	14	36	Anhydrit
3	30	15	8	50	11,9	8	15	Anhydrit
4	19	15	24	50	17,7	15	26	Anhydrit
5	21	8	12	50	9,2	8	3	Anhydrit
6	15	4	19	50	4,8	4	-3	Anhydrit
7	21	8	12	50	14,8	8	3	Salzton
8	19	15	24	50	25,5	15	26	Salzton
9	24	15	8	50	15,1	8	21	Salzton
10	15	4	19	100	5,8	4	-3	Steinsalz
11	21	12	8	10	8,5	8	15	Steinsalz
12	24	18	30	10	19,9	18	30	Steinsalz
13	24	10	19	10	11,9	10	6	Steinsalz
14	20	8	24	10	13,2	8	4	Steinsalz
15	21	8	12	10	8,1	8	3	Steinsalz
16	19	15	4	50	10,5	4	26	Steinsalz
17	19	15	4	100	6,2	4	26	Steinsalz
18	21	12	8	100	11,4	8	15	Steinsalz
19	21	8	12	100	11,9	8	3	Steinsalz
20	15	12	24	50	14,5	12	21	Steinsalz
21	36	27	54	nicht best.	29	27	45	Sylvinit
22	36	27	54	nicht best.	30	27	45	Steinsalz
23	54	9	27	nicht best.	12	9	-27	Sylvinit
24	54	27	9	nicht best.	12	9	27	Sylvinit
25	54	27	9	nicht best.	13	9	27	Steinsalz
26	27	27	9	nicht best.	12	9	54	Steinsalz
27	27	27	9	nicht best.	10,5	9	54	Steinsalz
28	27	27	9	nicht best.	9	9	54	Steinsalz
29	27	27	9	nicht best.	11	9	54	Steinsalz
30	27	27	18	nicht best.	21,5	18	54	Steinsalz
31	40	40	30	nicht best.	32	30	80	Steinsalz
32	30	30	20	nicht best.	21,5	20	60	Steinsalz
33	46	45	27	nicht best.	35	27	89	Sylvinit
34	40	40	30	nicht best.	34	30	80	Steinsalz
35	36	36	27	nicht best.	31	27	72	Sylvinit
36	27	27	18	nicht best.	17,5	18	54	Steinsalz
37	27	27	40	nicht best.	29,5	27	54	Sylvinit
38	30	30	30	nicht best.	29,5	30	60	Steinsalz
39	27	27	27	nicht best.	27	27	54	Steinsalz
40	40	40	40	nicht best.	39	40	80	Steinsalz
41	40	40	40	nicht best.	40	40	80	Steinsalz
42	18	18	18	nicht best.	18,5	18	36	Sylvinit
43	27	27	27	nicht best.	27,5	27	54	Steinsalz
44	27	27	27	nicht best.	29,5	27	54	Steinsalz
45	27	27	27	nicht best.	29	27	54	Steinsalz
46	27	27	27	nicht best.	29	27	54	Steinsalz
47	30	21	13	nicht best.	15	13	33	Sylvinit
48	30	21	13	nicht best.	15	13	33	Sylvinit
49	27	24	21	nicht best.	21	21	45	Steinsalz
50	27	24	21	nicht best.	21	21	45	Steinsalz
51	30	21	5	nicht best.	6	5	33	Steinsalz
52	30	21	5	nicht best.	6	5	33	Sylvinit
53	15	8	8	nicht best.	8	8	9	Sylvinit
54	15	8	8	nicht best.	9	8	9	Steinsalz
55	15	10	25	nicht best.	12	10	15	Steinsalz
56	20	10	25	nicht best.	12	10	10	Steinsalz
57	20	10	25	nicht best.	10	10	10	Steinsalz
58	15	10	35	nicht best.	10	10	15	Steinsalz
59	15	10	35	nicht best.	10,5	10	15	Steinsalz
60	15	10	40	nicht best.	15	10	15	Steinsalz
61	10	10	25	nicht best.	11	10	20	Steinsalz
62	10	5	25	nicht best.	7	5	5	Steinsalz
63	8	8	0	nicht best.	4	0	16	Steinsalz
64	8	8	0	nicht best.	4	0	16	Carnallitit
65	0	0	8	nicht best.	3	0	0	Steinsalz
66	0	0	0	nicht best.	3	0	0	Steinsalz
67	0	0	0	nicht best.	3	0	0	Carnallitit
68	15	10	35	nicht best.	10	10	15	Carnallitit
69	30	21	5	nicht best.	6	5	33	Carnallitit
70	15	15	15	nicht best.	15	15	30	Carnallitit

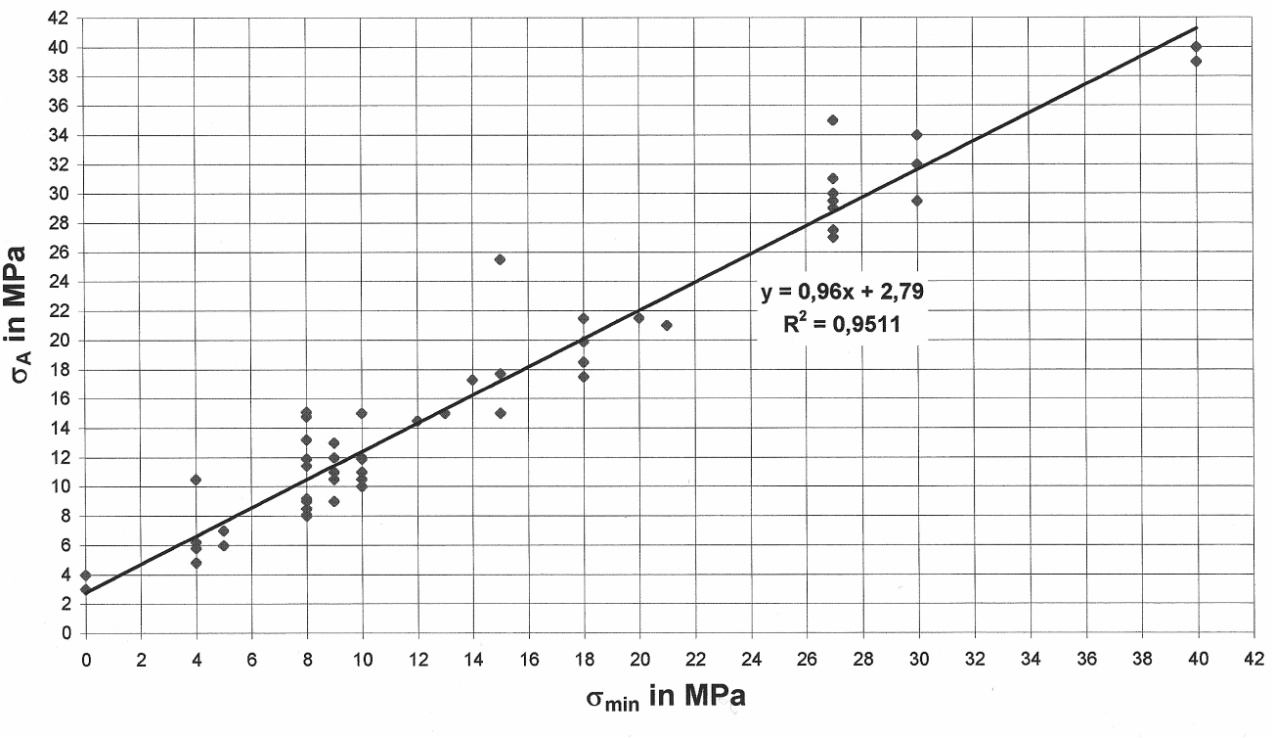


Abb. 5.27: Gesamtdarstellung der Abhängigkeit der Aufreißspannung σ_A von der Minimalspannung σ_{min} unabhängig von der Richtung zum Bohrloch

Für die geplanten In-situ-Spannungssondierungen konnten folgende Schlussfolgerungen als Grundlage für das festzulegende Versuchsprogramm gezogen werden:

- Die Sondierungsbohrungen aus den Untersuchungsorten müssen nicht parallel zu einer Hauptspannungsrichtung verlaufen. Mit der Bohrlochrichtung kann keinesfalls die Risslage präjudiziert werden (z.B. beabsichtigte normale oder axiale Risslage).
- Der Riss wird sich immer am lokalen Spannungsfeld orientieren und kann demzufolge auch schräg zur Bohrlochachse verlaufen. Im unmittelbaren Hohlraumkonturbereich ist immer ein Riss parallel zur Kontur zu erwarten. Die Minimalspannungsrichtung entspricht der Flächennormale.
- Bezüglich der zu untersuchenden Salinargesteine einschließlich des Hauptanhydrits und Grauen Salztons zeigte sich eindeutig, dass mittels der Hydrofrac-Spannungs-sondierung nur eine Aussage zur minimalen Hauptspannung abgeleitet werden kann. Eine Anwendung der elastischen Auswertebeziehung zur Bestimmung der maximalen Hauptspannung aus dem Aufreiß- und Ruhedruck (siehe Kapitel 5.2.1) war auf Grund der Relaxation der Tangentialspannung bzw. der Tangentialspannungsabsenkung infolge der Fluidpermeation in den Mikrorissen an der Bohrlochkontur (beide Prozesse finden vor dem eigentlichen Hydrofrac statt) nicht möglich. Die der theoretischen

Auswertung zugrunde liegende axiale Risslage kann ohnehin nicht sicher gewährleistet werden.

- Wenn die Spannungssondierung mit einer elektrischen Pumpe mit Volumenstromregelung durchgeführt wird, sollte die Innendruckrate bis zum Aufriss in einem Bereich von 20 bis 50 MPa/h liegen. Der Aufreißdruck repräsentiert dann die Summe aus bekannter Zugfestigkeit des Gesteins und Minimalspannung. Neben dem Ruhedruck steht somit ein zweiter Messwert zur Identifizierung der Minimalspannung zur Verfügung, welcher zur Überprüfung des Ruhedruckes genutzt werden sollte. In den meisten Gesteinen wird die Ruhedruckeinstellung überlagert von einer Fluidpermeation und es ist keine absolute Druckkonstanz zu erreichen.
- Die Mikrorisse im Anhydrit oder in den penetrierten Bereichen im Salzgestein besitzen sehr geringen Öffnungsweiten, so dass eine Rissortung mit Bohrlochkamera oder Abdruckpacker, wobei nur die Bohrlochkontur visualisiert werden kann, als sehr schwierig erscheint. Als eher erfolgversprechend wurden für die In-situ-Versuche eine Risslokalisierung mittels der Schallemissionsanalyse konzipiert und die messtechnischen Voraussetzungen geschaffen.
- Als Fracmedium wurde Hydrauliköl mit der gleichen Viskosität wie im Laborversuch verwendet. Die dynamische Viskosität entspricht einer gesättigten Salzlösung. Die Standzeit der Bohrung bis zur Spannungssondierung sollte etwa eine Woche nicht überschreiten.
- Der Aufriss im Anhydrit zeigte sich mit einem deutlichen Druckabfall, während im Salzgestein der Wendepunkt der Druckkurve zum geringeren Anstieg hin die verstärkte Fluidpermeation in die Bohrlochkontur auswies.
- Nach dem Riss konnten im Anhydritwürfel stationäre Strömungsverhältnisse über die geringe Distanz von der Bohrung bis zur Außenseite realisiert und die Kluftpermeabilitäten bzw. -transmissibilitäten berechnet werden. In situ ist zu prüfen, ob ein solcher konstanter Volumenstrom von der Bohrung bis zum Streckenstoß eingestellt werden kann. Dann ist eine analoge Versuchsdurchführung möglich.
- In den Versuchen wurde festgestellt, dass die Risspermeabilität, wenn auch nur gering, von der Spannung normal zur Anhydritkluft abhing. In situ sollte untersucht werden, wie die hydraulischen Parameter in Abhängigkeit von sich ändernden Gebirgsspannungen variieren. Die mechanisch-hydraulische Wechselwirkung ist wesentlich zur Bewertung des geologischen Barriereverhaltens im Anhydrit.

6. Analyse des Bergbaus am Staßfurter Sattel als historisches Analogon für einen Integritätsverlust im Hauptanhydrit

6.1 Einleitung

Die bisherigen Ausführungen zum gebirgsmechanischen Verhalten und zur Dichtheit lassen den Integritätsverlust der geologischen Barriere über den Hauptanhydrit als unwahrscheinlich bzw. das Hauptanhydritszenario als ungerechtfertigt erscheinen: Der Anhydrit besitzt eine hohe Festigkeit, die auch bei Spannungsumlagerungen (-erhöhungen) infolge des Steinsalzkriechens nur zu Bruchteilen ausgenutzt wird. Im Anhydrit sind unter In-situ-Bedingungen weder Plastifizierungs- noch Kriechprozesse nachweisbar. Die existierenden Klüfte sind in der Regel mineralisiert und nur in seltenen Fällen an den Hohlraumkonturen in geringer Teufe der Bergwerke geöffnet. Im eingespannten Gebirge außerhalb des Hohlraumeinflusses und Teufen > 800 m wurden keine geöffneten Klüfte mehr festgestellt. Auch an Prüfkörpern geklüfteter Bereiche waren in Laborversuchen hohe Festigkeiten und geringe Permeabilitäten feststellbar. Selbst nach einem Hydrofrac im Prüfkörper lagen die Permeabilitäten gegenüber Stickstoff noch in der Größenordnung von 10^{-19} m². Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass der Hauptanhydrit im eingespannten Gebirge ohne Hohlraumeinfluss primär dicht ist und die geologische Barrierefunktion nicht beeinträchtigt.

Bei einer umfassenden Problemdiskussion müssen jedoch die in der Vergangenheit des Kali- und Steinsalzbergbaus trotzdem verursachten Integritätsverluste berücksichtigt werden. Aus einer Analyse der Ursachen und notwendigen Randbedingungen lassen sich Rückschlüsse hinsichtlich der zukünftigen Vermeidung ziehen.

Die Feststellungen im Abschnitt 2, dass ein Lösungszutritt nur eintreten kann, wenn

- die Kluftöffnung und der Kluftflächenanteil in der Kluft infolge der bergbaulichen Entspannung oder durch Festigkeitsüberschreitung ausreichend groß sind, um einen zusammenhängenden Fließweg zu schaffen,
- der Fließweg ein Lösungsreservoir erschließt und
- die hydraulische Druckdifferenz und die integrale Permeabilität ausreichend groß sind, um einen merklichen Zutritt auszulösen,

sollen am Beispiel des historischen Kali- und Steinsalzbergbaus am Staßfurter Sattel hinsichtlich ihrer Berechtigung untersucht werden.

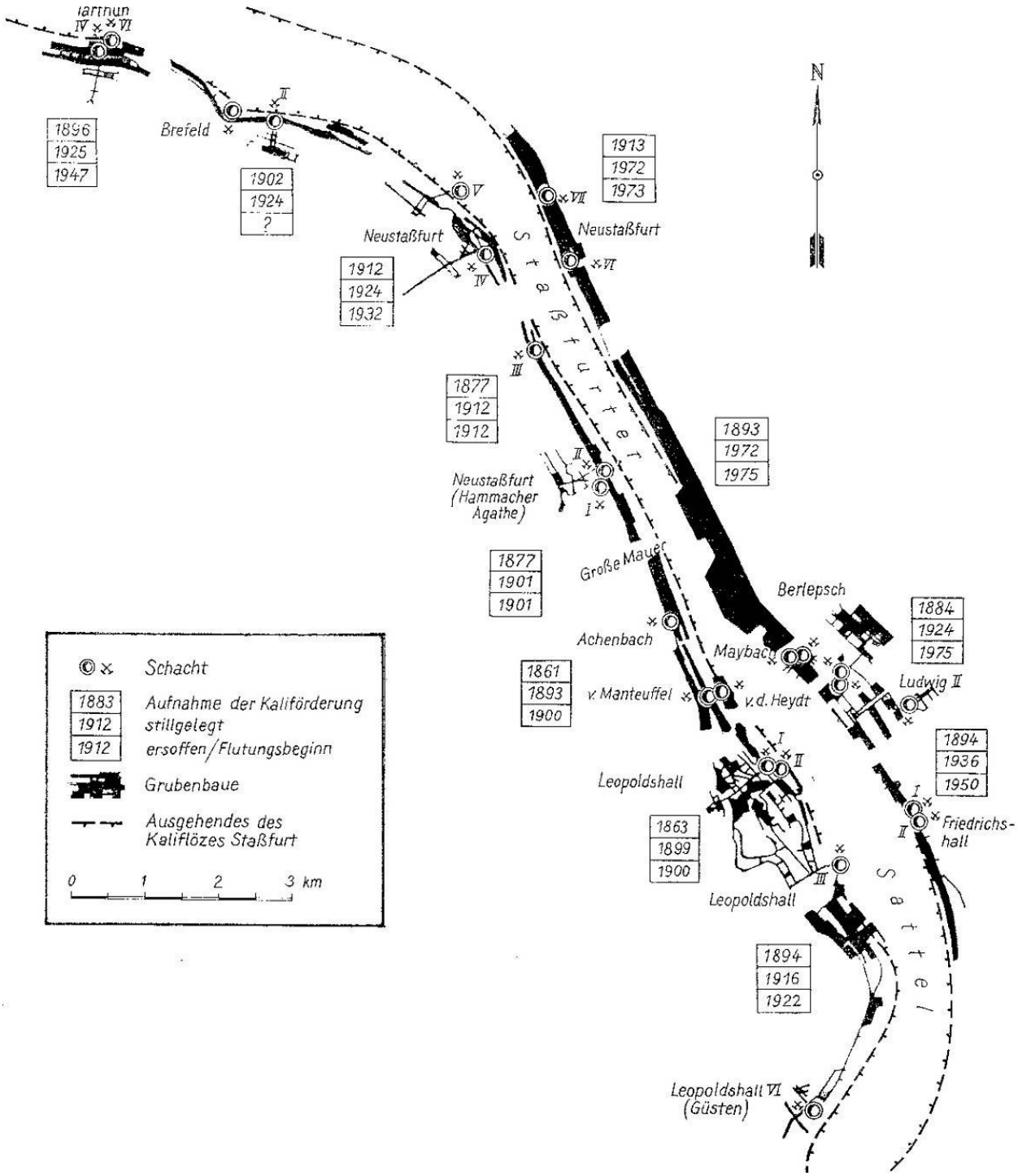


Abb. 6.1: Übersichtsplan der Gruben am Staßfurter Sattel mit dem Jahr der Inbetriebnahme, Stilllegung und Flutung (aus HAUSKE, K.-H.; FULDA, D. (1990))

Im Folgenden werden dazu zunächst historische Aufzeichnungen hinsichtlich zur Problematik relevanter Aussagen ausgewertet und danach gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Analyse der Spannungszustände, Ausnutzung der Festigkeit, Kluftöffnungen und hydraulischen Wirkungen im Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Gruben Hammacher-Agathe und Achenbach an der Südwestflanke des Staßfurter Sattels durchgeführt. In der Abbildung 6.1 sind die in diesem Kapitel erwähnten Bergwerke am Staßfurter Sattel dargestellt.

6.2 Geologie und Vorgeschichte bis zum ersten Kalisalzabbau

Der Staßfurter Sattel wurde in der Kreidezeit gebildet, wobei das etwa 500 m mächtige Ältere Steinsalz (Staßfurtsteinsalz), welches heute den Sattelkern bildet, unter hohem seitlichen Druck aufgefaltet wurde. Die über dem Älteren Steinsalz abgelagerten Zechstein- und Deckgebirgsschichten wurden abgetragen. Der Sattel mit einer Länge von ca. 60 km und einer Breite von ca. 6 km (Streichrichtung NW - SE) tritt landschaftlich nicht in Erscheinung und ist in einer ebenen Bodenniederung verborgen. Die Sattelflanken sind mit 20° bis 45° geneigt. Die Salzfolge (Normalprofil) wird in HEMMANN, M. (1972) mit folgenden Mächtigkeiten angegeben:

Tabelle 6.1: Normalprofil der geologischen Schichten am Staßfurter Sattel

Stratigraphischer Horizont	Symbol	Mächtigkeit (m)
Hangendes: Buntsandstein		
Oberste Zechsteinletten	T 4r	20 - 30
Grenzanhydrit	A 4r	0,5 - 3
Allersteinsalz	Na 4	20 - 40
Pegmatitanhydrit	A 4	1 - 2,5
Roter Salzton	T 4	4 - 10
Schwaden- und Tonflockensalz	Na 3	20
Anhydritmittelsalz	Na 3	25
Bändersalz	Na 3	15
Liniensalz	Na 3	30 - 60
Hauptanhydrit	A 3	15 - 90
Grauer Salzton	T 3	6 - 8
Kaliflöz Staßfurt	K 2	30 - 50
Staßfurtsteinsalz	Na 2	500 - 1000
Basalanhydrit	A 2	2,5
Stinkschiefer	Ca 2 st	5 - 10
Liegendes: Zechstein 1	Z 1	ca. 70

Das Kaliwerk Staßfurt ist aus der alten Saline in Staßfurt hervorgegangen, die im 12. Jahrhundert erstmals urkundlich erwähnt wurde, aber wahrscheinlich schon seit dem 9. Jahrhundert in Betrieb war. Nach einer Blütezeit bis zum 30jährigen Krieg ging ihre Bedeutung ständig zurück, bis sie Ende des 18. Jahrhunderts völlig verschuldet vom preußischen Staat gekauft wurde. Die gewonnene Sole hatte damals einen geringen Salzgehalt und eine in der Mitte des 19. Jahrhunderts in der Hoffnung gestoßene Bohrung, unter den Solquellen ergiebige Salzlager anzutreffen, zeigte außerdem einen großen Gehalt von Magnesiumchlorid und schwefelsaurem Magnesia. Trotz der Enttäuschung setzte der Geheime Oberbergrat v. Carnall (nach ihm wurde später das Salzmineral Carnallit benannt) das Abteufen von zwei Schächten zur bergmännischen Gewinnung von Steinsalz durch. Am 15.12.1851 begannen die Teufarbeiten am Kunstschacht v.d. Heydt und am 09.02.1852 am eigentlichen Förderschacht v. Manteuffel. Ab 1856 konnte das erste Steinsalz (Na2) gefördert werden und 3 Jahre später wurde die Siedesalzproduktion eingestellt.

Das über dem Na2 anstehende "bunte bittere Salz" wurde zunächst auf eine Abraumhalde verstürzt. Angeregt durch die Arbeiten Justus von Liebigs führte man Düngeversuche mit den Abraumsalzen durch und schickte Salzproben an verschiedene chemische Fabriken. Dem Staßfurter Chemiker Dr. Adolph Frank gelang es schließlich, aus Carnallit Kaliumchlorid zu gewinnen. Im Jahre 1861 erhielt er das entsprechende Patent und bemühte sich um den Aufbau einer chemischen Fabrik zur Herstellung von Kalisalz. Da die Abraumsalze bald verbraucht waren, wurde untertage ein Querschlag in Richtung Kalilager aufgefahren und ab dem 01.11.1861 konnte die erste Kalifabrik der Welt ihren Betrieb aufnehmen.

6.3 Ursachen der Laugeneinbrüche und -ausbreitung

Bezüglich der Wahl der Abbauparameter für den Kalibergbau mussten Erfahrungen aus dem Steinkohlen- und Steinsalzbergbau übertragen werden. Die Standfestigkeit des Kalisalzes wurde dabei überschätzt. Die Dimensionierung, d.h. die Festlegung der Abbaukammergrößen und Abmessungen der Pfeiler und Schweben für die steile Lagerung erfolgte zunächst empirisch. Eine erste wissenschaftliche Untersuchung des Deckgebirgsverhaltens über Kaliabbaufeldern wurde erst nach dem Gebirgsschlag auf der Grube Ludwig II im November 1901, bei dem 17 Bergleute den Tod fanden, von den Freiberger Professoren Spackeler und Kegel aufgenommen. Die ersten Probewürfel aus Salzgesteinen wurden daraufhin in der Königlichen Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt in Berlin-Charlottenburg geprüft und entscheidende Festigkeitsunterschiede zwischen Steinsalz, Sylvinit und Hartsalz einerseits sowie Anhydrit andererseits festgestellt.

Etwa 40 Jahre vor diesen Untersuchungen erfolgte in den Gruben des preußischen Fiskus v.d. Heydt und v. Manteuffel aus streichenden Ausrichtungsstrecken am Hangenden und Liegenden des Kalilagers die querschlägige Auffahrung von Abbaukammern mit Breiten von 8 bis 9 m und Höhen von 8 m. Die Pfeilerbreite betrug ca. 6 m. Es wurde zunächst kein Versatz eingebracht.
In der südlichen Grube Leopoldshall I/II des anhaltinischen Fiskus, die seit Januar 1863 den Betrieb aufgenommen hatte, wurde der querschlägige Firstenkammerbau sogar mit Abbauhöhen von 12,5 m realisiert. Als Schwebenmächtigkeiten zwischen verschiedenen Abbauetagen wurden etwa 6 m eingehalten, wobei die Pfeiler und Kammern übereinander lagen. Aus heutiger Sicht sind solche Abbauparameter im Carnallitit trotz der geringen Teufe von anfangs 250 m als nicht standsicher anzusehen.

Als weiteres potentielles Gefährdungsmoment kam hinzu, dass in der Grube Leopoldshall I/II verstärkt der wertstoffreiche und ohne Verarbeitung absetzbare Kainit in der Höhe des wasserführenden Deckgebirges abgebaut wurde. Der Kainitabbau ist später bergbehördlich untersagt wurden.
Nach 16 jähriger Betriebszeit zeigten sich in Leopoldshall I/II entsprechend der Schilderung in der FESTSCHRIFT (1952) erste Pfeilerzerklüftungen und Verschiebungen der Etagenschweben. Durch das Aufblättern und Brechen der Schweben vergrößerte sich der wirksame Schlankheitsgrad der Pfeiler beträchtlich über den ohnehin schon unzulässigen Wert von ca. 2 und es wurden Gebirgserschütterungen und Bodensenkungen festgestellt. In der nächsten Zeit stellten sich auch Lösungszuflüsse ein, die sich von anfangs 10 l/min auf 30 l/min steigerten. Am 14. und 17. August 1879 erfolgte schließlich der Zusammenbruch einer Abbaufläche von etwa 20 000 m² in der 2. bis 4. Etage. Die Ereignisse des 17. August sind in FULDA, D. (1992) folgendermaßen beschrieben: "Der gewaltigste Zusammenbruch geschah am Sonntag, den 17.08. gegen 10 Uhr. Dieser war von einem so gewaltigen, länger anhaltenden Getöse begleitet, dass sämtliche Häuser in Leopoldshall erbebten. Zuerst stürzte ein Teil des 4. Stockwerkes ein. Der Luftdruck war enorm. Alles in der Nähe Befindliche wurde zertrümmert. Die Wettertüren wurden herausgerissen, die eisernen Schienen wurden aufgerissen, krumm gebogen und fortgeschleudert. Im 4. Stock, wo der Zusammenbruch einsetzte, waren zum Glück gerade keine Arbeiter anwesend. In den anderen Stockwerken wurden die Arbeiter von ihren Wagen geschleudert."
Offensichtlich infolge des mit größerer Teufe steigenden Gebirgsdruckes wurden zuerst die Pfeiler von 14 benachbarten Abbauen in der 4. Etage zerstört und die Brucherscheinungen zogen dann über die z.T. übereinander liegenden Etagen bis zum 2. Stock. Noch gewaltiger waren die Zerstörungen im Südfeld der gleichen Grube, die am 23.12.1880 eintraten und infolge der Tagessenkungen und Gebäudeschäden zu enormer Unruhe führten. Die 5. Etage

war seitlich versetzt und infolgedessen zunächst nicht betroffen. Mit dem weiteren Abbau wurden die 6. und 7. Sohle ausgelassen und die Förderung nunmehr mit Abbauhöhen von 9 m in der 8. Etage wieder aufgenommen.
Das Oberbergamt Halle verfügte in Auswertung dieser Ereignisse ab dem 01.09.1884 die generelle Versatzpflicht für alle Kaliabbaue. Diese Vorschrift wurde in Staßfurt konsequent nur dort eingehalten, wo der spätere Firstenstoßbau dies erforderte und später in Deutschland durch Ausnahmeregeln in den meisten Fällen aufgehoben.
Ein Laugeneinbruch in der 9. Etage im März 1881 mit anfangs 360 l/min versiegte nach kurzer Zeit. Es wurde angenommen, dass es sich um ein geschlossenes Flüssigkeitsreservoir ohne Verbindung zur Tagesoberfläche handelte und der hangende Hauptanhydrit noch dicht ist. Die Pfeilerbrüche setzten sich jedoch fort und erreichten inzwischen eine Fläche von 200 000 m².
Die hierbei auftretenden Zuflüsse von etwa 370 l/min blieben längere Zeit auf diesem Niveau, jedoch mit abnehmender Salzkonzentration, und wurden von der Wasserhaltung beherrscht. Die Pfeilerbrüche klangen im Jahre 1882 aus. Im Hauptanhydrit wurden jedoch Bruchprozesse festgestellt und übertage kam es zu einem Tagesbruch von 25 m Durchmesser und einer Tiefe von 20 m. Einige Wohnhäuser und die Johanniskirche mussten gesperrt und abgerissen werden.
Da durch die Wasserzuflüsse weitgehende Lösungserscheinungen befürchtet wurden, fuhr man von der 1. Etage Strecken bis in den Hauptanhydrit auf und versuchte, diesen abzudichten. Das misslang (die Strecken blieben nicht dicht) genauso wie der Abdichtungsversuch im Salzton etwa 20 m über der 1. Etage. Auch das Versetzen der noch offenen Abbaukammen hatte keinen Einfluss auf die Zuflüsse. Diese erreichten 1897 etwa 1300 l/min und stammten entsprechend der durchgeführten Färbeversuche aus der Bode. Weiterhin wurde eine Verbindung mit den Grundwasserströmen nachgewiesen. Die übertägigen Niederschläge führten zu erhöhten Zuflüssen in der Grube, wobei die zeitliche Verzögerung immer kürzer wurde.
Die Zuflüsse konnten zwar lokal abgedichtet werden (dies wurde auch an vom Bodebett angeschnittenen Klüften im Gipssattel versucht), verstärkten sich dann aber an anderer Stelle. Nach einem weiteren Tagesbruch und Zuflusssteigerungen von 9 000 l/min bis 17 000 l/min im Jahre 1899, wobei täglich etwa $5 \cdot 10^3$ t Salz gelöst wurden (das entspricht einer durchschnittlichen Konzentration von ca. 200 g/l) konnten die Pumpen, die durch die mitgeführten Salze und Schlämme oft verstopften, die Wassermenge nicht mehr heben. Die Wasserhaltung wurde eingestellt, die Grubenbaue ersoffen und schon Anfang Juli 1900 standen die Wässer im Schacht im Grundwasserniveau von etwa 40 m unter Tage.

Die preußischen Gruben v.d. Heydt / v. Manteuffel mit der unmittelbar angrenzenden Grube Achenbach (Abbildung 6.1) waren von Leopoldshall I/II durch einen Sicherheitspfeiler getrennt,

der an seiner schwächsten Stelle in einer Teufe von etwa 265 m nur 28 m mächtig war. Dieser konnte die Ausbreitung der von Leopoldshall ausgehenden Druckerscheinungen bis zur Grube Achenbach nicht verhindern. Im Jahre 1880 kam es auch dort zum Zusammenbruch der alten Grubenbaue. Die Bodensenkungen blieben jedoch ohne Wassereinbrüche. Das Grubenfeld Achenbach war relativ klein und grenzte im Nordwesten an einen mächtigen Sicherheitspfeiler mit einer Mindestbreite von 150 m an. Weiterhin wurden sofort Versatzmaßnahmen eingeleitet. Durch den schmalen Sicherheitspfeiler von Leopoldshall traten ab Mai 1900, als der Laugenspiegel auf der Gegenseite bei 210 m Teufe stand, die ersten Wässer mit einigen tausend l/min in das preußische Grubenfeld. Eine aufwendige Wasserhaltung erschien auf Grund der anhaltinischen Erfahrungen sinnlos und die Schächte wurden im Oktober 1900 dem Ersaufen freigegeben. Im August 1901 drangen die Laugen in die Grube Achenbach und standen nunmehr vor dem Markscheidepfeiler zur Privatgewerkschaft Neustaßfurt. Da bekannt war, dass eine aufwendige Wasserhaltung gleichzeitig mit Lösungserscheinungen und infolgedessen mit übertägigen Einwirkungen verbunden ist und die Schäden im Stadtgebiet von Staßfurt und Leopoldshall nicht vergrößert werden durften, wurde auch die Grube Achenbach dem Ersaufen preisgegeben.

Im Südosten der nunmehr hydraulisch verbundenen drei Grubenfelder Leopoldshall I/II, v.d. Heydt / v. Manteuffel und Achenbach stand die Grube Leopoldshall III offen. Gegen diese war 1899 ein Damm gesetzt wurden, der aus verschiedenen Abschnitten bestand, die teils mit Magnesiazement und Ziegeln, teils mit Portlandzement ausgeführt waren. Er enthielt nach FULDA, D. (1992) zusätzliche Dichtelemente aus verkeilten Kiefernhölzern in 1 m Stärke sowie mehrere 5 cm starke Asphaltdichtungen. Auf der Wasserseite wurde eine 45 m lange Strecke mit Carnallitit versetzt und als Aufsättigungsbereich verwendet. Der Damm kam am 11.03.1900 unter Druck und erwies sich in der Folgezeit als vollkommen dicht. Die Grube Leopoldshall III ist im April 1922 über den Schacht ersoffen. Gegen den Schacht Leopoldshall VI wurde gleichfalls ein Dammbauwerk errichtet. Auch dieses blieb dicht, bis Leopoldshall VI im Jahr 1942 zur Einsparung der Unterhaltskosten stillgelegt wurde.

6.4 Der Bau der "Großen Mauer" im Markscheidepfeiler zu Neustaßfurt

Im Nordwesten stand gegen die Grube Hammacher-Agathe der Privatgewerkschaft Neustaßfurt ein Sicherheitspfeiler mit einer Mindestbreite von 150 m an. Im Teufenbereich von 270 m und 340 m bis 390 m war klüftiger Hauptanhydrit vorhanden (Abbildung 6.2), der von Hammacher-Agathe und Achenbach her aufgeschlossen war.
Bei einem Ansteigen der Laugen in Achenbach musste mit der Ausbreitung im klüftigen Hauptanhydrit und einem Übertritt nach Hammacher-Agathe gerechnet werden. Die Gefahr

wurde zunächst unterschätzt, da die vorhandenen Querschläge im Anhydrit ca. 2 km voneinander entfernt waren und häufig auch vollkommen ungeklüftete Partien anstanden. Trotzdem wurden in Achenbach eine leistungsfähige Wasserhaltung installiert und alle Abbaue mit Steinsalz versetzt. Die Förderstrecken blieben offen, um im Gefahrenfall die betreffenden Stellen erreichen zu können. Mitte November 1902, als der Laugenspiegel in Achenbach bei 300 m unter Tage stand, gab die erste Anhydritkluft im Schacht Hammacher in einer Teufe von 360 m nach. Aus der Lösungssäule von 60 m ergibt sich mit einer Wichte von 12 bis 13 kPa/m ein in Achenbach angreifender Lösungsdruck von 0,7 bis 0,8 MPa. Die mit 30 - 40 l/min austretende Zechsteinlauge hatte zunächst eine andere Beschaffenheit als in Achenbach. Mit der Eröffnung von weiteren Zuflusswegen in den nächsten Wochen näherten sich die chemischen Zusammensetzungen jedoch immer mehr an. Alle Zuflüsse wurden sofort gefasst und zusammen mit Endlaugen aus der Chlorkaliumfabrik zurück nach Achenbach geführt.

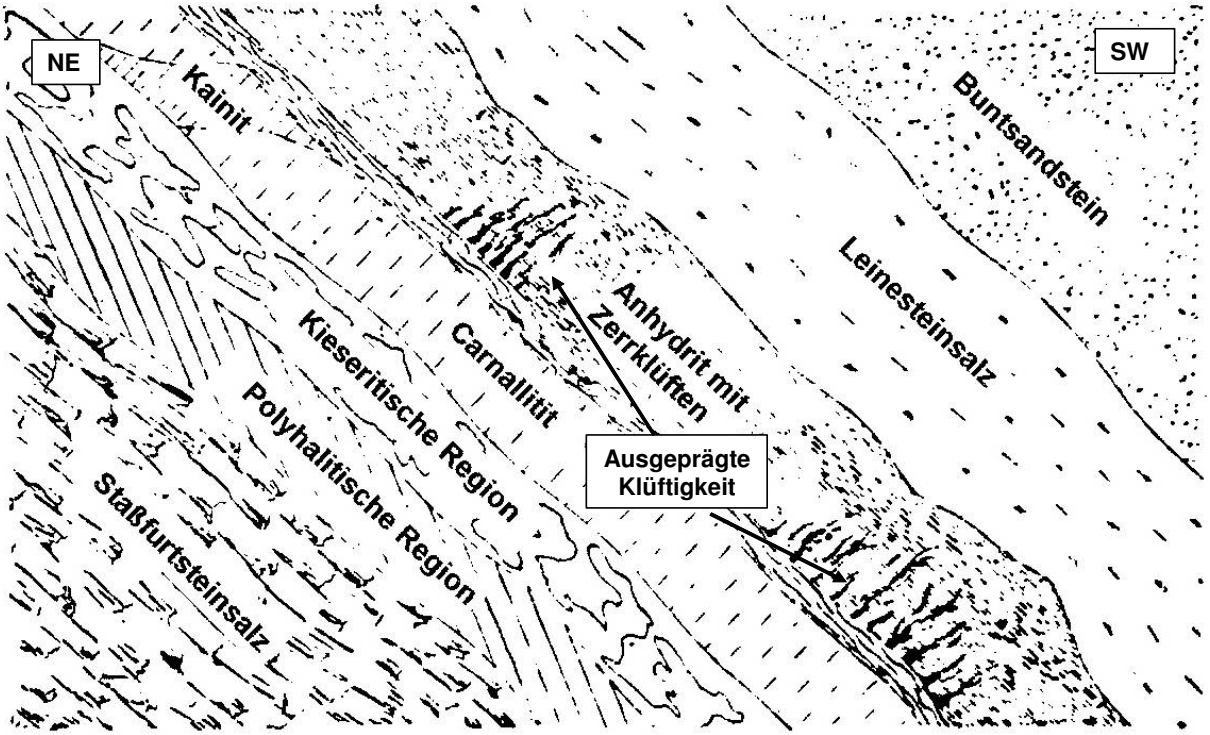


Abb. 6.2: Profil durch den Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe (Blickrichtung nach Südost, historische Aufnahme)

Die zunächst nur vereinzelten Zuflüsse und die auch anstehenden intakten Anhydritbereiche ermutigten die Werksleitung des Schachtes Hammacher, den gesamten klüftigen Bereich abzudichten und es wurde der Plan gefasst, im Markscheidepfeiler durch den Salzton, Hauptanhydrit und Teile des Leinesteinsalzes im Teufenbereich von 237 bis 300 m und 338 bis 390 m eine Mauer mit etwa 120 m Höhe, ca. 50 m querschlägiger Breite sowie 3 m Stärke zu

errichten. Die Mauer verteilt sich in vertikaler Richtung auf zwei Abschnitte im Bereich der stärksten Anhydritklüftigkeit (siehe Abbildung 6.2).
Bei der Auffahrung bestand die Gefahr, gespannte Laugen freizusetzen und deshalb wurden die Wasserhaltungsanlagen nochmals verstärkt und ein Vorratssumpf angelegt. Ab September 1903 begann die Auffahrung des umfangreichen Systems von Querschlägen und damit verbundenen Gesenken. Die Verwendung von Sprengstoff wurde vermieden und als Baustoff kamen Klinkersteine und Magnesiazement sowie Beton aus Portlandzement zur Anwendung.

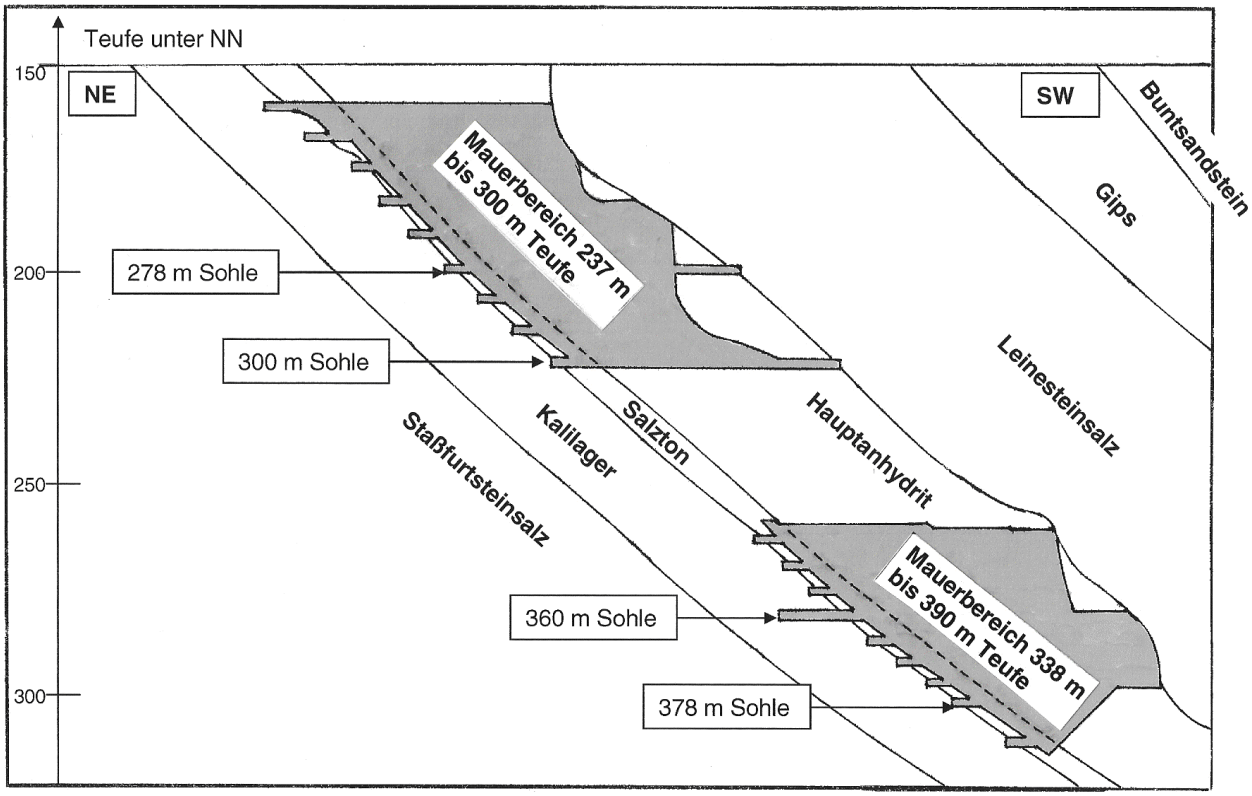


Abb. 6.3: Mauer in zwei Abschnitten im Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe (Blickrichtung nach Südost)

Beim Ausbruch des Anhydrits wurden umfangreiche Kluftmessungen durchgeführt, die nach BAUMERT, B. (1928) zeigten, dass die Klüfte an Anzahl und Ausdehnung in diesem Bereich mit fortschreitender Teufe zunahmen. Im oberen Teufenbereich waren sie mit Ton und Steinsalz gefüllt und mit zunehmender Teufe ging die Füllung in den leicht löslichen Carnallit über. Die Beobachtung, dass bei der Streckenauffahrung für den Mauerdamm eine Hauptlaugenkluft aktiv wurde und daraufhin alle Nebenklüfte versiegten, deutete darauf hin, dass die Kluftsysteme miteinander verbunden waren. Im Teufenbereich von 300 bis 337 m war der Anhydrit ungeklüftet und kein Ausbruch erforderlich (siehe Abbildung 6.3).
Nach 2 Jahren Bauzeit war die Mauer im November 1905 fertig gestellt. Die historische Fotografie in Abbildung 6.4 vom 28.01.1905 vermittelt einen Eindruck von dem Bauwerk.

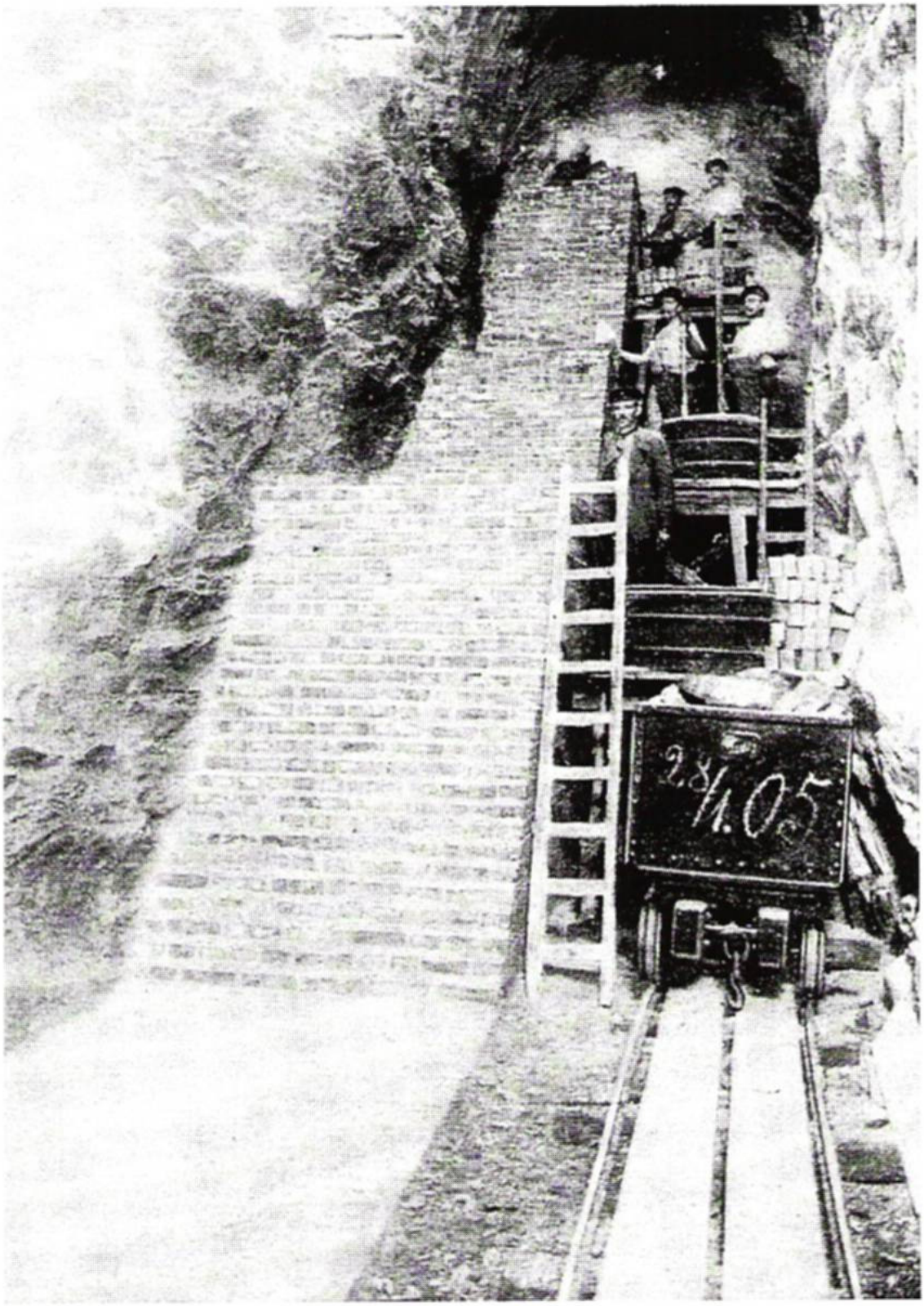


Abb. 6.4: Bauarbeiten an der „Großen Mauer“ im Markscheidepfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe im Januar 1905

Die Zuflüsse wurden, um die Bauarbeiten nicht zu behindern, über in die Mauer eingebaute Rohre abgeleitet und waren in dieser Zeit mit dem Ansteigen des Wasserspiegels in Achenbach auf 665 l/min gestiegen. Nach dem Aushärten der Mauer und dem Schließen der Abflussrohre waren die oberen Mauerteile dicht. Die unteren Partien bei 340 - 390 m ließen zunächst etwa 40 l/min durch, die bis November 1906 auf 236 l/min anstiegen. Durch 2 Übertagebohrungen bis in den Anhydrit wurde mit Tonschlämmungen und gesättigten Chlorkalium- und Chlornatriumlaugen versucht, die Zuflüsse abzudichten. Der Ton dichtete anfangs ab, wurde später aber wieder ausgespült. Man vermutete, dass trotz der sorgfältigen Bauausführung die Mauer vom Gebirge abgerissen war und die Laugen sich hier ihren Weg suchten. Um die Öffnungsweite der Fließwege im Anhydrit festzustellen, wurde in die Übertagebohrungen Sägemehl und grob zerkleinerte Braunkohle geschlämmt. Das gesamte Sägemehl und die Braunkohlenstücke bis zu einem Durchmesser von 8 mm waren im Hammacher-Schacht wieder zu sehen. Die Abdichtung mit Ton erschien nun sinnlos und man versuchte, mit den gesättigten Laugen ein Ausscheiden von Gips und Steinsalz auf den Klüften zu erreichen. Scheinbare Teilerfolge blieben jedoch nicht von Dauer und durch eine untertägige Auffahrung stellte man fest, dass der Hauptteil der Laugen durch ein Kluftsystem unterhalb der Mauer aus Richtung Achenbach übertrat. Der unvermauerte Anhydritteil im Teufenbereich 300 - 338 m blieb dagegen trocken.

Dass auch tiefer liegende Kluftsysteme im Hauptanhydrit aktiviert wurden, musste man in Neustaßfurt in einer einfallenden Förderstrecke zur 750 m Sohle feststellen. In einer Teufe von 600 m trat im Januar 1905 eine Urlauge mit einer Konzentration von 35,8 % $MgCl_2$ (die Flutungslauge in Achenbach besaß 22 % $MgCl_2$) aus. Die Konzentration blieb 2 Jahre bei abnehmender Zuflussmenge konstant, bis sie sich plötzlich der Konzentration der Flutungslauge immer mehr näherte und die Zuflussmenge anstieg. Offensichtlich war in dieser Zeit der Carnallit auf den Klüften gelöst worden und stellte nun keinen Widerstand mehr dar. Im April 1908 flossen 600 l/min zu und wurden zum Agathe-Schacht geleitet. Um die Laugen zu fassen, brach man über der Zuflußstelle in das Hangende ein und erreichte den stark zerklüfteten Anhydrit. Die Zuflüsse über die Klüfte, vorbei an Carnallitresten, waren deutlich zu erkennen und konnten aufgefangen und abgeleitet werden. An eine Abdichtung eines so weit verzweigten Kluftsystems sowohl im Bereich der Mauer als auch im Teufenbereich von 600 m war aber nicht mehr zu denken. Die Laugen wurden nur noch abgefangen und in den Achenbachschacht zurückgeleitet, wobei die Kosten bald nicht mehr beherrschbar waren. Im Jahre 1910 (die Zuflussmenge betrug inzwischen 6 800 l/min) wurde deshalb die Entscheidung gefällt, auch die Gruben in Neustaßfurt allmählich dem Ersaufen preiszugeben. Im April 1911 war aber auch dieser Entschluss hinfällig. Der Flüssigkeitsspiegel in Achenbach stieg plötzlich auf 40 m untertage und fiel in der Grube Leopoldshall I/II um 10,8 m. Dieses Ereignis deutete

man als Bruch des Markscheidepfeilers zwischen der anhaltinischen und der preußischen Grube. Die Zutrittsmenge in Neustaßfurt stieg auf 10 000 l/min und am 19. Februar 1912 wurde der Betrieb eingestellt. Der größte Teil der Staßfurter Südwestflanke war damit hydraulisch verbunden, es stellte sich ein gleichmäßiges Laugenniveau ein.

Ob in Abhängigkeit von der geologischen Ausbildung und dem Festigkeitsverhalten der anstehenden Gesteine, insbesondere des geklüfteten Hauptanhydrits, eine Abdämmung überhaupt möglich gewesen wäre, soll in den nachfolgenden Modellrechnungen untersucht werden.

6.5 Gegenwärtige Situation am Staßfurter Sattel

Auch das Absaufen von Friedrichshall an der Nordostflanke (Abbildung 6.1) ist dem klüftigen Hauptanhydrit und Grauen Salzton zuzuschreiben: An Streckenfirsten im Bereich der Kainitbaue mit streichenden Längen von 50 - 200 m und querschlägigen Breiten von 15 - 20 m traten 1934 erste Laugen aus. Sie stammten aus dem Salzton und wurden zunächst aufgefangen. Unter- und übertägige Bohrungen zur Erkundung der Zuflusswege und zur Abdichtung blieben bzgl. der Abdichtung genau so erfolglos wie an der Staßfurter Südwestflanke. Die Verbindung zum klüftigen Gipshut konnte ebenfalls nachgewiesen werden. Nach jahrelanger Wasserhaltung, die durch Kriegseinwirkungen zeitweise unterbrochen wurde, musste die Grube 1950 dem Ersaufen überlassen werden.
Während die zu große Dehnung der Salzton- und Anhydritschichten in Friedrichshall über die Dauer von Jahren Fließwege über das Na3-Ausgehende bis zu den Grundwasserleitern eröffnet hat, führte der Gebirgsschlag in Ludwig II im November 1901, bei dem 17 Bergleute tödlich verletzt wurden, auf Grund der ausreichenden Leinesteinsalzüberdeckung zu keinen Wasserflüssen. Als weiteres Beispiel für die entscheidende Trag- und Dichtfunktion des hangenden Leinesteinsalzes ist Neustaßfurt VI/VII zu nennen, wo die Brucherscheinungen im Steilfirstenbau ab 1959 unter ausreichender Steinsalzüberdeckung bis zum gelenkten Fluten zu keinen Zuflüssen führten. Die zu hohe gebirgsmechanische Beanspruchung des T3/A3 mit den folgenden Festigkeitsüberschreitungen zieht offenbar erst dann auch Wasserzuflüsse nach sich, wenn gleichzeitig die Leinesteinsalzschutzschicht fehlt. Langjährige Wasserhebungen aus der Grube verschlimmern dann noch die Situation, führen zu Tagesbrüchen und gefährden benachbarte Gruben, die über Sicherheitspfeiler von der absaufenden Grube getrennt sind. Dies wird sichtbar, wenn man vergleicht, dass der Mindestabstand der Grubenbaue von Friedrichshall zu Ludwig II mit 164 m nur gering größer als von Achenbach zu Neustaßfurt mit 150 m war. Klüftiger Hauptanhydrit steht nachgewiesenermaßen auch an der Nordostflanke an und auch die Abbauparameter und Teufenbe-

dingungen sind vergleichbar. Die Dichtheit des Pfeilers zu Ludwig II über mehr als 20 Jahre ist damit zu begründen, dass

- kein Wasserkreislauf am Pfeiler durch aufwendige Hebungsmaßnahmen in Gang gebracht wurde und
- die klüftigen T3/A3-Partien beim Abdichtungsversuch nicht aufgefahren und dadurch nicht zusätzlich entspannt und hydraulisch aktiviert wurden.

Die an der Nordostflanke des Staßfurter Sattels bis zum Anfang der 70er Jahre noch betriebenen Gruben Ludwig II, Berlepsch-Maybach und Neustaßfurt VI/VII wurden in einem aufwendigen Projekt in Anwendung der nun vorliegenden Erfahrungen und mit messtechnischer Kontrolle gelenkt geflutet. Die Grubenbaue lagen z.T. direkt unter der Stadt Staßfurt und waren hydraulisch latent gefährdet.
In Vorbereitung der Flutung wurden von übertage eine Tiefbohrung in den nördlichen Steinsalzbereich der Schachtanlage Neustaßfurt VI/VII sowie 2 untertägige Bohrungen durch die Markscheidesicherheitspfeiler zu Berlepsch-Maybach bzw. zu Ludwig II gestoßen. Die über eine Leitung vom Solfeld Bernburg herangeführte NaCl - vorgesättigte Sole sollte die Anlösung der Bohrung und des unmittelbaren Eintrittsbereiches verhindern und nach etwa 200 m Strömungsweg in die Carnallititkammern gelangen. In diesen Grubenbauen weit außerhalb des Stadtgebietes erfolgte die $MgCl_2$ - Aufsättigung und die Durchgangsbohrungen in die südlichen Grubenfelder waren so gelegt, dass erst im aufgesättigten Zustand ein Laugenübertritt möglich war. Seismische Aktivitäten blieben dabei auf den nördlichen Teil von Neustaßfurt VI/VII beschränkt. Das Stadtgebiet konnte bis zum Flutungsabschluss im Jahr 1979 nahezu senkungsfrei gehalten werden, über den Grubenbauen traten von 1973 bis 1980 etwa 40 mm Senkung auf. Insgesamt wurden ca. $18 \cdot 10^6$ m^3 NaCl - Sole eingeleitet. Ein Tagesbruch am 18.03.1975 über dem Neustaßfurter Grubenfeld außerhalb der Stadt kann nach SEIFERT, G., U.A. (1992) sowohl einem geologisch-hydrologisch als auch geomechanisch exponierten Bereich zugeordnet werden.

Die Nordostflanke des Staßfurter Sattels wird seitdem als erfolgreich verwahrt angesehen. Neuere wissenschaftliche Untersuchungen bezogen sich auf das Bergschadensgebiet Staßfurt an der Südwestflanke mit einer Bewertung und Prognose der Lösungs- und Senkungsvorgänge. Entsprechend SEIFERT, G., U.A. (1992) sind durch die Lösungsprozesse beim Absaufen und während des jahrelangen Pumpenbetriebes mindestens die gleichen Hohlraumvolumina geschaffen worden wie infolge der Salzgewinnung. Die gegenwärtige Zunahme der Senkungsmulde pro Jahr entspricht etwa $1^0/_{00}$ des untertägigen Hohlraumes. Das ist eine Größenordnung, die mit dem Konvergenzprozeß der gefluteten Grubenbaue

sowie den bis zur Gegenwart im Stadtgebiet Staßfurt stattfindenden Subrosionsprozessen erklärbar ist.
Abgeteufte ingenieurgeologische Erkundungsbohrungen an der Staßfurter Südwestflanke bis in die ehemaligen Grubengebäude zeigten das Carnallititlager als wabenartig porös. Der Hauptanhydrit und Graue Salzton, das Steinsalz sowie der Untere Buntsandstein waren stark zerrüttet und mit $MgCl_2$-Laugen gesättigt. Es war eine deutliche Dichtezunahme der Laugen mit steigender Teufe festzustellen. Mit Temperaturmessungen wurde indirekt festgestellt, dass im Grubengebäude wahrscheinlich gegenwärtig noch Lösungsvorgänge stattfinden und Strömungen vorhanden sind. Eine Häufung seismischer Ereignisse mit geringer Energie ist im Bereich der Markscheide zwischen den Gruben Leopoldhall I/II und v.d. Heydt / v. Manteuffel nachweisbar.
Für eine Verstärkung der latenten Bruchgefahr infolge des Nachgebens von untertägigen Tragelementen bzw. durch Subrosionsvorgänge wurden keine Anzeichen gefunden, eine seismische und hydrologische Überwachung und Senkungserfassung aber als unerlässlich angesehen.

6.6 Gebirgsmechanische Modellierung der Auffahrung und Flutung der Gruben am Markscheidesicherheitspfeiler unter Berücksichtigung der Kluftintegrität

6.6.1 Lösungsweg und Ziel

Die Modellrechnungen wurden mit dem Programm FLAC, Version 5.0 (ITASCA (2005)) in folgenden Bearbeitungsschritten durchgeführt:

<u>Ebenes Vertikalmodell quer zum Sattel</u>

- Nachbildung der 20jährigen Standzeit (1883 - 1903) der Grubenbaue des Achenbach- und Hammacher-Agathe-Schachtes unmittelbar südöstlich und nordwestlich des Markscheidesicherheitspfeilers.
- Modellierung der Auffahrungen im Hauptanhydrit (1903 - 1905) zum Bau der "Großen Mauer".
- Standzeit der Grubenbaue im lufterfüllten Zustand (1905 - 1912) bis zum Absaufen im Jahr 1912.
- Berechnung des Hohlraumkonvergenzprozesses und der Kluftbeanspruchung über einen Zeitraum von 11 Jahren nach dem Absaufen bis 1923 (Gesamtdauer der berechneten Bergbaugeschichte 40 Jahre).
- Vergleich des berechneten Konvergenzprozesses mit In-situ-Beobachtungen.

Ebenes Vertikalmodell streichend zum Sattel

- Nachbildung der 20jährigen Standzeit (1883 - 1903) der Grubenbaue des Achenbach- und Hammacher-Agathe-Schachtes unmittelbar südöstlich und nordwestlich des Markscheidesicherheitspfeilers.
- Berechnung der Kluftbeanspruchungen im Markscheidepfeiler und Überprüfung, ob ein Integritätsverlust gebirgsmechanisch belegt werden kann.

Die geologische Situation am Standort des Markscheidesicherheitspfeilers zwischen der Grube Achenbach im Südosten und Hammacher-Agathe im Nordwesten (siehe Abbildung 6.1) wurde aus den Abbildungen 6.2 und 6.3 übernommen. Diese Schnitte liegen querschlägig zum Sattel bei einer Blickrichtung nach Südost.

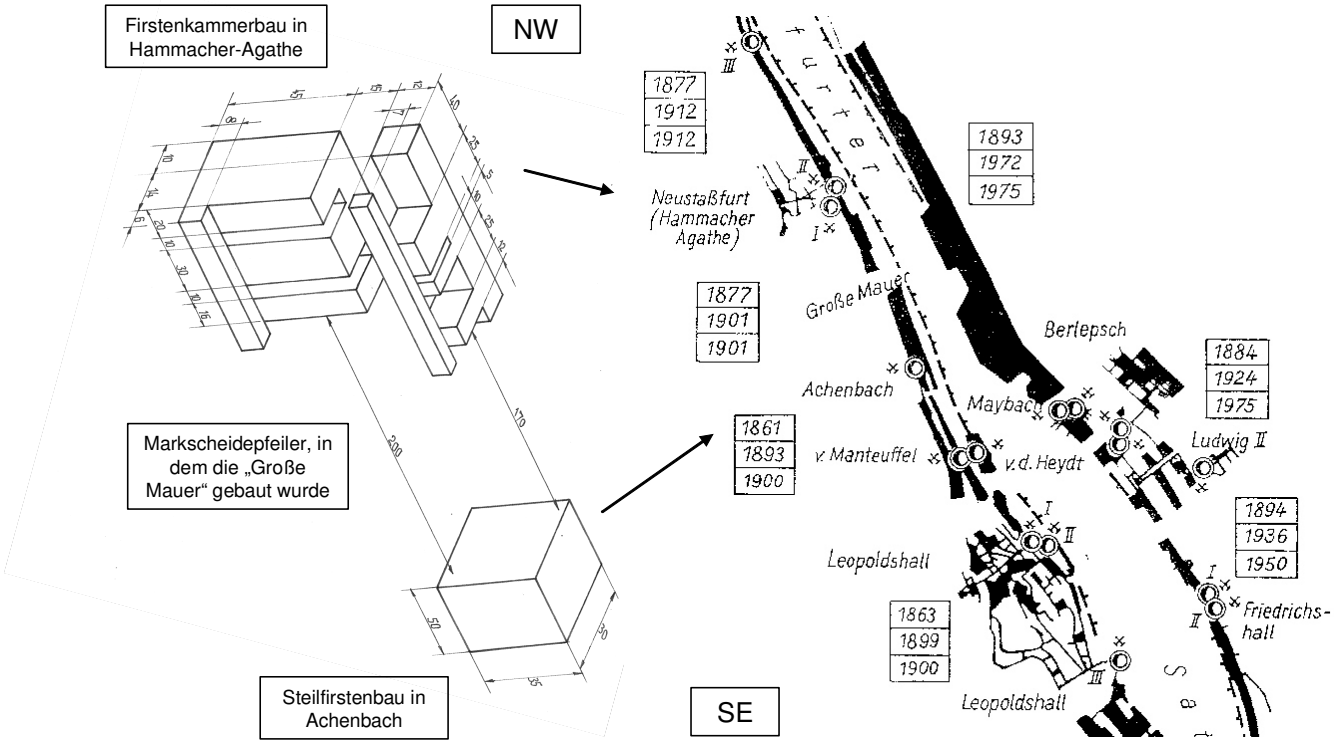


Abb. 6.5: Am Markscheidepfeiler angrenzender Firstkammerbau der Grube Hammacher-Agathe und Steilfirstenbau der Grube Achenbach (Abmessungen in m)

Die am Markscheidepfeiler angrenzenden Abbaue der Grube Hammacher-Agathe (Firstkammerbau) sowie der Grube Achenbach (Steilfirstenbau) wurden entsprechend des Risswerkes grob vereinfacht dreidimensional gezeichnet und danach für die Abbildung 6.5 in

die Richtung NW-SE gedreht, so dass eine Zuordnung zur Übersicht der Abbildung 6.1 möglich ist. Die Grubenbaue lagen im Kalilager in unmittelbarer Nachbarschaft zum stark geklüfteten Anhydrit und verursachten eine Entspannung der hangenden Klüfte im Grauen Salzton T3 und Hauptanhydrit A3, die sich mit den Auffahrungen für den Bau der „Großen Mauer“ direkt im Anhydrit der Markscheide in streichender Richtung zwischen diesen Abbaukammern vermutlich vergrößerte.

Das Ziel der Modellrechnungen bestand nicht in einer gebirgsmechanischen Modellierung des damaligen Kalibergbaus, sondern in der Untersuchung des Festigkeitsverhaltens der Klüfte im Salzton T3 und Anhydrit A3. Es sollte bewertet werden, ob es infolge der Hohlraumwirkung im Markscheidepfeiler zu Entspannungen und Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften kommen konnte, die zur Bildung von Transportpfaden beitrugen. Für die Modellierung des Stoffverhaltens von Steinsalz und Carnallitit kamen deshalb einfache Kriechansätze ohne Kopplung mit einem Entfestigungs- und Dilatanzanteil zur Anwendung. Zur Überprüfung der Rechenergebnisse standen ohnehin nur die in der Literatur genannten integralen Tagesoberflächenabsenkungen zur Verfügung.
Angesichts der strukturgeologischen Beschreibung des Anhydrits (Zerrklüfte, hoher Zerlegungsgrad, siehe Abb. 6.2) wurden für die Kluftfestigkeiten im A3 und T3 Parameter verwendet, die eine signifikante Abminderung der Gesteins- auf die Gebirgsfestigkeit beinhalteten. Eine solche Abminderung auf der Basis ingenieurgeologischer Befunde ist notwendig und wurde auch an anderen Standorten, siehe z.B. KAMLOT, P.; U. A. (2006), mit vergleichbaren Bedingungen (aufgewölbter Sattel mit tektonischer Strukturierung, hoher Auffahrungsgrad, lange versatzfreie Standzeit, geringer Abstand der Abbaue zum Deck- und Nebengebirge) nachvollziehbar praktiziert.
Die beiden verwendeten Rechenmodelle entsprechend der querschlägigen und streichenden Vertikalschnitte im Bereich des Markscheidepfeilers sollten sich gegenseitig ergänzen. Während mit dem querschlägigen Modell die gesamte Bergbaugeschichte bis in die Nachbetriebsphase nach der Flutung mit dem Ziel eines Vergleichs der Rechenergebnisse mit In-situ-Messwerten nachvollzogen wurde, diente das streichende Modell vorrangig dem Beleg der Festigkeitsüberschreitung in den Klüften des Markscheidepfeilers über eine Entfernung zwischen den Abbauen von Achenbach und Hammacher-Agathe von etwa 180 m.

6.6.2 Stoffverhalten und Materialparameter

In den Modellen wurden folgende Stoffgesetze für die Gebirgsschichten vorgegeben:

- Staßfurtsteinsalz Na 2 (Norton-Kriechen)
- Staßfurtcarnallitit K2 (Norton-Kriechen)

- Grauer Salzton T3 (Elastoplastizität mit Festigkeitsgrenze Mohr-Coulomb)
- Hauptanhydrit A3 (Elastoplastizität mit Festigkeitsgrenze Mohr-Coulomb)
- Leinesteinsalz Na3 (Norton-Kriechen)

Die Materialparameter konnten aus SALZER, K. (1995) bzw. den hier vorgelegten Untersuchungen am Anhydrit und Salzton übertragen werden. Die Kriechparameter für Steinsalz und Carnallitit entsprechen eigenen Untersuchungen für den Standort Asse (KAMLOT, P.; U. A. (2006)), bzw. den BGR-Ansätzen, wobei für den Carnallitit eine Anpassung des Vorfaktors an die in SEIFERT, G., U.A. (1992) genannten Tagesoberflächenabsenkungen erfolgte.
Es kamen zur Anwendung:

Tabelle 6.2: Elastische und Kriechparameter der Gebirgsschichten

	ρ (g/cm^3)	**E (GPa)**	**ν**	**n**	**A**
Steinsalz	2,15	25	0,25	5	$5 \cdot 10^{-11}$ MPa^{-5}·d^{-1}
Carnallitit	1,7	10	0,3	3	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$ MPa^{-3}·d^{-1}
Grauer Salzton	2,55	27	0,3		
Hauptanhydrit	2,9	66	0,3		

Tabelle 6.3: Festigkeitsparameter im Hauptanhydrit und Grauen Salzton

	Reibungswinkel (Grad)	**Kohäsion (MPa)**	**Zugfestigkeit (MPa)**
Hauptanhydrit	41	13	1
Grauer Salzton	37	5	1

Als Festigkeitsparameter für die Klüfte im T3 und A3 kamen abgeminderte Gebirgsfestigkeitsparameter zur Anwendung. Diese wurden aus KAMLOT, P.; U. A. (2006) übertragen und entsprechen dort Restfestigkeitsparametern der Schichtflächen im Rötanhydrit sowie der Festigkeit von weit reichenden, diskreten Trennflächen.
Bezüglich der Kluftsteifigkeiten wurde Bezug genommen auf vergleichbare Modellrechnungen, wie z.B. in AHOLA, M. P.; MOHANTY, S.; MAKURAT, A. (1996) verwendet:

Tabelle 6.4: Festigkeiten und Steifigkeiten der Klüfte

	Reibungswinkel der Kluft (Grad)	**Kohäsion der Kluft (MPa)**	**Kluftsteifigkeit (GPa/m)**
Hauptanhydrit	28	0	18
Grauer Salzton	28	0	10

6.6.3 Beschreibung des querschlägigen Modells sowie der Rechenergebnisse

Es wurde ein ebenes Modell erstellt, welches identisch zu den Abbildungen 6.2 und 6.3 querschlägig zum Sattel liegt. Mit der Festlegung des ebenen Deformationszustandes wird für die geologischen Schichten, Kluftsysteme und Hohlräume in der Richtung normal zur Betrachtungsebene, also in streichender Richtung, eine wesentlich größere Erstreckung vorausgesetzt als senkrecht dazu. Die Stratigraphie und die Klüfte im T3 und A3 sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Größe der Abbaukammern ergibt sich als geometrischer Mittelwert der unmittelbar benachbarten Abbaue am Markscheidepfeiler aus Abbildung 6.5
Das Modell besitzt eine Breite von 230 m und eine Höhe von 250 m. Die Modelloberkante befindet sich in einer Teufe von 158 m und die Modellunterkante bei 408 m. Die Unterkante ist vertikal und die seitlichen Begrenzungen sind horizontal fixiert. Normal zur Oberkante wirkt eine Normalspannung in Höhe des Teufendruckes von 3,8 MPa. Die Kammern sind etwa 25 m breit und 13 bis 40 m hoch. Die Schwebenmächtigkeiten betragen 20 und 30 m.
Aussagen zur Häufigkeit und Orientierung der Klüfte im Grauen Salzton und Hauptanhydrit am Staßfurter Sattel sind in der Arbeit von FLEISCHER, S. (1960) enthalten bzw. wurden von SCHWANDT, A., U.A. (1991) zusammengefasst. Danach erfasst das Trennbruchinventar den Hauptanhydrit in allen Zonen nahezu gleichmäßig. Die Rissbildung endet im Regelfall an den inkompetenten Zonen der Schwarzen Tonlage im Hangenden und am Grauen Salzton im Liegenden. Neben den Trennbrüchen werden auch Scherbrüche beschrieben, die wie diese meist parallel zum Sattelstreichen ausgerichtet sind. Die Klüfte können aber auch steilherzyn, flachherzyn, rheinisch und erzgebirgisch streichen, wobei keine Richtung dominiert. Oft wurden neben Hauptkluftscharen auch Nebenkluftscharen angetroffen, die im Winkel von 40 bis 70 Grad dazu liegen. Im Modell in Abbildung 6.6 wurden eine streichende Doppelkluft, die unter einem Winkel von 45 Grad nach SW einfällt, und eine streichende vertikale Einzelkluft nachgebildet. Infolge des Isoflächenplots sind die Klüfte sehr breit dargestellt, tatsächlich grenzen die Kluftufer unmittelbar aneinander. Die Abstände zum Kalilager sind, um die höchsten gebirgsmechanischen Beanspruchungen in der unmittelbaren Nähe der Abbaue zu erfassen, konservativ mit 1,5 und 9,5 m festgelegt. Die Kreuze zeigen die Schichtgrenze A3/Na3 bzw. die Kammerkonturen.

In Abbildung 6.6 ist der Hauptspannungsaufbau im Jahr 1903 nach einer etwa 20jährigen Standzeit der Abbaukammern ohne Versatz dargestellt. Er repräsentiert beide Seiten des Markscheidepfeilers. Die Blickrichtung in der Abbildung ist SE. In der Darstellung der maximalen Hauptnormalspannung lässt sich sehr gut die infolge des Kriechprozesses und Belastungsaustausches zwischen Kalilager, Steinsalz und Hauptanhydrit realisierte Spannungserhöhung an der Hauptanhydritoberkante erkennen.

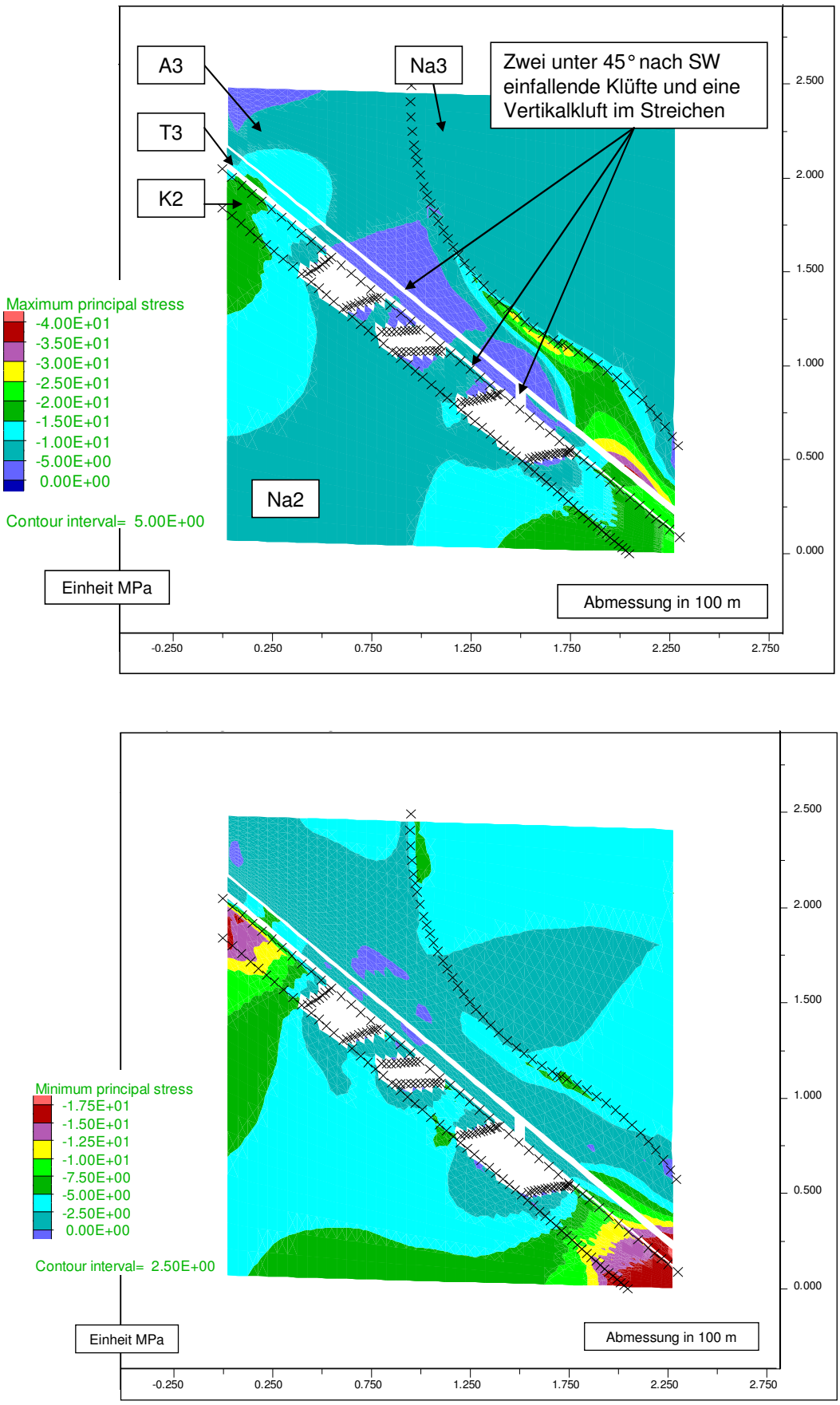


Abb. 6.6: Maximale (oben) und minimale Hauptspannungen (unten) in MPa im Bereich der Abbaue auf beiden Seiten des Markscheidepfeilers nach 20 Jahren Standzeit

Die Maximalspannung an der Oberkante des Anhydrits liegt zwischen 30 und 35 MPa und damit bei einer minimalen Druckeinspannung von etwa 5 MPa deutlich unter der Festigkeitsgrenze. Die Schichten des T3 und A3 im Hangenden der Abbaukammern sind dagegen im Bereich der Klüfte deutlich entlastet. Die Maximalspannung ist kleiner als 5 MPa und die Minimalspannung erreicht Werte von Null bis 2,5 MPa.

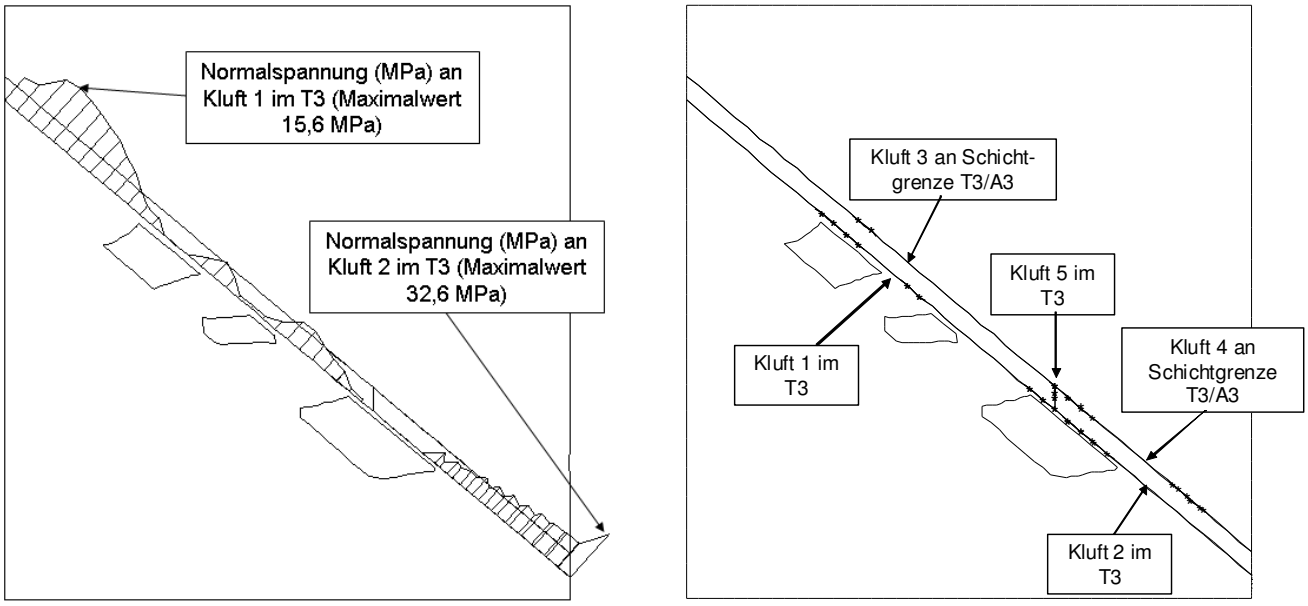


Abb. 6.7: Normalspannungen in MPa in den Klüften 1 und 2 im Salzton (links, Spannungsverläufe auf den Maximalwert normiert) und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in allen Klüften (rechts), 20 Jahre Standzeit

Die geringe minimale Druckeinspannung der Klüfte wird auch mittels der berechneten Normalspannungen in den Klüften im linken Teil der Abbildung 6.7 ausgewiesen. In der Abbildung sind die Normalspannungen in den unmittelbar zu den Kammern benachbarten Klüften 1 und 2 im Salzton zu sehen. In der Nähe der Abbaukammern kommt es zu einer nahezu vollständigen Absenkung der Normalspannung, die auch in den weiter entfernten Klüften eine Festigkeitsüberschreitung (rechter Teil der Abbildung 6.7) verursacht. Ob sich eine solche Festigkeitsüberschreitung auch streichend in Richtung des Markscheidepfeilers fortsetzt, muss mit dem streichenden Rechenmodell untersucht werden.

Die Gesteinsfestigkeiten im Hauptanhydrit und Grauen Salzton gemäß Tabelle 6.3 werden nicht überschritten. Die Kluftöffnung erreicht 1 bis 4 mm und erstreckt sich bis zum Modellrand. Eine Zugfestigkeit wurde für die Klüfte nicht vorgegeben.

Ein Vergleich mit Festigkeitswerten des Carnallitits zeigt, dass in den Schweben die langzeitliche Beanspruchungsgrenze erreicht ist. Diese Schwebenmächtigkeiten von 20 bzw. 30 m können bei den gegebenen Teufen- und Abbaubedingungen demzufolge als gerade noch zulässig angesehen werden. Für die z.T. am Staßfurter Sattel auch gebauten Schwebenmächtigkeiten von 6 m trifft das in diesen Teufen keinesfalls zu.

Die Senkungsgeschwindigkeit der Modelloberkante beträgt etwa 32 mm/a. In SEIFERT, G., U.A. (1992) findet sich für die unmittelbar südlich gelegenen Gruben v.d. Heydt / v. Manteuffel für die Zeit vor dem Absaufen eine Angabe von 600 mm in den Jahren 1883 bis 1900. Damit ergibt sich ein Mittelwert von 35 mm/a, der den Rechenwert bestätigt.

Die Auffahrungen im Hauptanhydrit in den Jahren 1903 bis 1905 zum Bau der „Großen Mauer“ wurden danach im Rechenmodell mit einer auf den ebenen Deformationszustand bezogenen volumenäquivalenten Hohlraumschaffung simuliert und anschließend bis zum Jahr 1912 (Standzeit ab Auffahrung 29 Jahre) die trockenen Hohlraumkonvergenzen weitergerechnet. Unter „Volumenäquivalenz“ wird verstanden, dass die Volumen der beiden Mauerabschnitte in der Teufe 237 bis 300 m (Höhe 63 m) sowie in der Teufe 338 bis 390 m (Höhe 52 m) mit querschlägigen Erstreckungen von jeweils ca. 50 m und Mauerstärken (streichend) von 3 m berechnet und auf die streichenden Abmessungen der Kammern am Markscheidepfeiler (siehe Abbildung 6.5) bezogen wurden. Diese Volumenumrechnung simuliert eine äquivalente Hohlraumentspannungswirkung, ist aber nur für die unmittelbar an der Markscheide angrenzenden Abbaue gültig.

Der Hauptspannungsaufbau im Jahr 1912 in Abbildung 6.8 zeigt gegenüber Abbildung 6.6 eine geringe Spannungserhöhung an der Hauptanhydritoberkante. Die Maximalspannungen in der Umgebung der Abbaue haben sich kaum geändert, jedoch ist es infolge der Auffahrungen für den Mauerbau zu einer Absenkung der Minimalspannung gekommen. Die Verringerung der minimalen Druckeinspannung spiegelt sich in Abbildung 6.9 auch in den abgesenkten Normalspannungen in den Klüften im Salzton wider und führte zu einer zunehmen Festigkeitsüberschreitung in allen Klüften. Die Auffahrungen im Anhydrit besaßen offensichtlich eine gebirgsmechanisch ungünstige Wirkung.

Die Gesteinsfestigkeiten im Hauptanhydrit und Grauen Salzton gemäß Tabelle 6.3 werden auch jetzt nicht überschritten. Die Kluftöffnung von 1 bis 4 mm erhöht sich gleichfalls nur geringfügig.

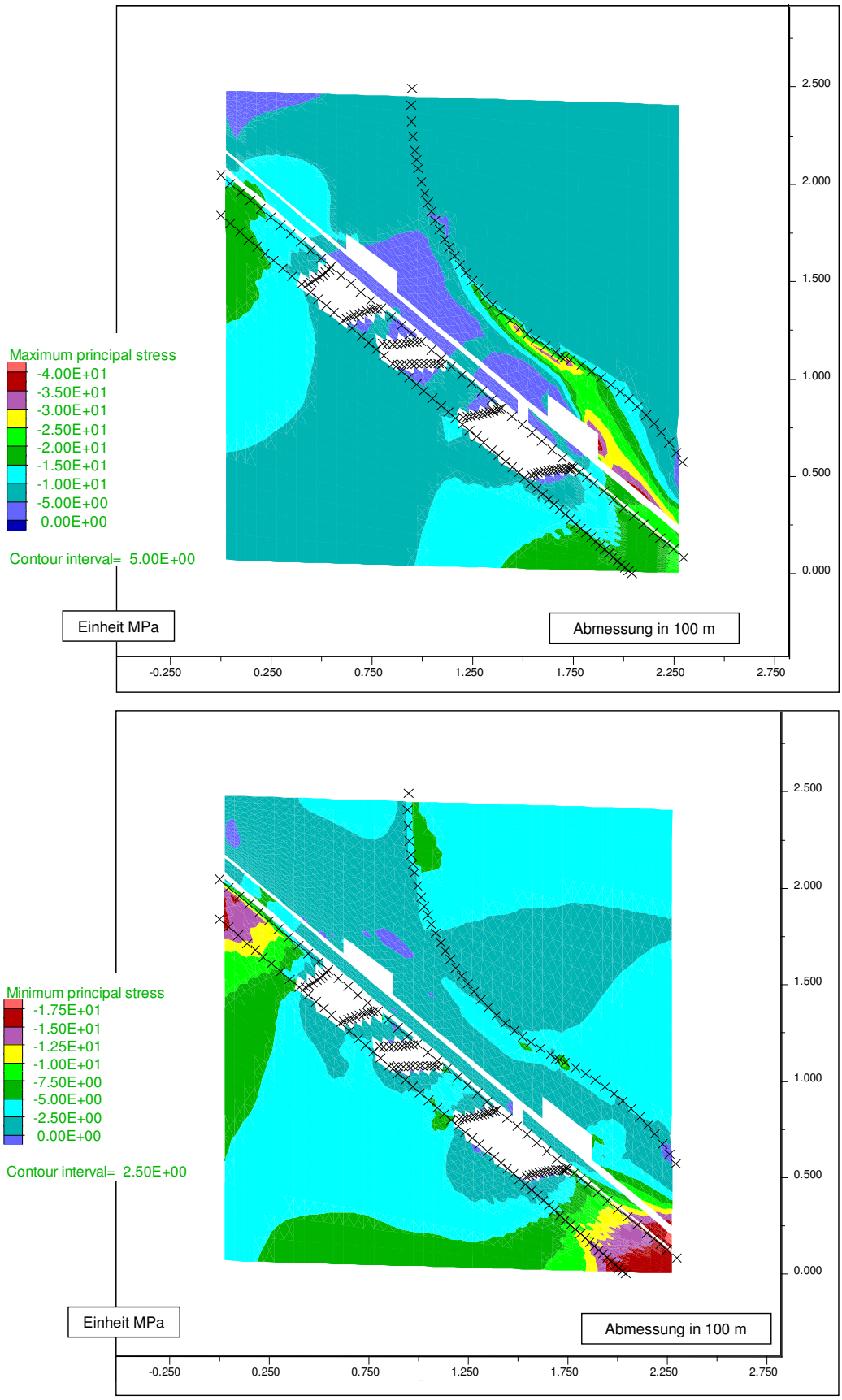


Abb. 6.8: Maximale (oben) und minimale Hauptspannungen (unten) in MPa im Bereich der Abbaue auf beiden Seiten des Markscheidepfeilers nach 29 Jahren Standzeit

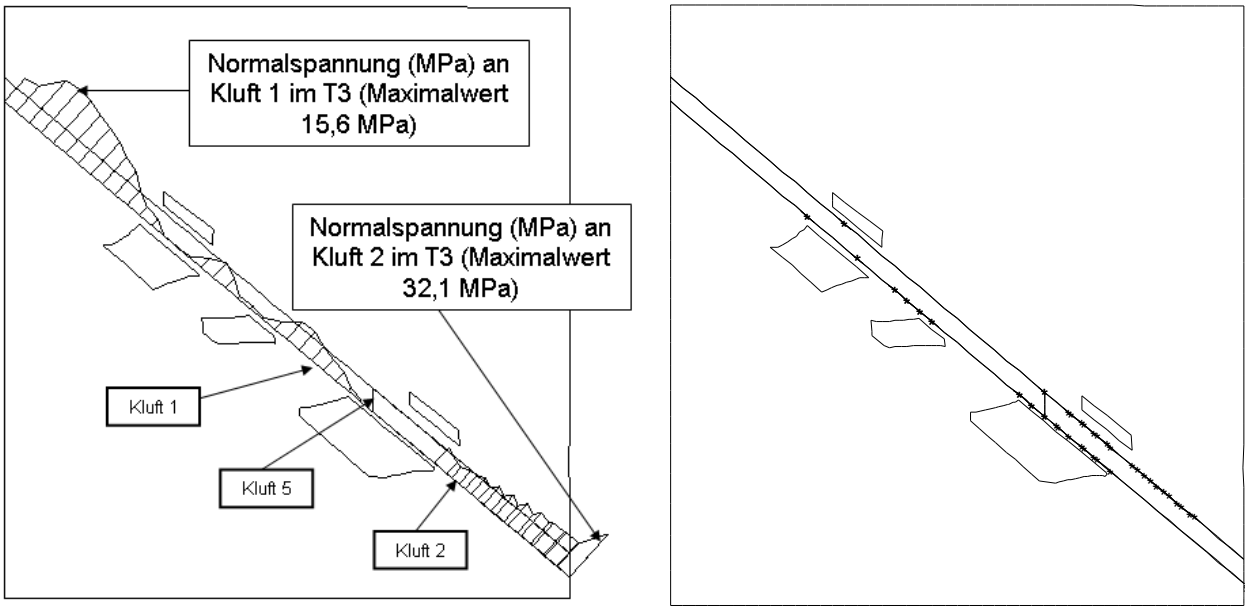


Abb. 6.9: Normalspannungen in MPa in den Klüften 1 und 2 im Salzton (links, Spannungsverläufe auf den Maximalwert normiert) und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in allen Klüften (rechts), 29 Jahre Standzeit

Ab dem Jahr 1912 waren beide Bergwerke am Markscheidepfeiler mit Salzlösung geflutet und in der Rechnung erfolgte an allen Kammerkonturen die Vorgabe eines hydrostatischen Innendruckes in Höhe der Laugensäule. Die Rechnung wurde bis zum Jahr 1923 (Gesamtdauer ab Auffahrung 40 Jahre) fortgeführt. Im Jahr 1923 betrug die Senkungsgeschwindigkeit an der Modelloberkante nur noch 3 mm/a. Solche Senkungsgeschwindigkeiten von 3 - 10 mm/a repräsentieren nach SEIFERT, G., U.A. (1992) gegenwärtige Mittelwerte im Stadtgebiet von Staßfurt außerhalb der Senkungszentren. Damit stimmen die Rechenergebnisse sehr gut mit den In - situ - Beobachtungen überein.

In Abbildung 6.10 ist der mittlere Konvergenzverlauf der modellierten Hohlräume im Teufenbereich 278 bis 360 m dargestellt. Es wird sichtbar, dass die Hohlraumausbrüche für den Bau der Absperrmauer auf die mittlere Konvergenzrate von 3 ‰ pro Jahr keinen Einfluss hatten. Die Vorgabe eines hydrostatischen Druckes von 3 bis 4 MPa verursachte dagegen eine signifikante Verringerung der Hohlraumkonvergenzrate auf etwa 0,3 ‰ pro Jahr. Lösungsprozesse wurden nicht berücksichtigt.

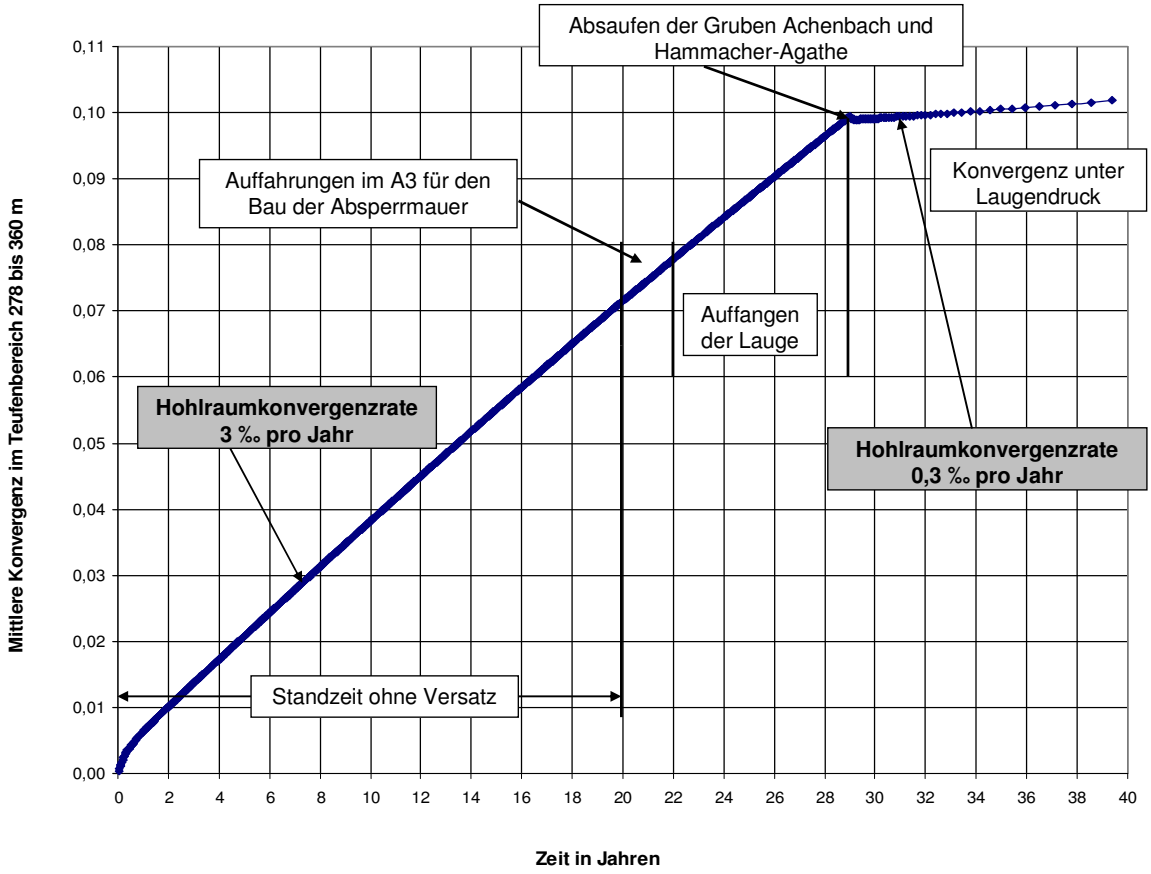


Abb. 6.10: Entwicklung der mittleren Hohlraumkonvergenz im Teufenbereich 278 bis 360 m

Auch diese Hohlraumkonvergenz im laugengefüllten Grubengebäude korreliert mit den gegenwärtigen Beobachtungen. Da der Senkungsmuldenzuwachs pro Jahr in der Summe aus Hohlraumkonvergenz und Subrosion etwa 1 ‰ des untertägigen Hohlraumvolumens entspricht, würde dies bedeuten, dass $^3/_4$ bis $^2/_3$ des Zuwachses subrosionsbedingt und $^1/_4$ bis $^1/_3$ konvergenzbedingt sind und einem analogen ausgepressten Laugenvolumen entsprechen. Diese Differenzierung der beiden komplexen Vorgänge am Staßfurter Sattel erscheint plausibel.

Die sich nach 40 Jahren Modellzeit einstellenden Kluftöffnungen haben sich geringfügig vergrößert, liegen aber immer noch in der Größenordnung von wenigen Millimetern. Im folgenden Kapitel wird untersucht, ob eine solche Öffnung bzw. Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften auch in der Richtung senkrecht zur bisher verwendeten Modellebene auftreten.

6.6.4 Beschreibung des streichenden Modells sowie der Rechenergebnisse

Das Rechenmodell in Abbildung 6.11 liegt vertikal in streichender Richtung im Markscheidepfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe in einem Teufenbereich von 190 bis 400 m.

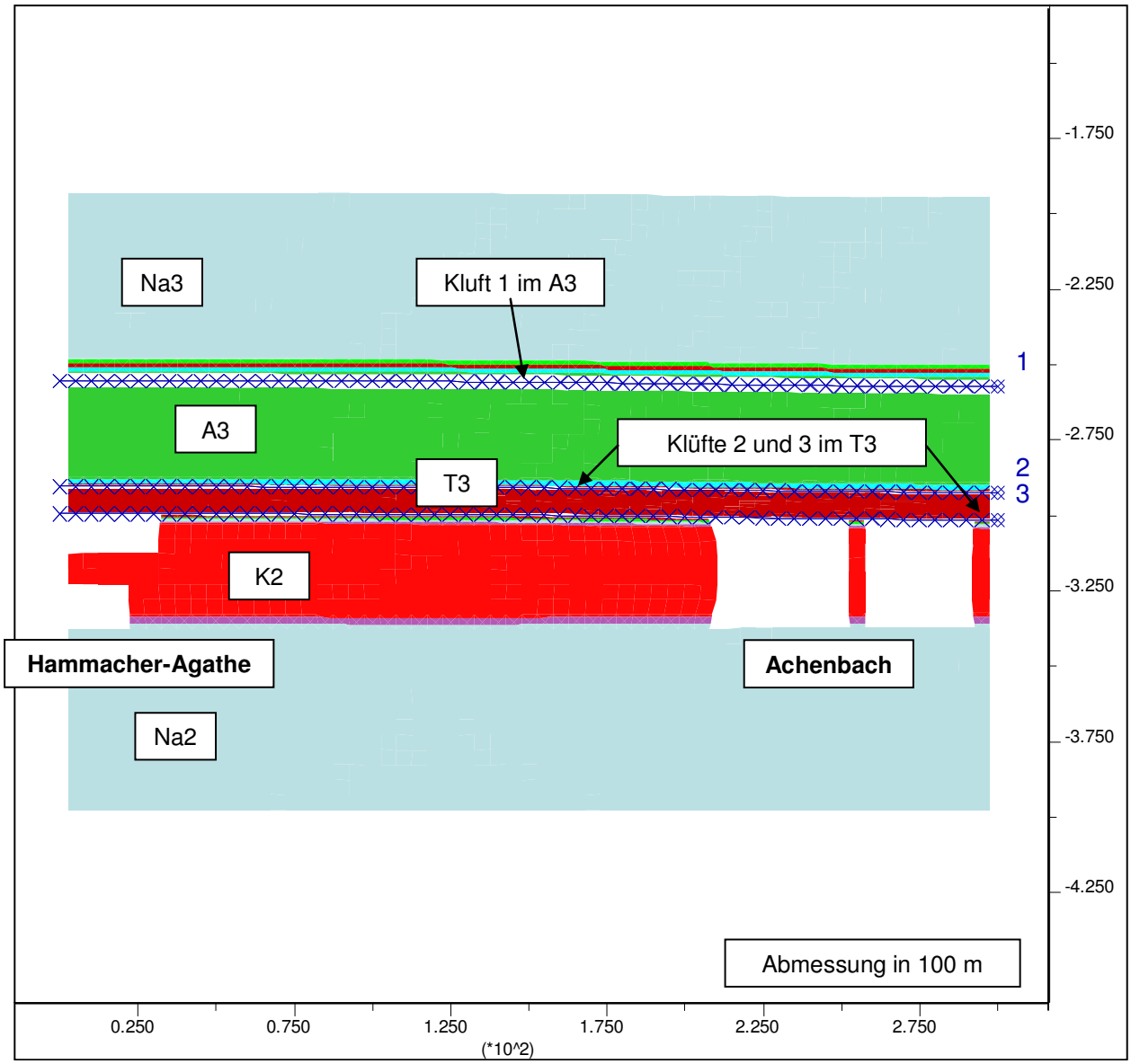


Abb. 6.11: Rechenmodell in streichender Richtung NW-SE im Teufenbereich 190 bis 400 m

Die streichende Modelllänge beträgt 300 m. Entsprechend des geologischen Profils in diesem Bereich wurden 65 m Staßfurtsteinsalz Na2, 35 m Staßfurtcarnallitit K2, 11 m Grauer Salzton T3, 39 m Hauptanhydrit A3 und 60 m Leinesteinsalz Na3 berücksichtigt. Es wurden eine Kluft im Hauptanhydrit in einer Teufe von 255 m und zwei Klüfte im Grauen Salzton in Teufen von 290 und 299 m diskretisiert. In der Abbildung sind rechts die Kammern des Steilfirstenbaus in Achenbach und links die Hohlräume des Firstkammerbaus in Hammacher-Agathe entsprechend Abbildung 6.5 zu sehen. Die Abmessungen wurden aus dem historischen bergmännischen Risswerk entnommen. Die Entfernungen zwischen den Abbauen betragen 180 und 190 m. Die Hohlraumabmessungen quer zur Modellebene liegen bei 30 bis 50 m. Das tatsächliche Einfallen der Schichtgrenzen und Klüfte mit der Sattelflanke in südwestliche Richtung (in Richtung des Betrachters) wurde mit einer horizontalen Ausrichtung modelliert.

Die Unterkante des Modells ist vertikal und die seitlichen Begrenzungen sind horizontal fixiert. Normal zur Oberkante wirkt eine Normalspannung in Höhe des Teufendruckes von 4,6 MPa.

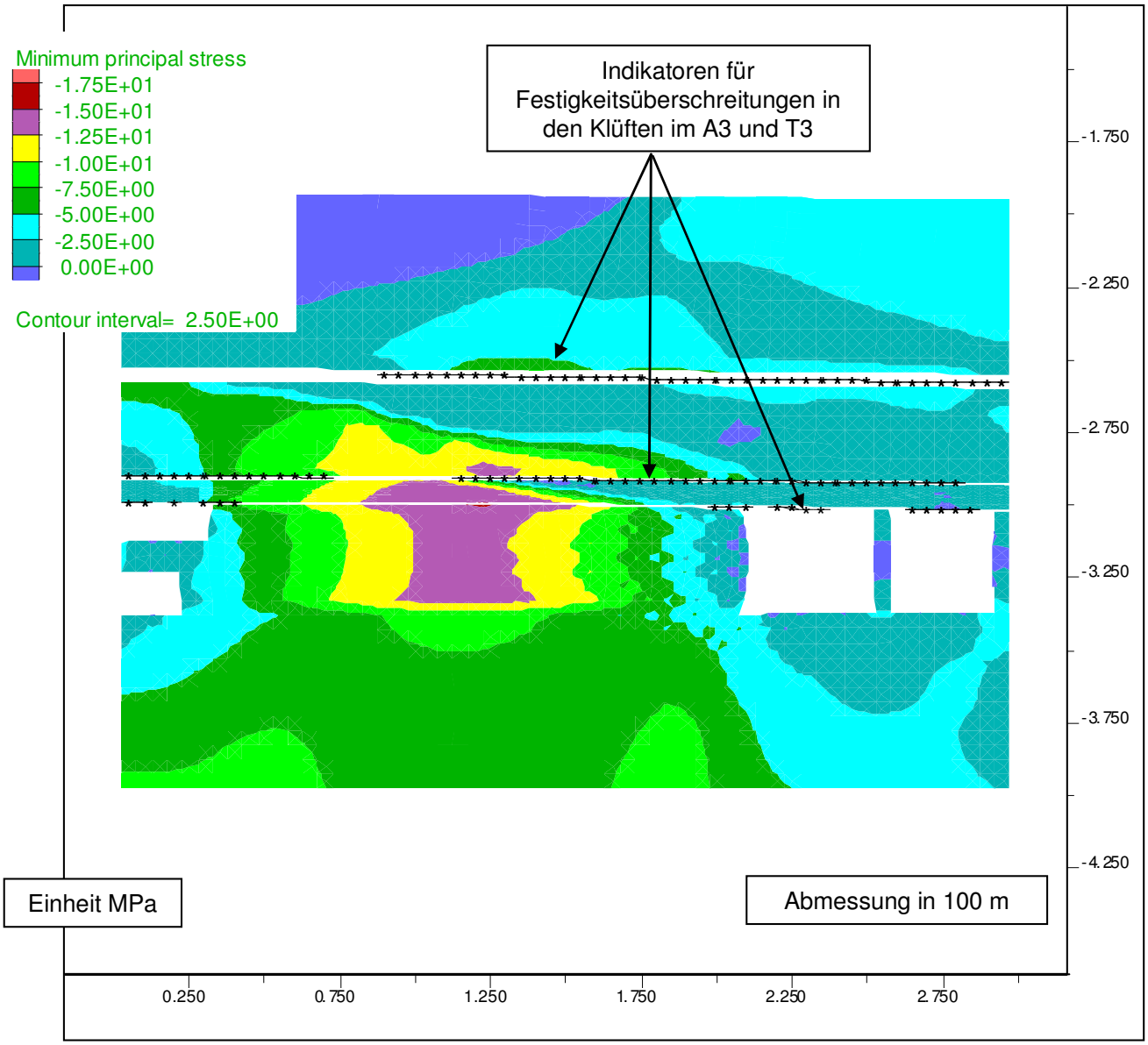


Abb. 6.12: Minimale Druckeinspannung und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften im Bereich des Markscheidepfeilers, Jahr 1903

In Abbildung 6.12 ist der Minimalspannungsaufbau im Jahr 1903 nach einer etwa 20jährigen Standzeit der Abbaukammern ohne Versatz dargestellt. Die minimalen Druckeinspannungen im Hangenden der Abbaue sind bis weit in den T3 und A3 abgesenkt. Es ist bemerkenswert, dass sich im oberen Bereich des Anhydrits ein Entlastungsbereich mit σ_{min} von 0 bis 2,5 MPa von Achenbach bis nach Hammacher-Agathe erstreckt. In der Mitte des Markscheidepfeilers

im Teufenniveau der Abbaue wird dagegen eine Druckeinspannung von 12,5 bis 15 MPa ausgewiesen. Die Absenkung der Minimalspannung im Hangenden führte zu deutlichen Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften (siehe Indikatoren in Abbildung 6.12). Beide Faktoren bildeten wesentliche Voraussetzungen für den Integritätsverlust der Klüfte schon vor den Auffahrungen im Anhydrit für den Bau der Absperrmauer.

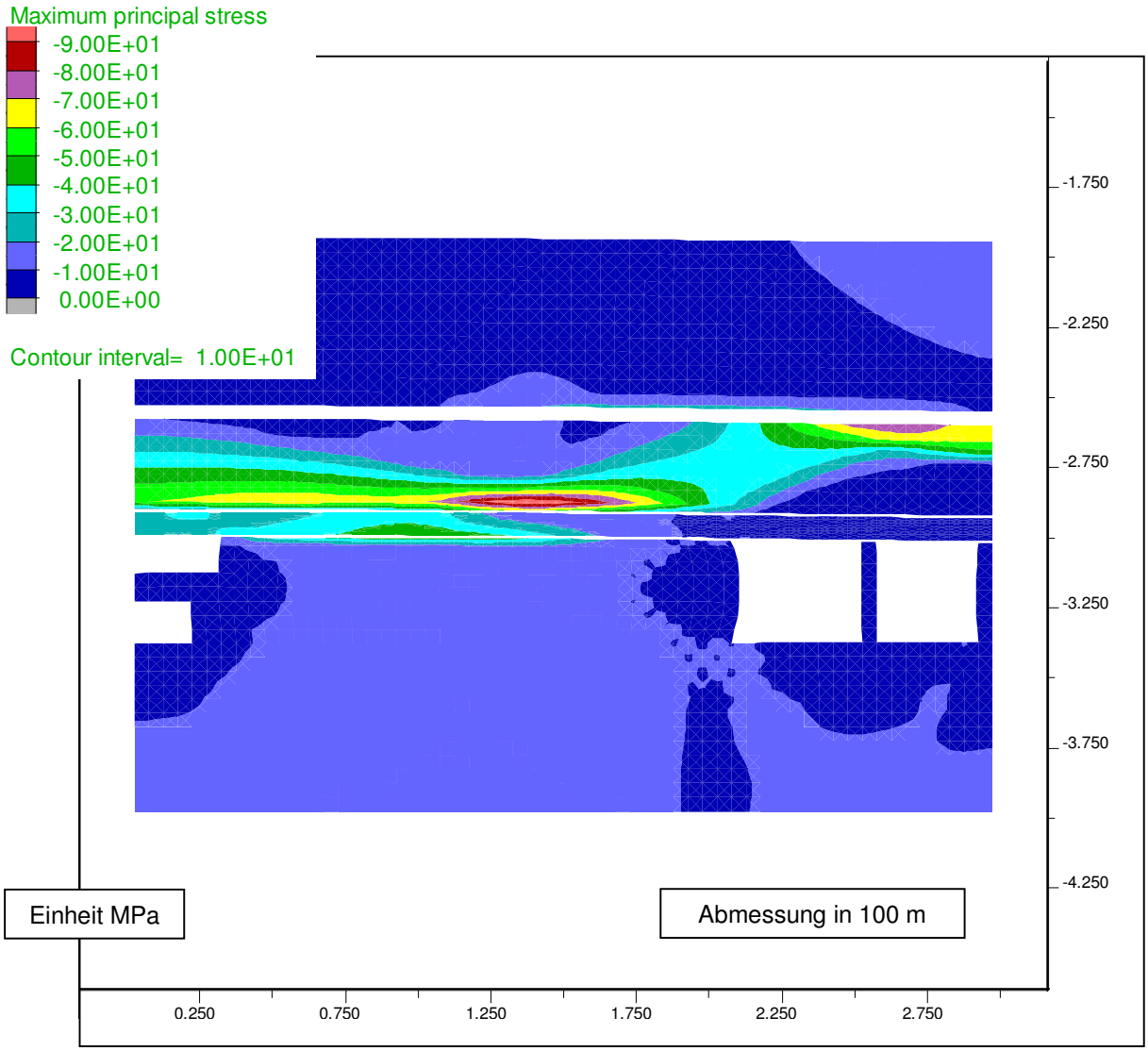


Abb. 6.13: Maximale Druckeinspannung im Bereich des Markscheidepfeilers, Jahr 1903

Die maximale Hauptspannung erreicht an der Anhydritunterkante infolge der Steifigkeit dieser Schicht Spitzenwerte von etwa 90 MPa. Diese Spannungen wirken horizontal und werden infolge der Durchbiegung des Anhydrits über dem Markscheidepfeiler verursacht. Die in Abbildung 6.12 dargestellte Entlastung an der Anhydritoberkante ist auf die gleiche Ursache zurückzuführen und wirkt ebenfalls horizontal. Entsprechend der verwendeten Festigkeiten des kompakten Anhydrits, siehe Tabelle 6.3, ist bei minimalen Druckeinspannungen von 10 bis

12,5 MPa eine Festigkeitsüberschreitung noch auszuschließen, die Kluftfestigkeiten gemäß Tabelle 6.4 werden jedoch deutlich überschritten. Vergleichbare Aussagen gelten für den Grauen Salzton. Die Kluftöffnung erreicht wenige Millimeter.

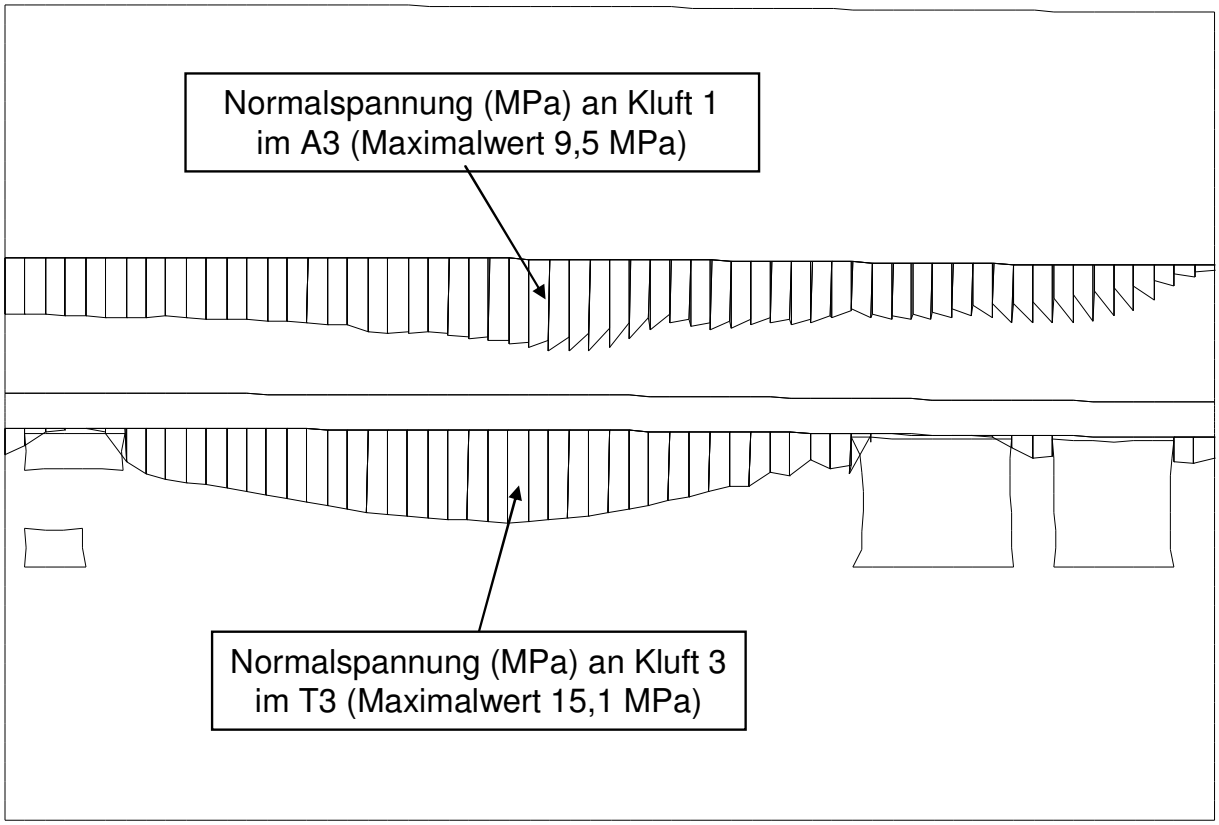


Abb. 6.14: Normalspannungsverlauf in MPa in der Kluft 1 im Anhydrit sowie Kluft 3 im unmittelbar zu den Abbauen benachbarten Salzton (Spannungsverlauf ist auf den Maximalwert normiert), Jahr 1903

Abbildung 6.14 zeigt den Normalspannungsverlauf in den Klüften im Anhydrit (Kluft 1) und Grauen Salzton (nächstgelegene Kluft im T3). Die Beträge korrelieren mit den Vertikalspannungen im Modell. Trotz der relativ hohen Normalspannungswerte ist es in den Anhydrit- und Salztonschichten offensichtlich zu einem Integritätsverlust, verursacht durch die deutlichen Verringerungen der minimalen Druckeinspannung und der daraus resultierenden Kluftfestigkeitsüberschreitung, gekommen. Diese berechneten Wechselwirkungen erklären die historische Beobachtung des ersten Laugenübertritts von Achenbach nach Hammacher-Agathe im November 1902. Damals stand der Laugenspiegel in Achenbach bei 300 m unter Tage und im Schacht Hammacher gab die erste Anhydritkluft in einer Teufe von 360 m nach. Aus der Lösungssäulendifferenz von 60 m ergibt sich mit einer Wichte von 12 bis 13 kPa/m ein in Achenbach angreifender Lösungsdruck von 0,7 bis 0,8 MPa. Dieser geringe hydraulische Druck war für die Lauge in Achenbach ausreichend, nach den Festigkeitsüberschreitungen in die entspannten Anhydritklüfte zu penetrieren und den Pfeiler zu durchdringen. Inwieweit

Lösungsprozesse in carnallitgefüllten Klüften eine Rolle gespielt haben, lässt sich mit den Rechenmodellen nicht bewerten. Dies ist jedoch angesichts der Zeitdauer von etwa 1 Jahr für den Übertritt wahrscheinlich. Beide Einwirkungen, Permeationen in Klüften und Lösungsprozesse, sind zeitabhängig und können sich in carnallitgefüllten Klüften gegenseitig verstärken.

6.7 Schlussfolgerungen

Insgesamt lassen sich aus den Untersuchungen zum Staßfurter Sattel folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Klüftigkeit innerhalb des T3/A3 kann lokal stark wechseln. Bereiche geringer und starker Klüftung liegen oft eng beieinander und Zonen ohne festgestellte Klüfte sind trotzdem über Mikrorisse durchlässig. Die Kluftsysteme stehen untereinander in Verbindung und bei der Abdämmung einer Kluft können sich die Zuflüsse über eine andere verstärken.
- Die Abdichtungsversuche einer Kluft oder die Ausmauerung eines besonders klüftigen Teils der T3/A3 - Schichten konnte, wenn die Kluftsysteme untereinander verbunden sind, nur einen kurzzeitigen Erfolg bringen. Die kraftschlüssige Anbindung der Mauer an der "milden Tonlage" (offensichtlich dem Rotbraunen Salzton) ist auf Grund des gebrächen Charakters dieser Schicht ohnehin fraglich.
- Auffahrungen in den klüftigen Schichten führen grundsätzlich zu einer Auflockerung und weiteren Kluftöffnung. Diese Abdichtungsversuche konnten nicht nur keinen Erfolg bringen, sondern hatten vermutlich gebirgsmechanisch negative Auswirkungen.
- Die jahrelangen Wasserhebungsmaßnahmen verursachten einen Wasserkreislauf, der noch vorhandene Kluftfüllungen löste und die Durchlässigkeit der Gebirgsschichten weiter vergrößerte. Am Rand der Markscheidepfeiler führte diese Tätigkeit bei aufgeschlossenen T3/A3 - Schichten zur Vergrößerung der Durchlässigkeit zwischen abgesoffenen und noch lufterfüllten Gruben.
- Die Ursachen für die primären Wasserzuflüsse lagen bei der unzureichenden Standsicherheit der Abbaupfeiler und Schweben im Kalilager, der Annäherung an den Salzspiegel und der langen Standzeit ohne Versatz. Die Brüche setzten sich im Hangenden fort und erstreckten sich danach auf den nicht mehr allseitig eingespannten Hauptanhydrit.
- Wenn dann in diesen Bereichen auch die Leinesteinsalzüberdeckung fehlt, ist es in vielen Fällen zu verstärkten Wasserzuflüssen aus dem Deckgebirge und zu Tagesbrüchen gekommen. Das hangende Leinesteinsalz besitzt eine entscheidende Trag- und

Dichtfunktion und kann bei ausreichender Mächtigkeit auch intensiv gebaute kleinere Abbaufelder bruchfrei vor übertägigen Wasserzuflüssen schützen.

- Infolge der Hohlraumwirkung kam es zu Kluftöffnungen im Anhydrit und Salzton von wenigen Millimetern. Entscheidend für den Integritätsverlust des Markscheidepfeilers zwischen Achenbach und Hammacher-Agathe waren Verringerungen der minimalen Druckeinspannung bis in das Hangende des Pfeilers hinein mit einhergehenden Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften. Gleichzeitige Lösungsprozesse des Carnallits in den Klüften sind wahrscheinlich. Die ersten Zuflüsse traten in Hammacher-Agathe auf der 360 m Sohle ein. Die Laugen standen zu dieser Zeit seit einem Jahr in Achenbach bei etwa 300 m Teufe. Der aus der hydrostatischen Spiegeldifferenz resultierende Flüssigkeitsdruck betrug damit 0,7 bis 0,8 MPa. Die berechneten minimalen Druckeinspannungen im Hangenden der Großkammern und des Markscheidepfeilers lagen in größeren zusammenhängenden Bereichen unter 0,7 MPa. Unter der Bedingung $p_{Fluid} > \sigma_{min}$ muss demzufolge mit einem Integritätsverlust gerechnet werden. Eine zusätzliche Zugfestigkeit war angesichts des hohen Zerlegungsgrades und bei den stattfindenden Lösungsprozessen der Kluftmineralisationen auszuschließen.
- Die durch die Auffahrung der Großkammern verursachten Kluftöffnungen veränderten sich in der jahrzehntelangen Standzeit nur unwesentlich und wurden infolge der hydrostatischen Lösungsdrücke nicht wieder verringert.
- Wenn in ein Salzbergwerk Tageswässer zutreten und entlang des Zutrittspfades fortwährende Lösungsprozesse die Durchlässigkeit erhöhen, werden die Grubenbaue nach den Staßfurter Erfahrungen absaufen. Abdichtmaßnahmen hatten in keinem Fall einen längerfristigen Erfolg. Die kontrollierte Flutung über Bohrungen mit einer Eintrittsstelle und Aufsättigungsstrecken außerhalb von bewohnten Gebieten ist dann die einzig sinnvolle und zumindest die Schäden an der Tagesoberfläche begrenzende Maßnahme.
- Solche langjährigen Zutritte ungesättigter Salzlösungen mit einhergehenden Auflösungsprozessen sind in einem Endlager für radioaktive Abfälle undenkbar (siehe Kapitel 2: Abgrenzung der Aufgabenstellung). Die geschilderten historischen Ereignisse waren an einen Salzsattel mit starker tektonische Strukturierung und abgeminderter Gebirgsfestigkeit (geogen geringes Isolationspotential), große Hohlraumabmessungen für bergbauliche Gewinnungszwecke, lange versatzfreie Standzeiten und die unmittelbare Nähe der Abbaue zum grundwasserführenden Deck- und Nebengebirge ohne Schutzschichten gebunden. Die Barrierenintegrität in benachbarten Bergwerken war bereits überschritten und diese waren im Absaufen begriffen. Das sind alles Ausschlusskriterien für den Standort eines Endlagers.

7. In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung des Spannungszustandes an den Messorten und der Deformationen bei der Messkammerauffahrung sowie Weiterentwicklung der Messverfahren

7.1 Beschreibung der Messmethoden zur Spannungsermittlung

Die **Hydrofrac-Methode** wird als In-situ-Messverfahren zur Spannungssondierung im Gebirge weltweit seit Jahrzehnten eingesetzt. Der Vorteil gegenüber anderen Spannungsmessverfahren besteht darin, dass mit einem relativ geringen apparativen und zeitlichen Aufwand Spannungen im Gebirge direkt gemessen werden können. Das Prinzip des hydraulischen Fracs besteht in der Erzeugung eines Risses in einem abgepackerten Bohrlochabschnitt und der Beobachtung der sich danach einstellenden Druckabfallkurve. Der Ruhedruck stellt sich ein, wenn Druckgleichgewicht zwischen dem Fracmedium und der minimalen Hauptnormalspannung im untersuchten Gebirgsabschnitt herrscht. Als Fracmedium wird vom IfG Leipzig Hydrauliköl verwendet, üblich sind jedoch auch andere Medien wie Wasser oder Lauge. Die Sonde (Abbildung 7.1) wird von einem starr verbundenen Doppelpackersystem gebildet, bei dem durch zwei innen liegende Kolben die Dichtelemente aus einem hochverformbaren Elastomer an die Bohrlochwand gepresst werden. Der dazwischen liegende Messabschnitt ist damit hermetisiert und über eine zweite Druckleitung wird der Fracraum gefüllt und die Bohrlochkontur bis zum Aufriss belastet. Die Druckerzeugung erfolgt über eine Handpumpe mit umschaltbarem Förderstrom von 1 oder 4 cm^3 pro Kolbenhub oder elektrische Pumpen. Die Druckerzeugung wird über Kugelventile auf die Packer- oder Fracraumleitung umgeschaltet, der Packerdruck liegt 1 - 2 MPa über dem Druck im Fracraum.

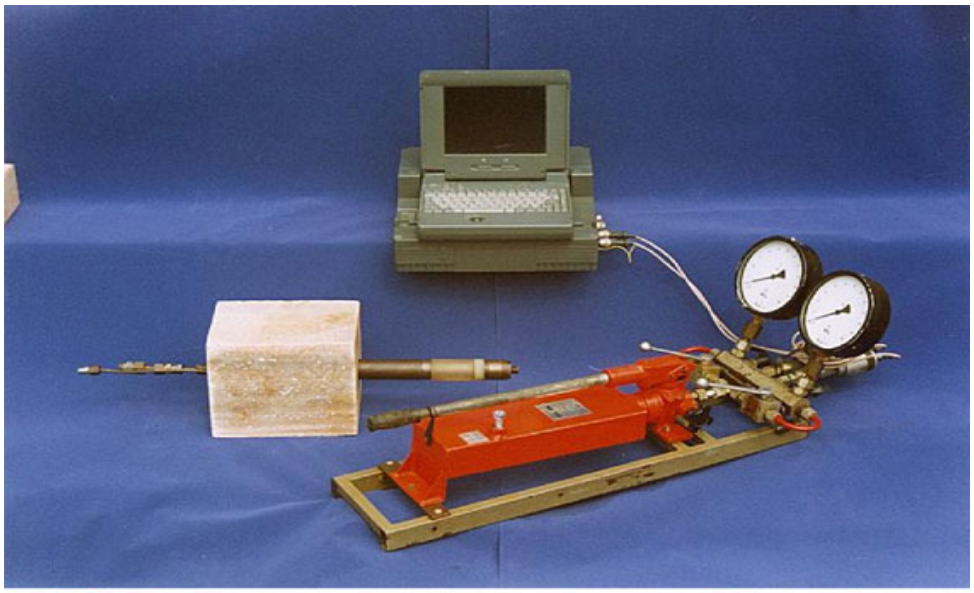


Abb. 7.1: Hydrofrac-Equipment des IfG Leipzig für Bohrlochdurchmesser 42 mm

Die Drücke können über Feinmessmanometer kontrolliert und mittels Datenerfassung auf einem Laptop aufgezeichnet werden. Die Sonde ist für Bohrlochdurchmesser von 42 - 44 mm und maximale Drücke von 60 MPa konzipiert. Ein Sondenbau für andere Durchmesser ist prinzipiell gleichfalls möglich.

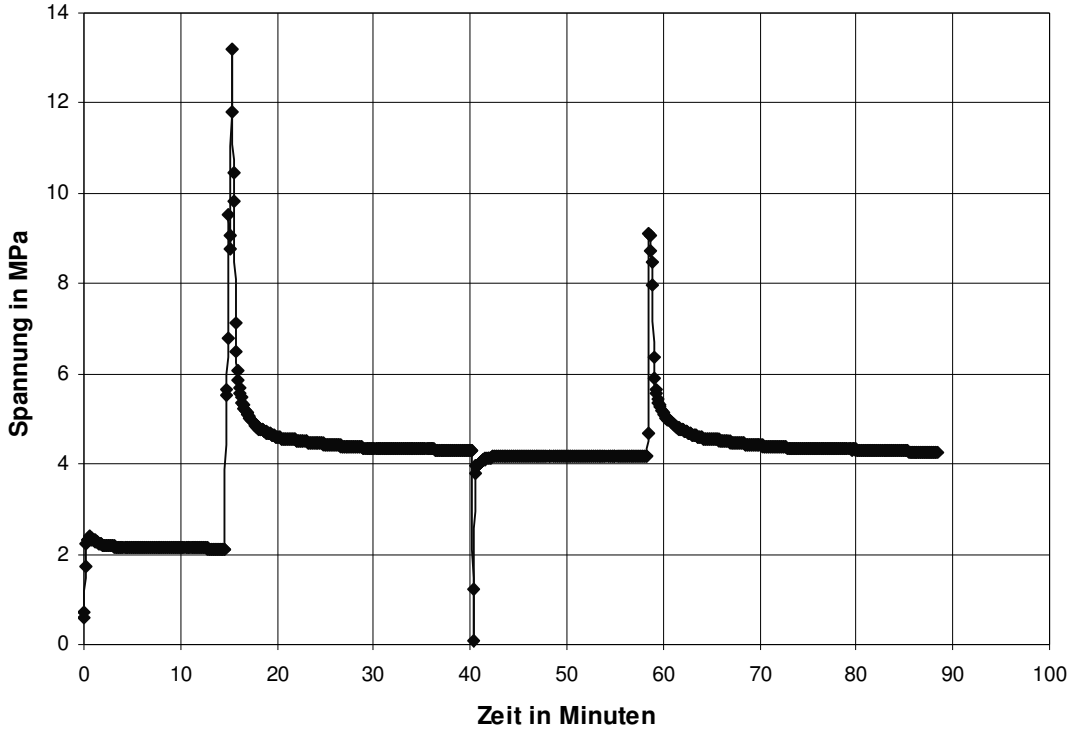


Abb. 7.2: Druckkurve eines typischen Hydrofracversuches

Die Funktionsfähigkeit der Messeinrichtung wird nach jedem Aufbau am Untersuchungsort mit Dichtheitstests überprüft. Bezüglich der Auswertung der Druckkurven nach dem Aufriss und dem Verschluss der Hydraulikleitung (Shut-In-Phase) hat sich auf der Basis einer jahrzehntelangen Erfahrung bei der Anwendung hydraulischer Fracversuche im Salinar folgendes Versuchsregime als zweckmäßig erwiesen:

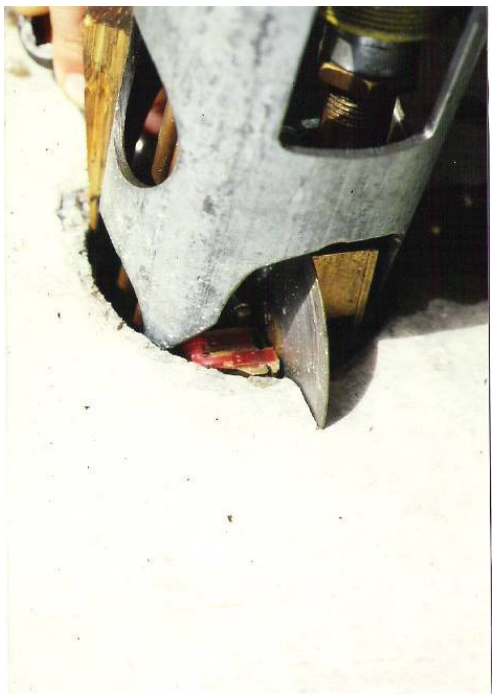
- Nachweis der primären Dichtheit vor dem Frac bei 20 - 50 % der erwarteten minimalen Druckeinspannung
- Aufreißen des Bohrlochabschnittes und Aufzeichnung des Druckabfalls in der Shut-In-Phase
- Nachweis der Druckkonstanz bei etwa 90 % des Endwertes der aufgezeichneten Druckabfallkurve
- Refrac und Risserweiterung sowie Aufnahme einer weiteren Druckabfallkurve

In Abbildung 7.2 ist ein solcher idealer Versuchsablauf dargestellt. Es erfolgt eine asymptotische Annäherung der Refrac-Kurve an den vorangegangenen Wert der

Druckkonstanz. Der Betrag der Minimalspannung berechnet sich aus dem Mittelwert aus Druckkonstanz nach dem Frac und dem Endwert der Kurve des Refracs (in der Abbildung etwa 4,2 MPa). Bei einigen ausgewählten Tests konnte nachgewiesen werden, dass auch über Standzeiten des abgepackerten und druckbelasteten Bohrlochabschnittes bis zu 20 h noch ein langsamer Druckabfall vorhanden ist.
Entsprechend der Erfahrungen am IfG Leipzig, insbesondere basierend auf den Würfelfracversuchen im Labor bei drei unterschiedlichen Hauptspannungen, wird davon ausgegangen, dass sich der Riss immer entsprechend der Spannungsgeometrie ausrichtet. Das bedeutet, dass die Rissebene von der maximalen und mittleren Hauptspannung aufgespannt wird und die minimale Hauptspannung normal dazu wirkt. Lediglich bei geringen Hauptspannungsdifferenzen gewinnen Gefügemerkmale an Bedeutung und können die Risslage beeinflussen. Der Einfluss des Spannungsfeldes um das Bohrloch selbst ist dagegen, wenn der Riss mittels Überpumpen genügend weit vorangetrieben wurde, relativ gering. Eine ausschließliche Ausbildung von Längs- (Bohrloch liegt in der Rissebene) oder Querrissen (Bohrloch liegt normal zur Rissebene), wie sich entsprechend der klassischen Modellvorstellungen erwarten ließe, wurde nicht beobachtet. Die Richtung der Minimalspannung ist demzufolge zunächst unbekannt, sie korrespondiert, abgesehen von der unmittelbaren Kammer- oder Streckenkontur, nicht mit der Bohrlochorientierung und muss mit gesonderten Verfahren bestimmt werden.
Wenn die Risslage vom örtlichen Spannungsfeld und nicht vom Bohrloch selbst vorgegeben wird, ist es theoretisch auch nicht statthaft, aus dem Ruhedruck, dem Aufreißdruck und der Gesteinsfestigkeit die maximale Hauptspannung in der Ebene normal zum Bohrloch zu berechnen. Diese Methode ist daran gebunden, dass Minimal- und Maximalspannung in der Ebene quer zum Bohrloch liegen, sich Längsrisse ausbilden sowie ein elastisches und homogenes Materialverhalten des sondierten Gebirges vorliegt. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die vorliegende Arbeit bzw. Anwendungseinschränkungen werden in den weiteren Ausführungen diskutiert.

Das **Bohrlochschlitzverfahren** wird exklusiv von der Firma Interfels GmbH angeboten und weltweit bei geotechnischen Messaufgaben eingesetzt. Zum kompletten Sondensystem gehören die Bohrlochschlitzsonde, ein hydraulisch-pneumatisches Steuerpult, die Messbrücke, ein Drucktopf sowie Kabel, Schläuche und Setzgestänge.
Die Messungen basieren auf einem Entlastungsverfahren ohne Überbohren. Dazu wird nach dem Einführen und Fixieren der Sonde am Messort ein Kontaktdehnungsgeber hydraulisch an die Bohrlochwand gedrückt (Abbildung 7.3). Die beiden Kontaktspitzen haben einen Abstand von 6 mm. Mittels einer druckluftbetriebenen Trennscheibe mit einer Dicke von 1 mm wird dann etwa 10 mm neben dem Dehnungssensor parallel zur Bohrlochachse ein Schlitz in die

Kontur gesägt. Durch den Schlitz wird die Tangentialspannung an der Bohrlochkontur im Schlitzbereich vollständig unterbrochen und die sich einstellende Dehnung über den Sensor angezeigt. Die Schnitttiefe beträgt 20 mm, ab 15 mm ist meist die Entspannung abgeschlossen.



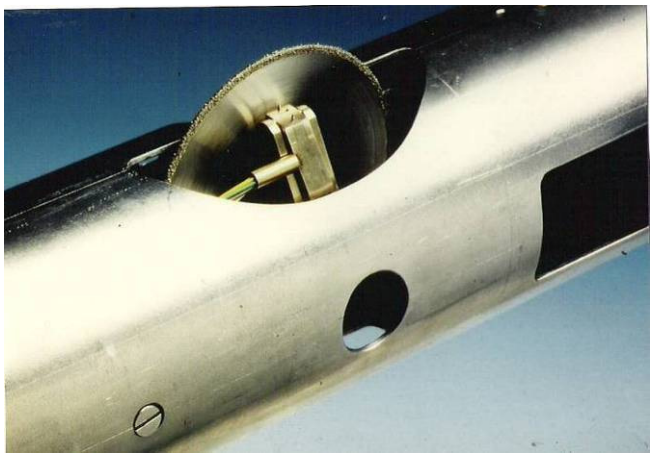


Abb. 7.3: Interfels-Bohrlochsonde: Detailaufnahmen der Trennscheibe und des Kontaktdehnungsgebers

In Abbildung 7.3 sind Details der Trennscheibe und des Dehnungssensors dargestellt. Es wird in möglichst glatten und gereinigten Bohrlöchern mit 95 bis 103 mm Durchmesser bis zu einer Teufe von maximal 30 m gearbeitet. Entsprechend der elastischen Kreislösung

$$\varepsilon_\phi = \frac{1 - \nu^2}{E}[2(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\phi - 4\,\tau_{xy}\sin 2\phi + \sigma_x + \sigma_y) \qquad (7.1)$$

lassen sich mit mindestens drei Schlitzen über die elastischen Stoffeigenschaften die Spannungen in der Ebene normal zum Bohrloch σ_x, σ_y und τ_{xy} berechnen. Es gelten folgende Festlegungen:

ε_ϕ - Tangentialdeformation, Dehnungssignal beim Schlitzen

E - Elastizitätsmodul, v - Poissonzahl

ϕ - Drehwinkel ab Ordinate im Uhrzeigersinn.

Für das Gebirge müssen die Modellannahmen Elastizität und Homogenität vorausgesetzt werden und das Verfahren ist demzufolge nur in ungeklüfteten Gesteinen mit vorwiegend elastischem Materialverhalten einsetzbar. In einem späteren Abschnitt wird eine Modifikation des Auswertealgorithmus für rheonom reagierendes Salzgestein vorgestellt. Im Unterschied zur Hydrofrac-Methode, mit der die minimale Hauptspannung im dreidimensionalen Raum ermittelt werden kann, hebt die Bohrlochschlitzmethode zunächst nur auf den ebenen Spannungstensor in der Ebene quer zum Bohrloch ab. Diese Ebene ist mittels der angesetzten Sägeschlitze bzw. die Bohrlochrichtung fest vorgegeben. Es gilt der ebene Deformationszustand. Bei drei senkrecht zueinander stehenden Bohrungen lassen sich danach für Gebirgsbereiche außerhalb des Messkammereinflusses die ebenen Messungen zum räumlichen Spannungstensor zusammensetzen. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass in kurzer Zeit mehrere Schlitze gesägt und damit Messwerte gewonnen werden können. Das Sägen eines Schlitzes dauert etwa eine Minute. Durch den unmittelbaren Vergleich der Dehnungssignale und die gegenseitige Zuordnung (gegenüberliegende Dehnungen müssen gleich sein) lassen sich Messfehler, z.B. durch Anschneiden einer Inhomogenität (Kluft), sofort erkennen. Durch die Kontrolle und mögliche Wiederholung direkt am Messquerschnitt wird die Zuverlässigkeit der Messwerte erhöht. Weiterhin kann ein neuer Messquerschnitt schon etwa 10 cm in der Bohrlochachse versetzt untersucht werden.

Diese Vorteile waren ausschlaggebend, das Bohrlochschlitzverfahren zusammen mit dem Hydrofrac im Anhydrit und den überwiegend elastisch reagierenden festen anhydritischen und magnesitischen (karbonatischen) Lagen im Salzton einzusetzen. Der räumliche Spannungszustand konnte auf Grund der Auffahrungssituation nur in den beiden Anhydritmesskammern bestimmt werden. Im Salztonstreckenaufschluss erfolgten lediglich Messungen in horizontalen Bohrungen rechtwinklig zum Streckenstoß.

Wie bereits ausgeführt, wurden In-situ-Messungen an insgesamt 4 Orten durchgeführt:

- Hauptanhydritkammer Pöthen in 1013 m Teufe,
- Salztonstreckenaufschluss Pöthen in 1013 m Teufe,
- Hauptanhydritkammer Bernburg in 510 m Teufe,
- Salztonstreckenaufschluss Bernburg in 410 m Teufe.

Neben den Spannungsmessungen erfolgten in den Messkammern auch Hohlraumkonvergenzmessungen, wobei infolge der Vorinstrumentierung in der Anhydritmesskammer in Bernburg auch deren Entspannungsdeformationen aufgezeichnet werden konnten.

Die Messkammer Pöthen wurde in einem horizontal gelagerten und tektonisch ungestörten Anhydritbereich und die Messkammer Bernburg in einer Wallstruktur mit überdurchschnittlicher Mächtigkeit aufgefahren. Die Messorte im Salzton wurden über schon bestehende Strecken mit Bohrungen aufgeschlossen und befinden sich in beiden Gruben in steil stehenden Faltenstrukturen.

Das Untersuchungsziel bestand darin, in den Aufschlüssen bzw. Kammern die sekundären, d.h. die sich um die untertägigen Hohlräume ausbildenden, Spannungs- und Verschiebungsfelder zu erfassen und mittels der im Labor ermittelten Grenzwerte zu bewerten. Weiterhin war beabsichtigt, die Gebirgsspannungsrichtungen außerhalb der Entlastungswirkung durch die Hohlräume mit den tektonischen Vorzugsrichtungen (Kluftrichtungen) zu vergleichen.

7.2 Messungen im Hauptanhydrit und Grauen Salzton in Volkenroda-Pöthen

Die Lage der Messkammer im Grubenfeld mit einer Höhe von 2,5 m, einer Breite von 4 m und einer Länge von 15 m kann Abbildung 4.1 entnommen werden. Die beiden Horizontalbohrungen wurden am linken Stoß und der Ortsbrust angesetzt und die Firstbohrung mit einem Anstiegswinkel von 70° gebohrt. Die Längen betrugen etwa 11 m.

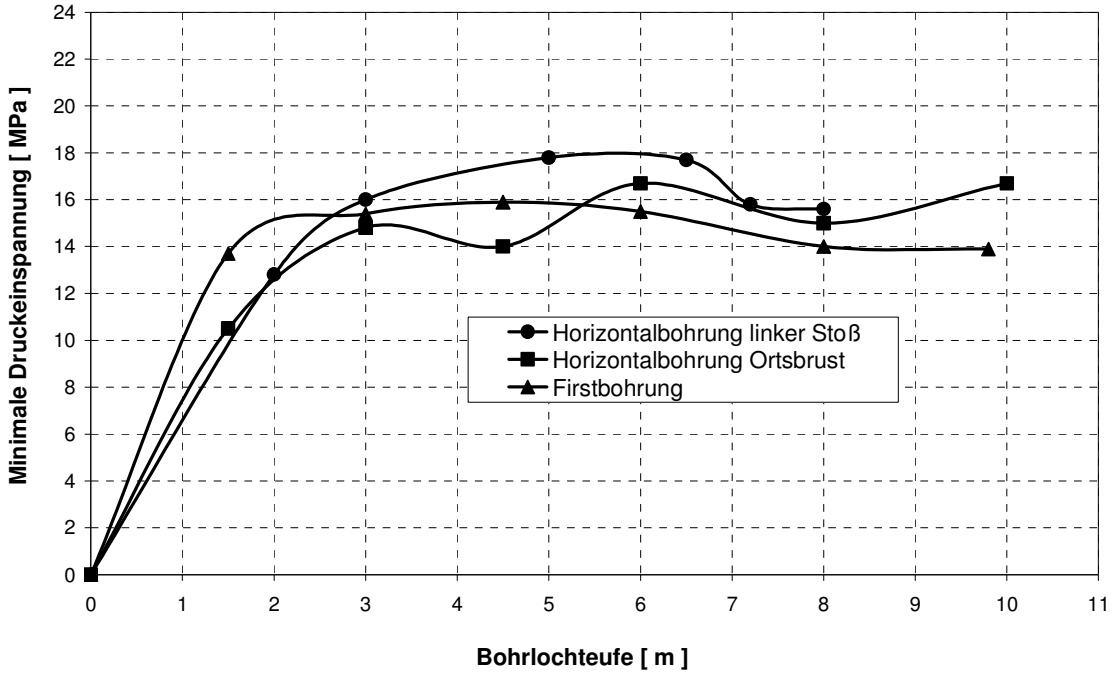


Abb. 7.4: In der Anhydritkammer Pöthen ermittelte Minimalspannungen (Teufe 1013 m)

In Abbildung 7.4 ist zu erkennen, dass ab einer Bohrlochteufe von 3 m minimale Druckeinspannungen von 14 bis 18 MPa erreicht werden. Der sich aus der Wichte des überlagernden Deckgebirges ergebende Teufendruck liegt bei 24 MPa.

Zur Ermittlung der Risslagen wurden zunächst Abdruckpacker entwickelt, die jedoch auf Grund des sehr dichten Anhydritgefüges und der kaum erkennbaren Rissspur wieder verworfen werden mussten. Erfolgversprechender erschien dagegen ein Überbohren der Hydrofracbohrlöcher mit einer Kernkrone. In Abbildung 7.5 sind zwei typische Bohrkerne der Horizontalbohrungen mit einem Durchmesser von etwa 140 mm zu sehen, die den Hydrofracriss in einer Bohrlochteufe von 4,1 m (Bohrlochrichtung NNW, links) bzw. 3,5 m (Bohrlochrichtung WSW, rechts) enthalten. Der Riss ist an der hellen Färbung und den Ölspuren zu erkennen. In Abhängigkeit vom Grad der Durchtrennung können die gefracten Bereiche beim Bohren auseinander brechen (rechts) oder auch intakt bleiben (links).

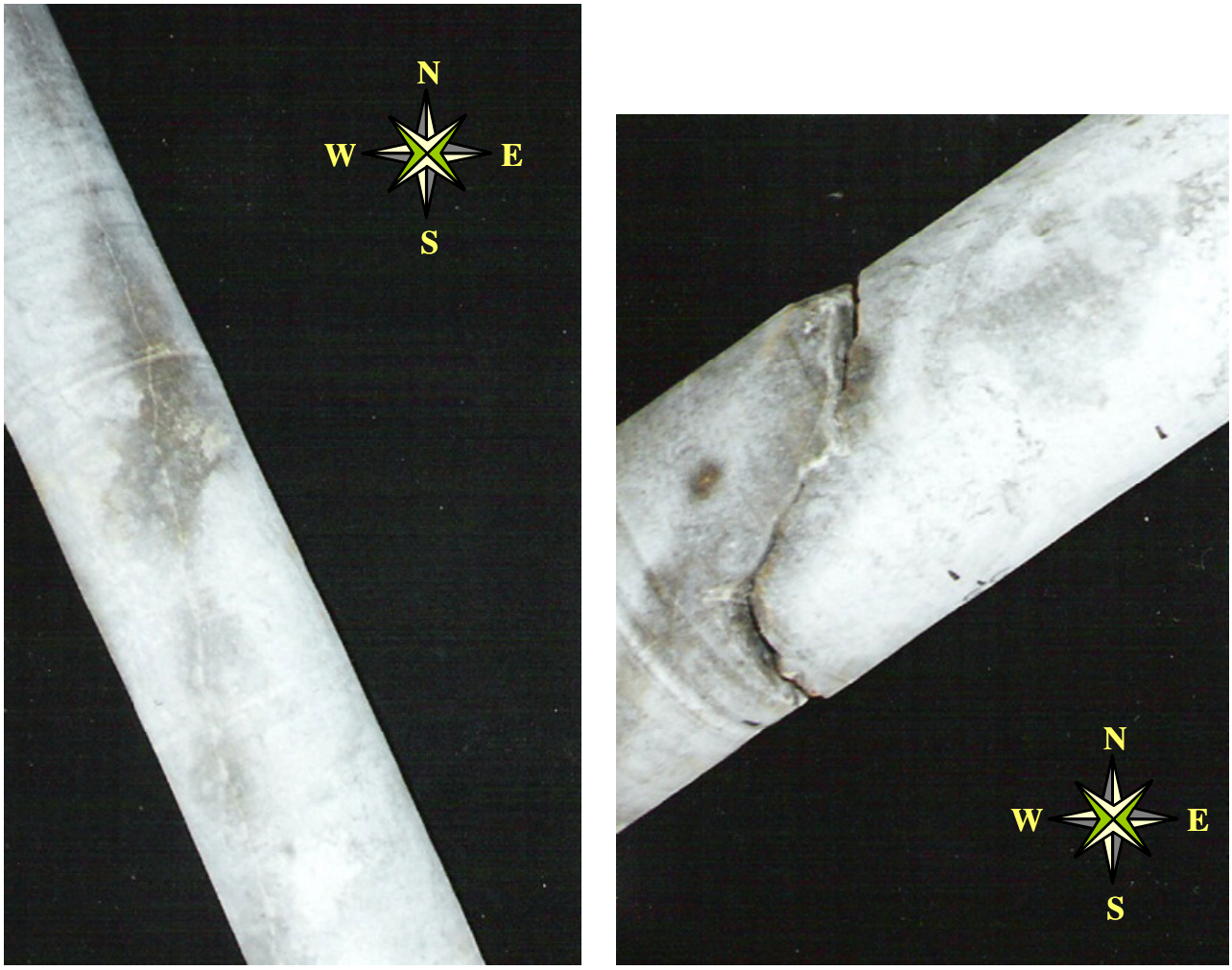


Abb. 7.5: Bohrkerne nach Überbohren der horizontalen Hydrofracbohrung Richtung NNW (links) sowie der horizontalen Hydrofracbohrung Richtung WSW (rechts)

Die Kernbohrungen wurden so gesetzt, dass die Fracbohrlöcher außermittig verlaufen und damit eine Kernorientierung möglich ist. Bei allen Fracrissen zeigte sich eine Ausrichtung in Richtung Nord-Süd bei steiler Risslage. Daraus ergibt sich, dass die sondierten minimalen Gebirgsspannungen horizontal in Richtung Ost-West wirken.

Die drei Bohrungen für den Einsatz der Schlitztechnik in der Anhydritkammer Pöthen mit einem Durchmesser von 101 mm und einer Länge von jeweils 10 m wurden mit folgenden Raumlagen gestoßen (Streichen = Winkel zwischen der Projektion auf die Horizontalebene und Nord, von Nord beginnend im UZS, Einfallen = Winkel ab der Horizontalebene nach unten):

Bohrung	Streichen [in Grad]	Einfallen [in Grad]
1	336	0
2	246	0
3	0	- 90

Die Bohrungen spannen ein orthogonales Rechtssystem auf.

Aus den Entspannungsdeformationen beim Schlitzen resultieren unter Verwendung der in Tabelle 5.1 aufgeführten elastischen Parameter für den Hauptanhydrit Pöthen die Spannungen in der Ebene quer zum Bohrloch und nach der Zusammenfügung zum dreidimensionalen Spannungstensor für die Bohrlochteufen > 8 m außerhalb des Kammereinflusses ergeben sich die Hauptspannungsbeträge bzw. -richtungen:

Hauptspannung	Betrag [MPa]	Streichen [Grad]	Einfallen [Grad]
σ_1	25,8	301	69
σ_2	23,1	162	16
σ_3	14,4	68	13

Dieser Befund stimmt sehr gut mit den bereits vorliegenden Ergebnissen überein: Die Maximalspannung entspricht betragsmäßig dem Teufendruck und wirkt nahezu senkrecht. Die Minimalspannung liegt im Betrag an der Untergrenze des Streubereiches der Hydrofracresultate. Die nahezu horizontale Ausrichtung der Minimalspannung nach ENE-

WSW korreliert sowohl mit den Hydrofracrisslagen, als auch mit dem steilherzynen Kluftbefund des gesamten Hauptanhydritaufschlusses in Tabelle 4.6 bzw. Abbildung 4.2. Der Seitendruckkoeffizient $\lambda = \sigma_3/\sigma_1$ liegt mit 0,56 in dem Erwartungsbereich für ein Festgestein. Die beiden voneinander unabhängigen Spannungsmessverfahren haben damit einen Befund zum rezenten lokalen Spannungsfeld geliefert, der auch mit den in den Kluftlagen abgebildeten tektonischen Vorzugsrichtungen übereinstimmt.

Bezüglich des Seitendruckkoeffizienten soll an dieser Stelle auch auf pneumatische Hydrofracversuche im A3 in den Gruben Bleicherode und Sollstedt sowie in einer Tiefbohrung in Kehmstedt nördlich von Bleicherode hingewiesen werden. Alle Lokationen befinden sich im Südharz-Kalirevier. Die Versuche sind in KAMLOT, P.; SCHWANDT, A. (1991) näher beschrieben. In Bleicherode wurde in einer Teufe von 555 m ein mittlerer Seitendruckkoeffizient $\lambda = 0{,}92$ und in Sollstedt in einer Teufe von 589 m $\lambda = 0{,}76$ ermittelt. In der Tiefbohrung in Kehmstedt lag in einer Teufe von 362 m der Streubereich für λ zwischen 0,91 und 0,98 und in einer Teufe von 396 m zwischen 0,75 und 0,80. Die Ursache für diese Differenzen zu den eigenen Messungen kann in der lokalen Ausbildung des Anhydrits (Steinsalzgehalt, Klüftigkeit) oder in lokalen Spannungserhöhungen infolge von Überzugswirkungen aus den kriechfähigen Salinargesteinen liegen. Die Vertikalspannung wurde bei den pneumatischen Hydrofracversuchen nicht gemessen, sondern aus der mittleren Wichte des überlagernden Deckgebirges berechnet.

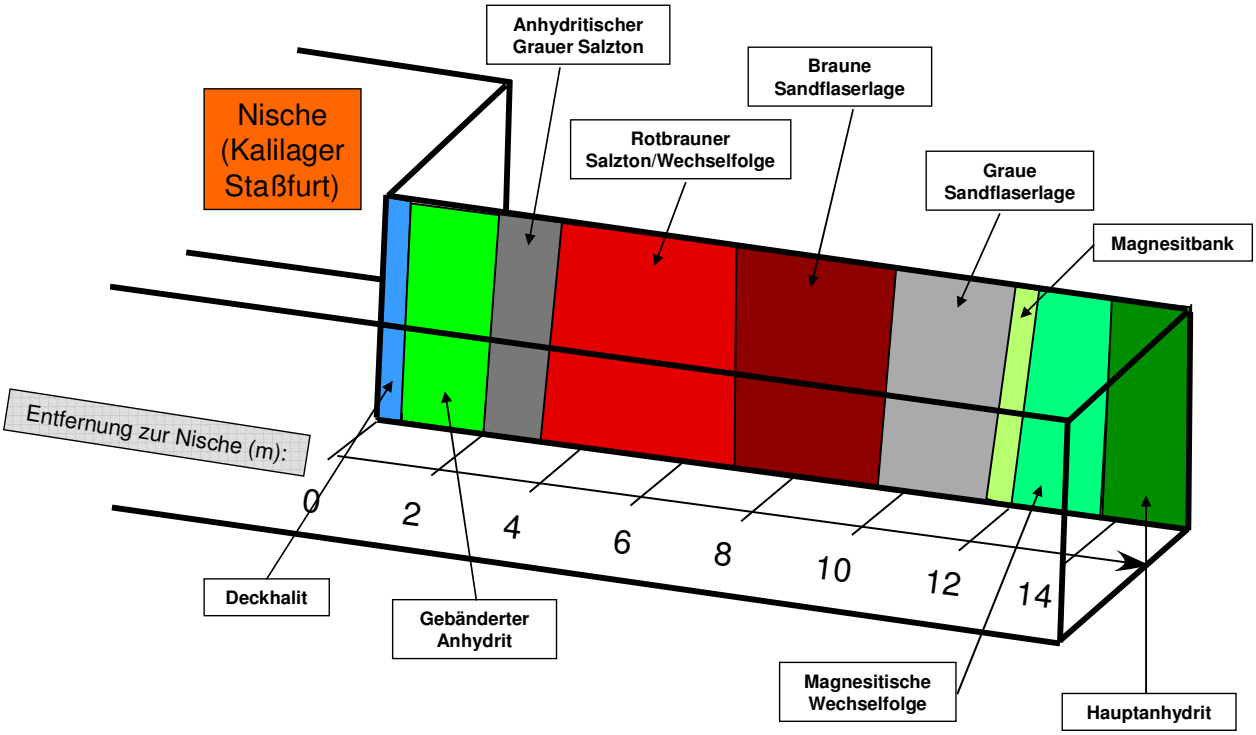


Abb. 7.6: Aufschluss des Grauen Salztons in der Wetterstrecke Ost Pöthen

Der Graue Salzton ist in Pöthen in einer Wetterstrecke aufgeschlossen. In Abbildung 7.6 sind die aufgeschlossenen feinstratigraphischen Horizonte skizziert. Die Bohrlöcher mit einer Länge bis 15 m wurden in einer Stoßhöhe von 1 m horizontal in den Stoß gebohrt.

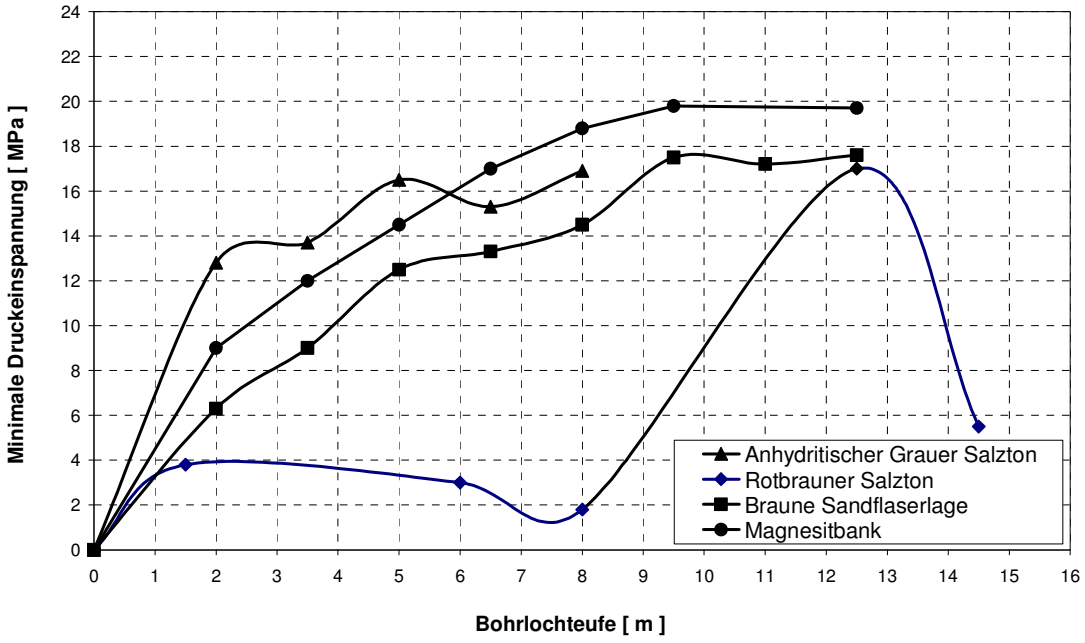


Abb. 7.7: Im Grauen Salzton Pöthen (Teufe 1013 m) ermittelte Minimalspannungen

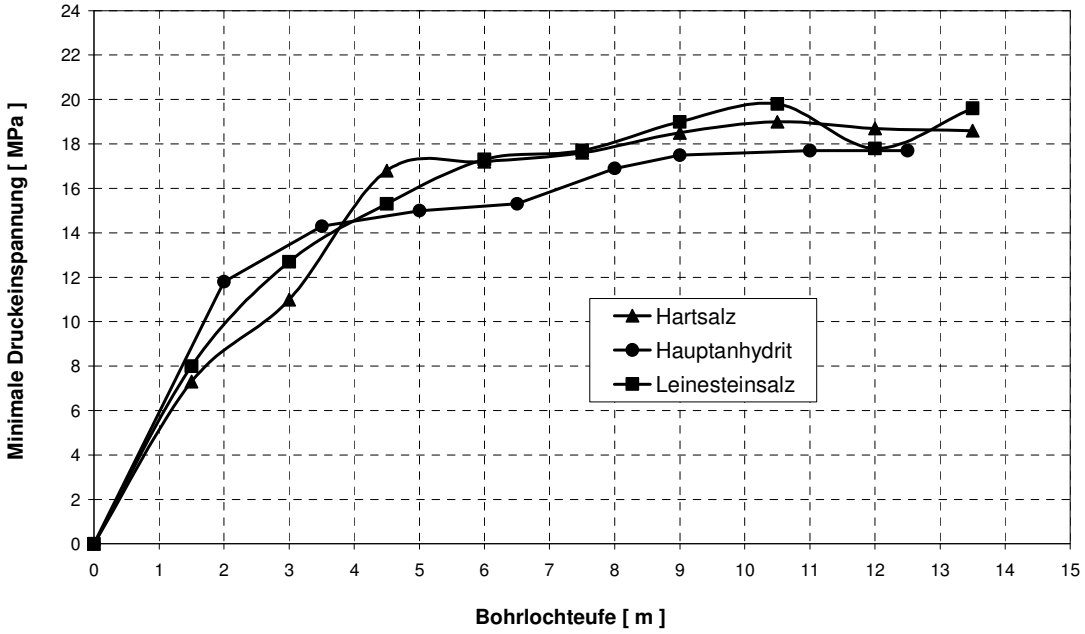


Abb. 7.8: In den Nachbarschichten zum Grauen Salzton Pöthen (Teufe 1013 m) ermittelte Minimalspannungen

Die Resultate der Spannungssondierungen sind in den Abbildungen 7.7 und 7.8 dargestellt. Es konnten folgende stratigraphischen Horizonte vermessen werden:

- Kalilager Staßfurt (Hartsalz)
- Anhydritischer Grauer Salzton
- Rotbrauner Salzton / Wechsellage
- Braune Sandflaserlage
- Magnesitbank
- Hauptanhydrit
- Leinesteinsalz.

Das Ziel bestand darin, zu untersuchen, inwieweit diese festigkeitsmechanisch sehr unterschiedlich reagierenden Schichten (überwiegend elastischer Hauptanhydrit, plastisches Leinesteinsalz, gebrächer Rotbrauner Salzton) den Spannungsaufbau im Streckenkonturbereich beeinflussen. Die bergbaulichen Aufschlussverhältnisse waren ideal für eine solche Untersuchung.

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass der Spannungsaufbau im Hartsalz und Leinesteinsalz nahezu identisch ist und auch kaum Unterschiede zum festen und überwiegend elastisch reagierenden Hauptanhydrit sowie zum Anhydritischen Grauen Salzton und zur Magnesitbank zeigt. Ab einer Konturtiefe von 4 - 5 m wird eine Minimalspannung von 15 - 20 MPa nachgewiesen.
In den Zonen des Grauen Salztons mit einer mittleren Festigkeit (Braune Sandflaserlage) haben offensichtlich Streckenkonturbereiche bis in etwa 9 m Konturtiefe mit Entfestigungserscheinungen reagiert, die dazu führten, dass der Spannungsaufbau bis zum konstanten Niveau flacher verläuft. Ab 9 m sind gleichfalls Minimalspannungen von 17 - 18 MPa nachweisbar.
Deutlich unterschiedlich stellt sich der Spannungsaufbau in der Zone mit der geringsten Festigkeit, dem Rotbrauen Salzton dar. Hier konnte nur an einem Messpunkt in 12,5 m Stoßteufe die Gebirgsspannung zuverlässig ermittelt werden. An den anderen Messpunkten war infolge von Entfestigungen im Konturbereich eine signifikante Spannungsverringerung und verringerte Dichtheit des Untersuchungsabschnittes festzustellen.

Die Hydrofracrisslage wurde am Messort Salzton nicht bestimmt.

Das Bohrlochschlitzen wurde gleichfalls in Horizontalbohrungen zum Streckenstoß bis in eine Konturtiefe von 7 m (Stoßhöhe 1 m) im Gebänderten Anhydrit und der Magnesitischen

Wechselfolge eingesetzt. Diese feinstratigraphischen Horizonte gehören entsprechend der Laborversuche zu den festen und vorwiegend elastisch reagierenden Partien des Grauen Salztons. Die elastischen Parameter wurden aus Tabelle 5.1 entnommen.
Der Spannungsaufbau außerhalb des Hohlraumeinflusses der Strecke ist durch eine nahezu vertikal wirkende Maximalspannung von 23 - 25 MPa, dies entspricht betragsmäßig dem Teufendruck, gekennzeichnet. Die Minimalspannung von 14 - 18 MPa wirkt nahezu horizontal und repräsentiert betragsmäßig die mit dem Hydrofrac in den festen Partien sondierten Minimalspannungen. Der Spannungsaufbau bis 7 m deutet auf Entfestigungserscheinungen hin, die schon mit dem Hydrofracverfahren nachgewiesen wurden.

Damit ist auch am Messort Salzton mit den beiden Spannungsmessverfahren eine einheitliche Aussage zum Spannungsaufbau abzuleiten. Der räumliche Hauptspannungstensor mit den Wirkrichtungen der Spannungen im Raum konnte auf Grund der Aufschlussverhältnisse nicht ermittelt werden.

Zur Aufzeichnung der Hohlraumkonvergenzen in der Anhydritkammer wurden in der Sohle, Firste und beiden Stößen jeweils vier Einfachstangenextensometer mit Längen von 1, 3, 8 und 11 m installiert. Begleitende gebirgsmechanischen Modellrechnungen hatten gezeigt, dass die Kammerkonvergenz in dem festen und steifen Gestein im Wesentlichen durch die Gebirgsbewegung im unmittelbaren Konturbereich verursacht wird und bei einer Konturtiefe von 11 m abgeklungen ist. Dieser Ankerpunkt kann demzufolge als unbeeinflusster Bezugspunkt für die Kammerkonvergenz verwendet werden und die Dehnungen der unterschiedlichen Extensometer gestatten eine Differenzierung des Verschiebungsfeldes. Der Bohrlochdurchmesser betrug 42 mm. Die Extensometer wurden am IfG Leipzig gebaut und bestehen aus Ankern, die mittels Klebetechnik fixiert werden und Glasfaserstangen (∅ 1 cm) als Verbindungselement mit einer Umhüllung aus Kunststoffrohr (PVC). Die Ablesung am Messkopf erfolgte diskontinuierlich mit einer digitalen Schiebelehre. Der Ableserhythmus war nach der Installation zweiwöchentlich und später zweimonatlich. Die Übertragungsgenauigkeit einer Glasfaserstange bis 20 m Länge wird bei vergleichbaren Systemen (Glötzl) mit 0,02 mm angegeben. Dieser Wert stimmt auch mit den Angaben von PAUL, A.; GARTUNG, E. (1991) überein. Danach sind Genauigkeiten von 0,025 bis 0,1 mm erreichbar.
Im Verlauf von über zwei Jahren ab dem 07.10.1992 waren an den Extensometern nur sehr geringe Dehnungen im Bereich der Messgenauigkeit nachweisbar. Eine Konturauflockerung bzw. Kammerkonvergenz war nicht zu erkennen. Setzt man die aus den Kriechversuchen im Labor abzuschätzende Größenordnung eines Kriechvermögens von 10^{-12} s^{-1} (0,03 ‰ pro Jahr) an und bezieht diese auf einen Entspannungsbereich von 3 m, so wäre in einem Jahr eine Dehnung von etwa 0,1 mm zu erwarten. Die Messwerte liegen in dieser Größenordnung,

sind aber auf Grund der großen Streuung, vermutlich auch durch die erreichte Auflösungsgrenze des Messsystems, nicht belastbar. Als Fazit muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass mit der angewandten diskontinuierlichen Messung keine Hohlraumkonvergenzen ausgewiesen werden können.

7.3 Messungen im Hauptanhydrit und Grauen Salzton in Bernburg

Die Auffahrungssituation der Anhydritkammer Bernburg ist in den Abbildungen 4.4 und 4.6 dargestellt. Die Messkammer wurde im Dezember 1993 aufgefahren. Da infolge der Aufzeichnung der Hohlraumkonvergenzen der Anhydritkammer in Pöthen bekannt war, dass der Anhydrit nach der Auffahrung kaum noch nachweisbare gebirgsmechanische Reaktionen (Konvergenzen, Spannungsumlagerungen) zeigt und auf Grund seiner kompakten Ausbildung und des hohen E-Moduls den elastischen Spannungs- und Deformationszustand im Wesentlichen beibehält, wurde in Bernburg der Untersuchungsschwerpunkt bei der messtechnischen Überwachung des Auffahrungsprozesses gesehen.

Zur Sondierung des Ausgangsspannungszustandes in der Wallstruktur vor der Auffahrung (siehe Abbildung 4.6) wurde im Sommer 1993 eine Fracbohrung in Richtung des Konturbereiches der zukünftigen Kammer gestoßen. Das Bohrloch verläuft horizontal in 1 m Stoßhöhe in Richtung WNW und wurde nach der Spannungsmessung als Extensometerbohrloch B 501 weiterverwendet. In Abbildung 7.9 ist ausgewiesen, dass ab einer Bohrlochteufe von 8 m Minimalspannungen von 18 - 19 MPa existieren. Sie besitzen damit den gleichen Betrag wie in Pöthen, obwohl die Teufe in Bernburg nur halb so groß ist und der petrostatische Teufendruck demzufolge etwa 12 MPa beträgt. Eine Erklärung für die Höhe der Spannungen kann in Auswertung der Resultate von numerischen Modellrechnungen in der Abbildung 7.10 gegeben werden.

Auch nach der Kammerauffahrung wurde in einer gleichfalls in Richtung WNW in die Ortsbrust gestoßenen Horizontalbohrung Einspannungen von 17 bis 19 MPa ermittelt. Diese Größenordnung war schon ab einer Konturtiefe von 2 m nachweisbar. In einer in den linken Stoß gesetzten Horizontalbohrung sowie in einer vertikalen Sohlenbohrung erreichten die minimalen Druckeinspannungen ab Konturtiefen von 4 m etwa 15 MPa. In der vor der Auffahrung sondierten Bohrung ist das bis in eine Stoßteufe von 7,5 m noch anstehende Steinsalz an den etwas geringeren Einspannungen erkennbar. Das bedeutet, Steinsalz ist in der Lage, in der Nähe von Hohlräumen mittels Kriechprozessen der Gebirgsspannung auszuweichen.

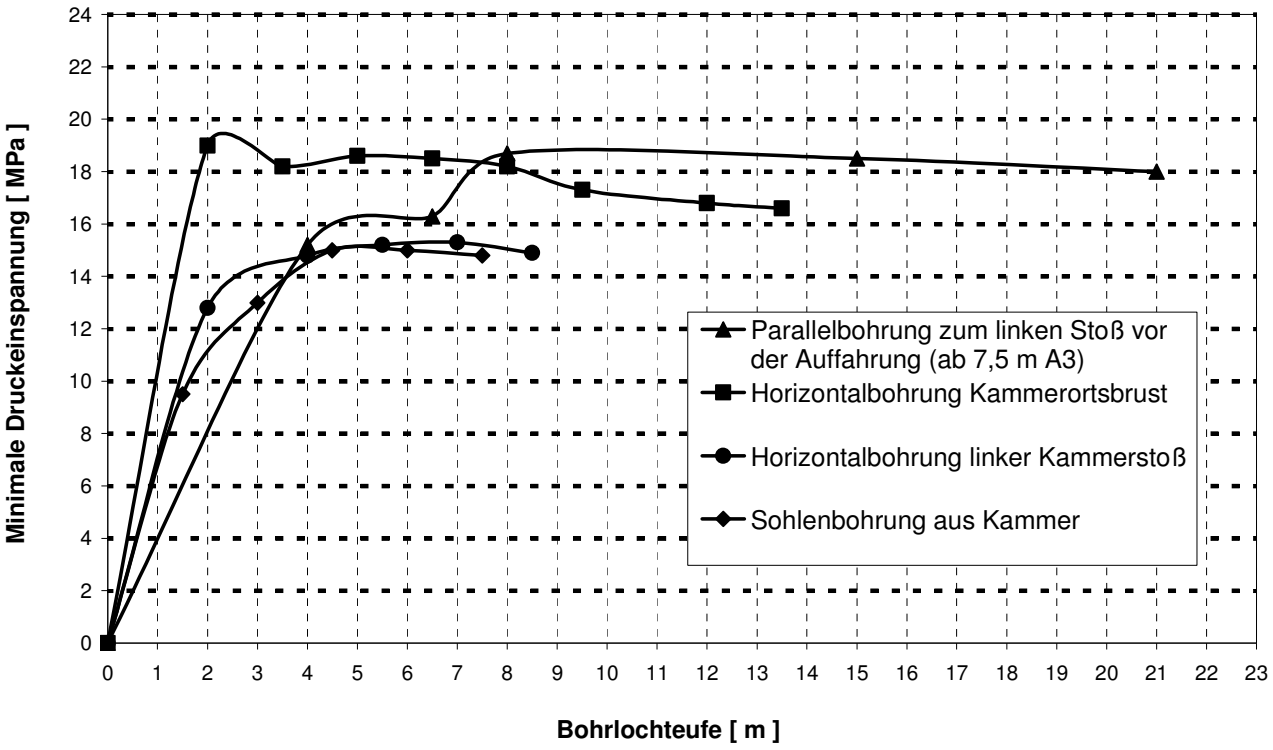


Abb. 7.9: In Bernburg vor und nach der Auffahrung der Anhydritkammer ermittelte Minimalspannungen (Teufe 510 m)

Zur Erklärung der erhöhten Spannungen im Anhydrit am Rand der Steinsalzeinmuldung (siehe Abbildung 4.6) wurde ein Rechenmodell mit einer Breite von 150 m und einer Höhe von 100 m diskretisiert, welches einen Vertikalschnitt durch den Wartungsplatz in Richtung NW-SE repräsentiert. Der untere Modellrand ist vertikal und die seitlichen Modellränder sind horizontal fixiert. Die Modellauflast an der Modelloberkante beträgt 10,7 MPa. In der Abbildung 7.10 sind die vom Vertikalschnitt erfassten Streckenstummel im Steinsalz und die Schichtgrenze zum unterlagernden Hauptanhydrit zu erkennen. In dem mit einem Pfeil gekennzeichneten Anhydritbereich liegt die zukünftige Kammer.

Tabelle 7.1: Materialparameter für die Modellierung der zeitabhängigen Spannungsumlagerung infolge Kriechen vom Steinsalz auf den Anhydrit

	ρ (g/cm^3)	**E (GPa)**	**ν**	**n**	**A (MPa$^{-4,8}$·d^{-1})**
Hauptanhydrit	2,9	60	0,3	-	-
Steinsalz	2,15	25	0,25	4,8	$9{,}6 \cdot 10^{-12}$

Die verwendeten Stoffparameter sind in Tabelle 7.1 angegeben. Sie wurden für den Anhydrit aus den hier vorgelegten Laborversuchen und bzgl. des Steinsalzes aus SALZER, K. (1995) entnommen. Für den Anhydrit kam ein elastischer Stoffansatz und für das Steinsalz ein Kriechgesetz nach NORTON zur Anwendung.

Nach der Modellsetzung wurde die achtjährige Standzeit der Streckenstummel des Wartungsplatzes mit dem Kriechansatz nachgebildet und infolge der Spannungsumlagerungen auf den steifen Hauptanhydrit insbesondere im zukünftigen Auffahrungsbereich für die Messkammer an der Schichtgrenze eine deutliche Spannungserhöhung berechnet. Entsprechend Abbildung 7.10 wird eine Maximalspannung zwischen 20 und 25 MPa und eine Minimalspannung zwischen 15 und 20 MPa ausgewiesen. Die gemessene Minimalspannungen von 18 bis 19 MPa lassen sich somit trotz der geringen Teufe von etwa 510 m gut begründen. Die Spannungserhöhung in der Nähe von steifen Gebirgsschichten infolge der Kriechprozesse im Steinsalz ist ein typischer und in Salzbergwerken häufig beobachteter Prozess.

Die Lage der Hydrofracrisse wurde im Anhydrit Bernburg nicht wie in Pöthen mittels Überbohren, dies war zu aufwendig, sondern mit Schallemissions(SE)messungen bestimmt. Dazu erfolgte die Erteilung eines Unterauftrages an die Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik mbh Ober-Mörlen. Die separaten SE-Aufnehmer wurden, um Bohrkapazität zu sparen, in schon vorhandene Messbohrlöcher für das Bohrlochschlitzen eingebaut. Im Messeinsatz sollte erstmals untersucht werden, welche Frequenzen beim Hydrofrac in situ im Anhydrit ausgesendet werden und ob sich die Ereignisse so lokalisieren lassen, dass eine Risslage erkennbar ist. Weitere Ausführungen zum Verfahren und Equipment sollen an dieser Stelle unterbleiben. Sie folgen im Zusammenhang mit dem Bau und der Erprobung einer Hydrofracsonde mit kombinierter SE-Rissortung durch IfG Leipzig und GMuG Ober-Mörlen, die den Vorteil besitzt, dass keine zusätzlichen Bohrlöcher für die SE-Aufnehmer mehr notwendig sind.
Die meisten ortbaren Ereignisse konnten in den Bohrlochteufen von 2 bis 5 m detektiert werden. Die Rissausdehnung betrug generell 1 - 2 m. Aus allen Rissen deutete sich eine halbsteile Lage mit Streichrichtung Nord-Süd und einem Einfallen unter etwa 50 - 80 Grad nach Ost an. Damit liegen die Risse tangential zur Oberfläche der Anhydritwallstruktur an der nordwestlichen Begrenzung der Steinsalzeinmuldung.

Abb. 7.10: Aufbau der maximalen (oben) und minimalen (unten) Hauptspannung in MPa am WQ 13 vor der Auffahrung der Anhydritkammer (Schichtgrenze zwischen dem unterlagernden Hauptanhydrit und Leinesteinsalz gestrichelt)

Die drei Bohrungen für den Einsatz der Schlitztechnik in der Anhydritkammer Bernburg mit einem Durchmesser von 101 mm und einer Länge von jeweils 10 m spannen wieder ein orthogonales Rechtssystem auf:

Bohrung	Streichen [in Grad]	Einfallen [in Grad]
1	211	0
2	301	0
3	0	90

Aus den ebenen Spannungsmessungen wurde analog der in Pöthen angewandten Methode für den Messbereich ab 3 m der räumliche Hauptnormalspannungstensor berechnet:

Hauptspannung	Betrag [MPa]	Streichen [Grad]	Einfallen [Grad]
σ_1	21	331	67
σ_2	19	165	22
σ_3	14	73	5

Damit ist der Spannungstensor in Betrag und Richtung vergleichbar mit der Anhydritkammer in Pöthen ausgebildet. Wie bereits mit den SE-Messungen festgestellt, erfolgt offensichtlich eine Orientierung an der Schichtgrenze zwischen Anhydrit und Steinsalz. Die mittlere und maximale Hauptspannung spannen eine Ebene auf, die etwa den Hydrofracrissen entspricht. Die Maximalspannung ist mit 21 MPa um 75 % größer als der Teufendruck und wirkt nahezu seiger. Die Minimalspannung mit 14 MPa stimmt betragsmäßig mit der Untergrenze der Hydrofracmessungen überein. Ihre horizontale Wirkrichtung WSW-ENE korreliert mit der beim Hydrofrac auftretenden Wirkrichtung. Der Seitendruckkoeffizient $\lambda = \sigma_3/\sigma_1$ beträgt 0,67. Gleichfalls ist, wie schon in Pöthen, eine Übereinstimmung mit der vorherrschenden Kluftlage in der Anhydritkammer gegeben.

Mit beiden Spannungsmessverfahren lässt sich auch an diesem Messort ein übereinstimmender Spannungstensor finden, der ebenfalls mit den tektonischen Beanspruchungsrichtungen korreliert.

Der Graue Salzton ist in Bernburg in der Transportstrecke XII teilweise ausgebaut, so dass die feinstratigraphischen Horizonte nur über eine lange Horizontalbohrung durch den Carnallitit aus einer Streckenerweiterung im Steinsalz Na2 (siehe Abbildung 7.11) erreicht werden konnte. Der Bohrungsdurchmesser betrug 42 mm.

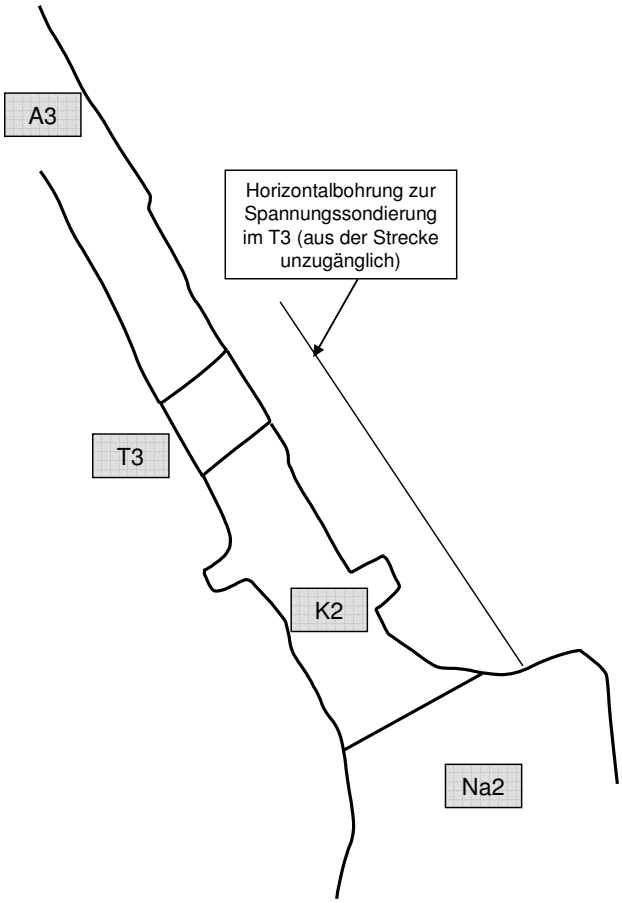


Abb. 7.11: Aufschluss des Grauen Salztons in der Transportstrecke XII in Bernburg (Teufe 410 m)

In der Abbildung 7.12 sind die im Anhydritischen Grauen Salzton und der Grauen Sandflaserlage ermittelten minimalen Druckeinspannungen in Abhängigkeit von der Konturtiefe der Strecke angegeben. In den tonig-sandigen Partien bestanden Schwierigkeiten mit der Sondenabdichtung an der Bohrlochkontur und es wurden keine Messwerte ermittelt. Der unregelmäßige Verlauf der sondierten Einspannungen weist auf Spannungsumverteilungen zwischen nachgiebigen Partien mit Entfestigungserscheinungen und festeren Partien hin.

Erhöhte Einspannungen im Anhydritischen Grauen Salzton und Entfestigungen im tonig-sandigen Teil wurden auch mit dem Bohrlochschlitzen ausgewiesen. Die Resultate stimmen mit horizontal wirkenden Minimalspannungen von 4 – 8 MPa sehr gut mit den Hydrofrac-ergebnissen überein. Die vertikalen Maximalspannungen liegen zwischen 6 und 12 MPa. Der

räumliche Hauptspannungstensor mit den Wirkrichtungen der Spannungen im Raum konnte, wie in Pöthen, auf Grund der Aufschlussverhältnisse nicht ermittelt werden.

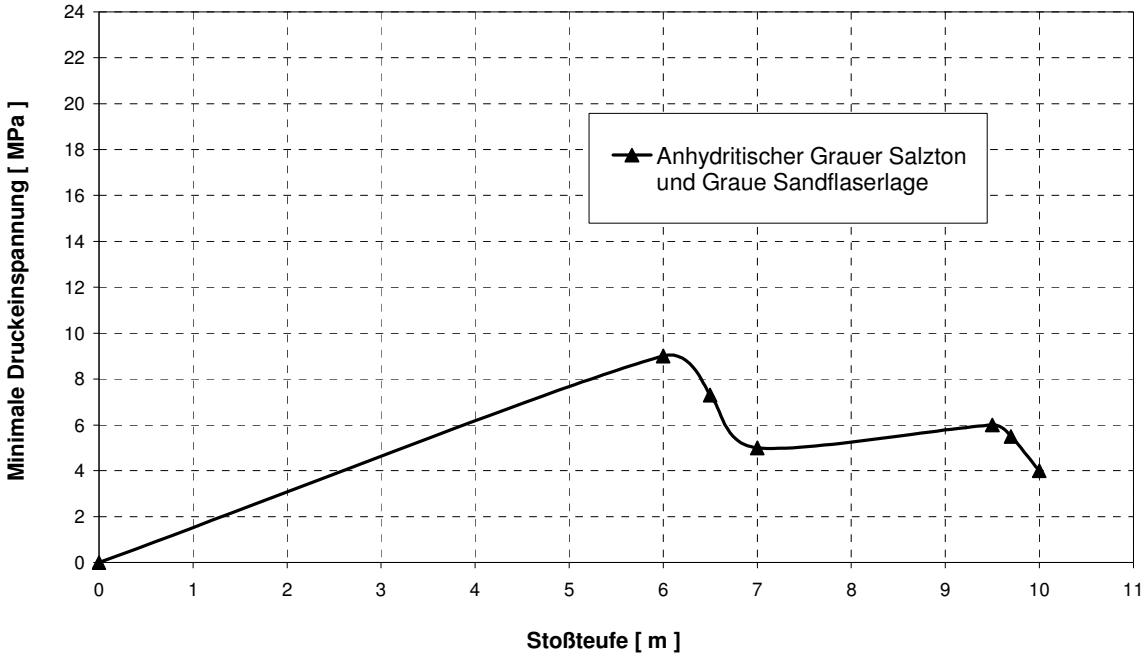


Abb. 7.12: Minimalspannungen im Grauen Salzton in der Transportstrecke XII in Bernburg (Teufe 410 m)

Auf Grund der günstigen Auffahrungssituation bestand in Bernburg die Möglichkeit, die Entspannungsdeformationen bei der Auffahrung der Anhydritkammer mittels Stangenextensometern von benachbarten Strecken aus (Abbildung 4.6) zu messen. Danach wurden in einem zweiten Schritt weitere Extensometer in der aufgefahrenen Kammer installiert und die Konturdehnungen aufgezeichnet.

Die verwendeten Einfachstangenextensometer wurden am IfG Leipzig gebaut und bestanden aus Ankern, die mittels Klebetechnik fixiert wurden, Glasfaserstangen ∅ 1 cm als Verbindungselement, die mit einem PVC-Rohr umhüllt waren, und dem Standardmesskopf. Da sich bei den Messungen in Pöthen gezeigt hatte, dass eine manuelle diskontinuierliche Ablesung der Extensometer mit einer Fühllehre zu stark streuenden Resultaten führt, wurde in Bernburg auf eine kontinuierliche elektrische Messung orientiert. Außerdem können die beim Sprengen auftretenden kurzzeitigen Bewegungen ohnehin nicht manuell erfasst werden. Die elektrischen Wegaufnehmer mit Leitplastikwiderstandselement besitzen eine Genauigkeit von 0,01 mm. Die Messung wurde über ein auf einem Laptop installiertes Programm gesteuert.

Die Installation von drei Extensometern von einer höher liegenden Bandstrecke und zwei Extensometern von einer benachbarten Wetterstrecke jeweils quer zur aufzufahrenden

Kammer sowie eines Extensometers parallel zur Kammerlängsachse erfolgte im November 1993. Die Längen betrugen 10 bis 27 m. Die Bohrlöcher mit Durchmessern von 42 mm wurden so gebohrt, dass die Ankerpunkte etwa 1 m von der zukünftigen Kammerkontur entfernt lagen. Die Messkammerauffahrung (Länge 10 m, Querschnitt 6 m · 4 m) erfolgte sprengtechnisch mit 4 Abschlägen von jeweils 2,5 m an folgenden Tagen:

13.12.1993 13.00 Uhr
15.12.1993 13.00 Uhr
17.12.1993 13.00 Uhr
21.12.1993 21.00 Uhr.

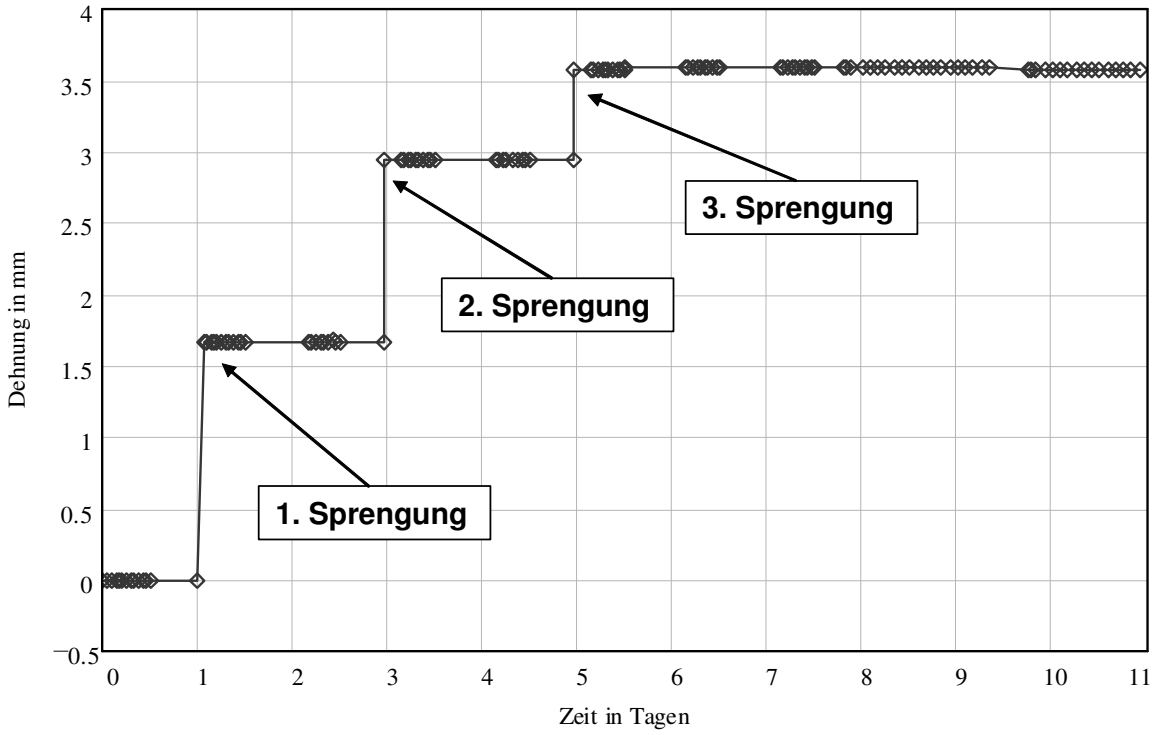


Abb. 7.13: Dehnung des Extensometers parallel zur Kammerlängsachse bei der Kammerauffahrung mittels Sprengen (Zeitachse ab 12.12.1993, 12.00 Uhr)

Ein deutliches Dehnungssignal beim Sprengen wurde nur vom Extensometer B 501, welches in etwa 1 m Entfernung parallel zur Kammerkontur verläuft, angezeigt (Abbildung 7.13). Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass neben einer elastischen Entspannung auch die dynamischen Konturauflockerungen infolge der Sprengungen im Wartungsplatz erfasst wurden. Die Dehnung der Messbasis wurde wesentlich durch klastische Bewegungen (Relativverschiebungen der Anhydritbruchkörper im Konturbereich) verursacht.

Die fünf anderen, normal zur Kammerlängsachse messenden, Extensometer wiesen keine signifikanten Entspannungen im Zusammenhang mit der Auffahrung auf. Alle Messwerte streuten um die Genauigkeitsgrenze der elektrischen Wegaufnehmer von 0,01 mm, obwohl in Auswertung der begleitenden numerischen Modellrechnungen Bewegungen in Hohlraumrichtung von 1,6 mm vertikal und 0,5 mm horizontal erwartet wurden. Es wird vermutet, dass die Glasfaserstangen als Verbindungselement mit der Übertragungsgenauigkeit von 0,025 bis 0,1 mm für eine solche Messaufgabe im Hauptanhydrit mit sehr kleinen Entspannungsdeformationen ungeeignet sind und die Verwendung von Stahlgestängen besser gewesen wäre. Die Extensometer „verschluckten“ die geringen Gebirgsdehnungen und konnten diese deshalb nicht anzeigen.

Etwa 4 Monate nach der Auffahrung erfolgte die Installation von jeweils drei Stangenextensometern mit Längen von 1 m, 4 m und 7 m in vier Richtungen in Kammermitte (Abbildung 7.14). Die Zielstellung wurde in einer langfristigen Überwachung der Kammerkonvergenz gesehen. Es sollte geklärt werden, ob im überwiegend elastisch reagierenden Hauptanhydrit nach der Auffahrung der Hohlraumquerschnitt tatsächlich konstant bleibt oder ob geringe Konvergenzraten nachweisbar sind. Für eine Bewertung des gebirgsmechanischen Verhaltens in der Nachbetriebsphase sind solche Belege wesentlich.

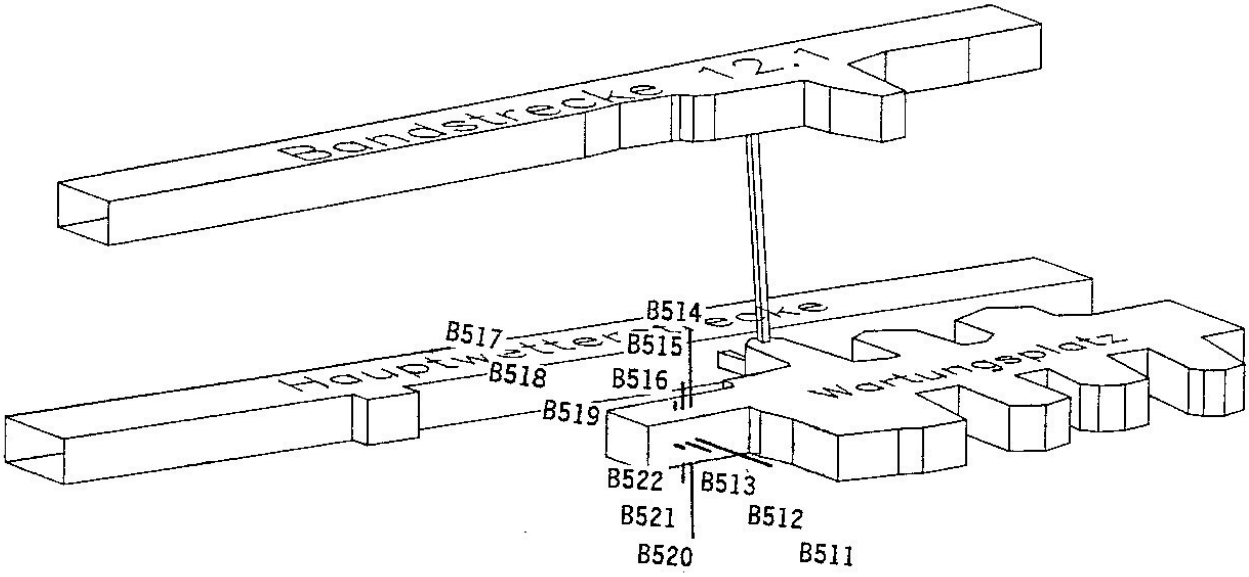


Abb. 7.14: Lage der Stangenextensometer in der Anhydritkammer Bernburg

Die Messwerterfassung erfolgte mit elektrischen Wegaufnehmern mit einer Auflösungsgenauigkeit von 10^{-3} mm. Die Steuerung der Messungen (Kanalaufruf, Speicherung) wurde wieder über einen Laptop vorgenommen, der gemeinsam mit der Spannungsversorgung, dem Messstellenumschalter und dem A/D-Wandler über die serielle Schnittstelle mit der Datenerfassung verbunden und in einem gemeinsamen Messschrank untergebracht war.

Die gemessenen Bewegungen ab dem 27.04.1994 bis zum 13.11.1997 sind beispielhaft für die Horizontalextensometer B 517 bis B 519 in Abbildung 7.15 dargestellt. Die Zeitachse beginnt wieder am 12.12.1993, 12.00 Uhr. Im gesamten Zeitraum von über 3,5 Jahren funktionierte die Anlage einwandfrei, wobei sich als besonders vorteilhaft die automatische Startoption des Messprogramms nach einem Netzausfall erwies.

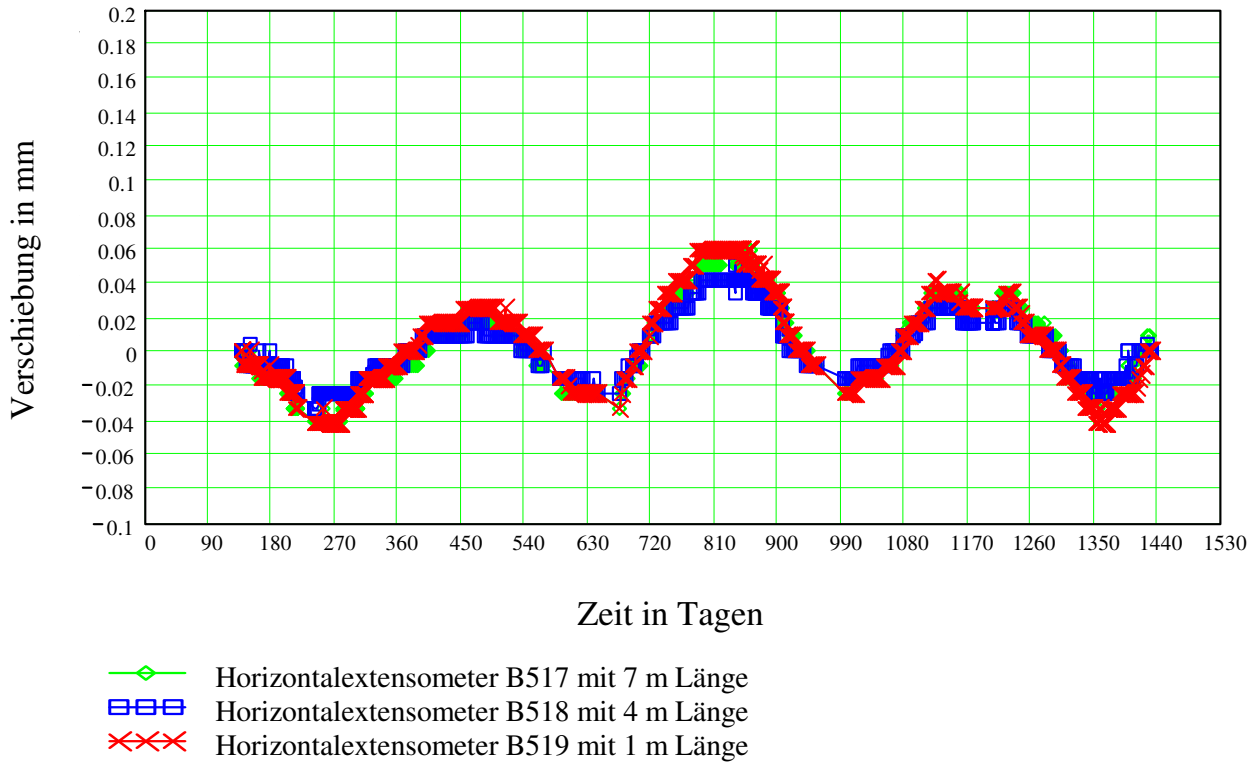


Abb. 7.15: Horizontalverschiebungen der Kontur (Konvergenz positiv)

Generell ist festzustellen, dass die Konturdehnungen im Gesamtzeitraum mit Raten von 0,01 bis 0,02 mm/a noch kleiner als in Pöthen waren und damit für bergbauliche Bedingungen praktisch unbedeutend sind. Auffallend und wesentlich stärker wirkte jedoch ein jahreszeitlicher Gang einer scheinbaren Konvergenz im Winter und Divergenz im Sommer. Zur Untersuchung dieses Messeffektes wurde ab August 1994 die Temperatur in 1 m Stoßteufe neben den Extensometern gemessen. Sie blieb bei etwa 24° C konstant und war

als Ursache des Messwertganges auszuschließen. Die Grubenwetter haben vom einziehenden Schacht bis zum Messort eine Entfernung von etwa 3 km zurückgelegt und dabei eine gleich bleibende Temperatur angenommen, die einem übertägigen Mittelwert für die Sommermonate entspricht. Eine Erklärung lieferte erst die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit der Grubenwetter am Messort (Abbildung 7.16). Die relative Luftfeuchtigkeit im Sommer von 50 % bis 60 % entspricht übertägigen Angaben des Deutschen Wetterdienstes. Im Winter enthält die in den Schacht eintretende kalte Luft jedoch wesentlich weniger Wasserdampf, woraus bei konstanter Grubentemperatur eine wesentlich geringere relative Luftfeuchtigkeit bis unter 5 % resultiert. Die Beobachtungen eines „trockenen“ Bergwerkes im Winter und „feuchten“ Bergwerkes im Sommer können in den meisten über Schächte erschlossenen Gruben gemacht werden.

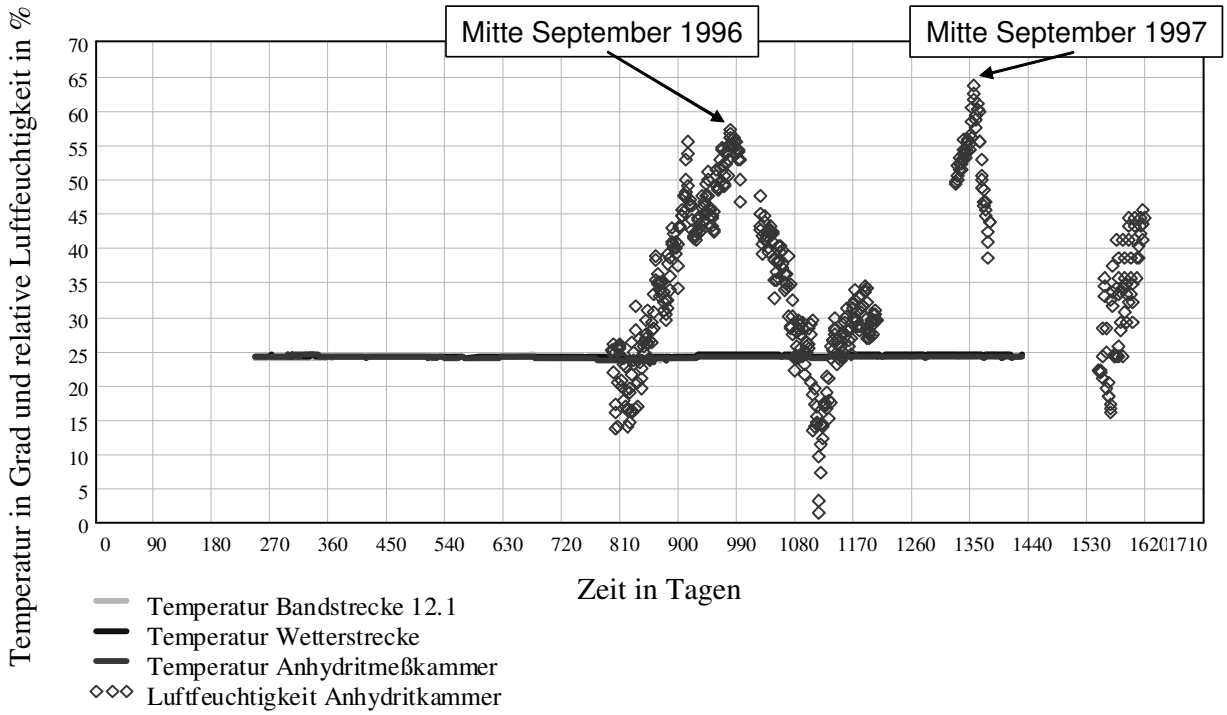


Abb. 7.16: Temperaturen in 1 m Stoßteufe in Grad und relative Luftfeuchtigkeit in
Nullpunkt der Zeitachse 12.12.1993, 12.00 Uhr

Die Übereinstimmung der Messwertverläufe führt zur Erklärung, dass sich der gemessene jahreszeitliche Gang auf eine Ausdehnung der Glasfaserstangen durch erhöhte Feuchtigkeit im Sommer (scheinbare Kammerdivergenz bei unbeweglichem Anhydrit) und eine Kürzung im Winter (scheinbare Kammerkonvergenz bei unbeweglichem Anhydrit) zurückführen lässt. Eine zunächst vermutete „Schwellung“ des Anhydrits im Sommer würde zu einem entgegengesetzten Messresultat führen. Die Grubenwetter gelangen über die beim

Sprengen entstandenen Konturrisse und Stoßabschalungen in die Extensometerbohrlöcher und beeinflussen den konturnahen Abschnitt der Glasfaserstangen. In einer separaten Messreihe mit einer 1 m langen Glasfaserstange konnten die gleichen Größenordnungen von 2 - 3 Hundertstel Millimeter Dehnung pro Monat im Sommer und Stauchung im Winter nachgewiesen werden.

Bezüglich der eigentlich zu beobachteten Konvergenz der Anhydritkammer lässt sich für den Messzeitraum eine kaum erkennbare Konturauflockerung von 0,01 bis 0,02 mm/a ableiten. Bezogen auf eine Messbasislänge von 3 m wie in Pöthen sind das $3 \cdot 10^{-3}$ bis $6 \cdot 10^{-3}$ Promille Dehnung pro Jahr. Ein zu berücksichtigendes Kriechverhalten lässt sich aus dieser geringen Größenordnung nicht ableiten. In den 3,5 Jahren konnte praktisch keine Hohlraumkonvergenz im Anhydrit festgestellt werden.

Die Wallstruktur ist danach in der gebirgsmechanischen Reaktion als massiv und kompakt mit einem sehr steifen elastischen Spannungs/Deformationsverhalten zu betrachten. Weder bei der Auffahrung, noch in einem mehrjährigen Messzeitraum danach konnten mit den verwendeten Messmitteln Entspannungs- oder Kriechdeformationen nachgewiesen werden.

Visuell waren an der Kammerfirste nach einigen Jahren geringfügige Abschalungen erkennbar, die im Rahmen der üblichen bergbaulichen Kontrollmaßnahmen beraubt wurden. Weiterhin fiel eine Feuchtstelle an der Kammerortsbrust auf, wo aus einer vertikalen und steilherzyn streichenden Doppelkluft bis zur Gegenwart tropfenweise Salzlösung austritt.

Die Festigkeitsgrenze des Hauptanhydrits wird bei den Auffahrungen bei weitem nicht erreicht und im Konturbereich ist bereits in geringen Tiefen der Aufbau der Gebirgsspannung nachweisbar. Ein vergleichbarer Befund liegt für die magnesitischen und anhydritischen Partien des Grauen Salztons vor. Im Rotbraunen Salzton und der Sandflaserlage ist im Konturbereich von Strecken und Kammern jedoch mit Entfestigungen zu rechnen, die spezielle bergbauliche Ausbaumaßnahmen erfordern. In größeren Konturtiefen konnten auch hier die ungestörten Gebirgsspannungen nachgewiesen werden.

7.4 Konstruktion und Bau einer Hydrofracsonde mit integrierter SE-Rissortung

7.4.1 Kurzbeschreibung der Bohrlochsonde

Wie bereits ausgeführt, wird die Hydrofrac-Spannungssondierung im Vergleich zu anderen Spannungsmessungen favorisiert, da nur hier direkt und in einem kurzen Messzeitraum mittels des in das Gebirge eingepressten Fluids der Einspannungszustand im sondierten Bereich ermittelt werden kann. Die Methode der hydraulischen Risserzeugung (hydraulic fracturing) gibt Aufschluss über die Minimalspannungen im Gestein am Sondierungsort. Diese sind aus dem Ruhedruck ableitbar. Zur Interpretation eines solchen Aufreißversuchs, insbesondere um auch die Richtung der kleinsten Hauptspannungskomponente zu bestimmen, ist es notwendig, Orientierung und Ausdehnung des entstandenen Risses festzustellen. Hierzu sollen Schallemissionsmessungen herangezogen werden. Der Begriff Schallemission wird im Folgenden mit SE abgekürzt.

Wie oben beschrieben, wurde bei der Spannungssondierung in der Umgebung einer Messkammer im Anhydrit in der Grube Bernburg festgestellt, dass die Hydrofrac-Initiierung mit SE-Messungen verfolgt werden kann und welche Frequenzen dabei auftreten. Um die damals noch notwendigen zusätzlichen Bohrlöcher für die SE-Aufnehmer einzusparen, wurde als Vorhabensziel in KAMLOT, P.; U. A. (1999) die Konstruktion und der Bau einer Hydrofracsonde mit integrierten SE-Aufnehmern formuliert, mit denen die Ausdehnung und Orientierung des Risses direkt an der Bohrung detektiert werden kann. Die Empfindlichkeit bei der Registrierung der mikroakustischen Signale ist somit unabhängig von der Bohrlochteufe, da der Abstand der Aufnehmer zum Fracintervall konstant bleibt.

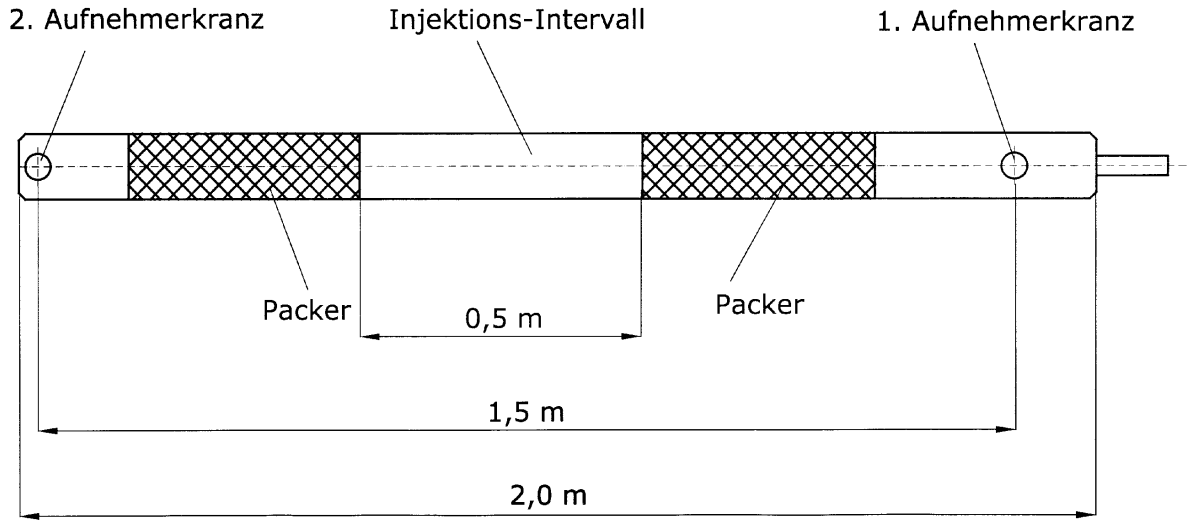


Abb. 7.17: Schematischer Aufbau der Bohrlochsonde

Die Messsonde sollte in Bohrlöchern mit bergbaulich gebräuchlichen Durchmessern von 101 mm einsetzbar sein. Der mechanische Teil (Sondenkörper, Packer, Druckerzeugung und -aufzeichnung) wurde vom IfG Leipzig konstruiert und gebaut und der mikroakustische Teil (SE-Aufnehmer, Ankopplung, Neigungsmessung, Ereigniserfassung und -auswertung) im Unterauftrag von GMuG Ober-Mörlen entwickelt.

Abb. 7.18: Equipment am untertägigen Messort

Die Bohrlochsonde besitzt zwei getrennte SE-Aufnehmerkränze von je vier SE-Aufnehmern. Der eine Aufnehmerkranz wird, vom Bohrlochmund aus gesehen, vor dem Fracintervall, der andere dahinter installiert. Für diese Anordnung war ein geeigneter Algorithmus zur Ortung der SE-Quellen zu entwickeln, der von folgenden Randbedingungen ausgeht: Der Abstand der Quelle von der Sonde wird durch die Zeitdifferenzen der Primär- und Sekundärwelle bestimmt, der Neigungswinkel gegen die Bohrlochachse wird im Wesentlichen durch die Zeitdifferenzen zwischen den beiden Aufnehmerkränzen festgelegt. Der Azimut lässt sich an den Kanälen eines Aufnehmerkranzes aus den Differenzen der Einsatzzeiten der Wellen gleichen Typs ermitteln.

Abbildung 7.17 zeigt den schematischen Aufbau der Bohrlochsonde und Abbildung 7.18 den inzwischen schon vielfach eingesetzten Prototyp mit der Datenerfassung an einem Messort in Bernburg. Die Sonde besteht im Wesentlichen aus der zentralen Risserzeugungseinheit

(Fracintervall und Packerelemente) sowie den beiden baugleichen SE-Aufnehmer-Einheiten. Jede SE-Aufnehmer-Einheit enthält vier Aufnehmer, die jeweils um 90° gegeneinander versetzt zu einem Aufnehmerkranz zusammengefasst sind. Der Abstand der beiden Aufnehmerkränze beträgt 1,5 m. Die modular aufgebauten SE-Aufnehmer-Einheiten bestehen aus einem stabilen zylindrischen Messinggehäuse (Länge 60 mm, Durchmesser 95 mm), in dem Vorverstärker, Neigungsmesser, die Mechanik zur pneumatischen Ankopplung der Aufnehmer an die Bohrlochwand und die Vorrichtung zum Auftragen des Kontaktfettes auf die Aufnehmer untergebracht sind. Bei pneumatischer Druckbeaufschlagung fahren alle vier Aufnehmer eines Gehäuses gleichzeitig bis maximal 7 mm aus und nach Druckentlastung infolge Federwirkung wieder ein. Beide Aufnehmerkränze sind über lange Stahlschrauben an der Risserzeugungseinheit befestigt. Die Mess- und Versorgungsleitungen werden in der Sonde in dünnen Rohren und in Bohrungen geführt. Alle Kabel und Pneumatikleitungen, die von der SE-Aufnehmer-Einheit abgehen, werden am vorderen Ende der Sonde nach außen geleitet und als Kabelstrang zu der Datenerfassungseinheit geführt.

Das Fracintervall selbst ist etwa 0,5 m lang. Die Gesamtlänge der Sonde erreicht ca. 2 m. Die Sonde ist ausgelegt für Bohrlochdurchmesser von 98 mm bis 101 mm und für Aufreißdrücke bis 65 MPa. Für die mechanische Funktion der Fracsonde sind zwei getrennte Hydraulikleitungen für den Fracraum und die Druckzylinder für die Packeranpressung notwendig. Die Packer aus einem Elastomer werden an die Bohrlochkontor gepresst und sind so robust, dass Bohrlochkaliberabweichungen von wenigen Millimetern kompensiert werden können. Über ein Stahlgestänge kann die Sonde im Bohrloch bewegt werden.

Für langzeitige Pumpvorgänge, Profilprogramme und Permeabilitätsuntersuchungen wurde die in Abbildung 7.18 gezeigte elektrische Hochdrucklaborpumpe angeschafft. Die Dosierpumpe arbeitet mit Injektionsraten von 0,1 bis 600 ml/h bei maximalen Drücken bis 500 bar. Sie ist für eine Realisierung von beliebigen Raten frei programmierbar und daher für die Aufgabenstellung hervorragend geeignet. Um einen störungsfreien Pumpenbetrieb über mehrere Tage gewährleisten zu können, war es erforderlich, das niedrig viskose Spindelöl (Viskosität vergleichbar einer hochkonzentrierten Lauge) mit einem Vordruck von etwa 3 bar zu beaufschlagen. Dazu wurde der Vordruckbehälter einer GÖLZ-Bohrmaschine verwendet. Die Leitungen sowie das abgepackerte Bohrlochintervall wurden mit einer Handpumpe, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, gefüllt. Vereinzelt wurde auch diese Pumpe für die Hydrofracinitiierung verwendet. Als Druckfluid kam für diese Pumpe Hydrauliköl zur Anwendung. Die Druckaufzeichnung erfolgte mittels elektrischer Sensoren, getrennt für Frac- und Packerleitung, einer tragbaren Datenerfassungsanlage und eines Laptops.

Die Schallemissionserfassung für die insgesamt acht Aufnehmer erfolgt mit einer Transientenrekorderkarte, die in einen PC eingebaut ist. Mit der Erfassungseinheit können

bis zu 16 Ereignissen pro Sekunde (bis zehntausend Ortungen pro Versuch) mit einer Abtastfrequenz von 1,25 MHz bei erhöhter Auflösung von 12 bit und einer Speichertiefe von 2048 Punkten digitalisiert und auf der Festplatte gespeichert werden. Es wird in einem Frequenzbereich von 2 bis 300 kHz gearbeitet.
Eine ausführliche Beschreibung der entwickelten Messtechnik, der Empfindlichkeitsprüfung der Aufnehmerkränze in einem Bohrloch und der Programmierung eines geeigneten Ortungsalgorithmus wird in KAMLOT, P.; U. A. (1999) gegeben.

7.4.2 Nachweis der Anwendbarkeit zur Risslagenortung

Zum Nachweis der Anwendbarkeit für eine SE-Rissortung sollen exemplarisch die Resultate einer Messkampagne vom November 2001 in der Grube Bernburg im Steinsalz verwendet werden. Die Sonde wurde bis zur Gegenwart in unterschiedlichen Bergwerken und Salinargesteinen eingesetzt. Über die mehrjährigen Weiterentwicklungen der Auswertemethoden und Verbesserungen der Handhabbarkeit wurde z.B. in MANTHEI, G.; EISENBLÄTTER, J.; KAMLOT, P.; HEUSERMANN, S. (1998), KAMLOT, P.; MENZEL, W.; SCHREINER, W. (2000), BOCK, H.; KAMLOT, P.; MANTHEI, G. (2003) und MANTHEI, G.; EISENBLÄTTER, J.; KAMLOT, P. (2003) berichtet.

Die typische Druckkurve eines ersten Demonstrationsversuches im Steinsalz mit begleitenden SE-Messungen ist in Abbildung 7.19 zu sehen. Beim Test der Sonde hatte sich gezeigt, dass nur mit einer schnellen Risserzeugung mit hoher Drucksteigerungsrate und einer darauf folgenden -ausbreitung (Überpumpen) genügend Emissionen für eine deutliche Ortung entstehen. Beim Überpumpen werden üblicherweise 200 bis maximal 400 ml Öl (jeweils für Frac und Refrac) mit einer Rate von etwa 1 ml/s verpresst. Entsprechend der Schlussfolgerungen aus den Würfelfracversuchen am Steinsalz (Kapitel 5) zur Abhängigkeit der Aufreißspannung von der Drucksteigerungsrate musste demzufolge auf die Auswertung der Aufreißspannung zur Identifikation der minimalen Druckeinspannung zugunsten der begleitenden SE-Ortung verzichtet werden. Die Überpumpdrücke wurden, soweit die SE-Ortung verwendet wurde, nicht weiter in die Auswertung einbezogen.
Die SE-Aktivität setzt unmittelbar nach Erreichen des Druckmaximums ein und hält während der Rissausbreitung in der Shut-In-Phase an. Die erneute SE-Aktivität während des Refracs zeigt eine weitere Rissausbreitung bzw. die Durchtrennung von noch vorhandenen Materialbrücken an (im Demonstrationsversuch wurde erst 5 Minuten nach dem Refrac wieder mit der SE-Aufzeichnung begonnen).

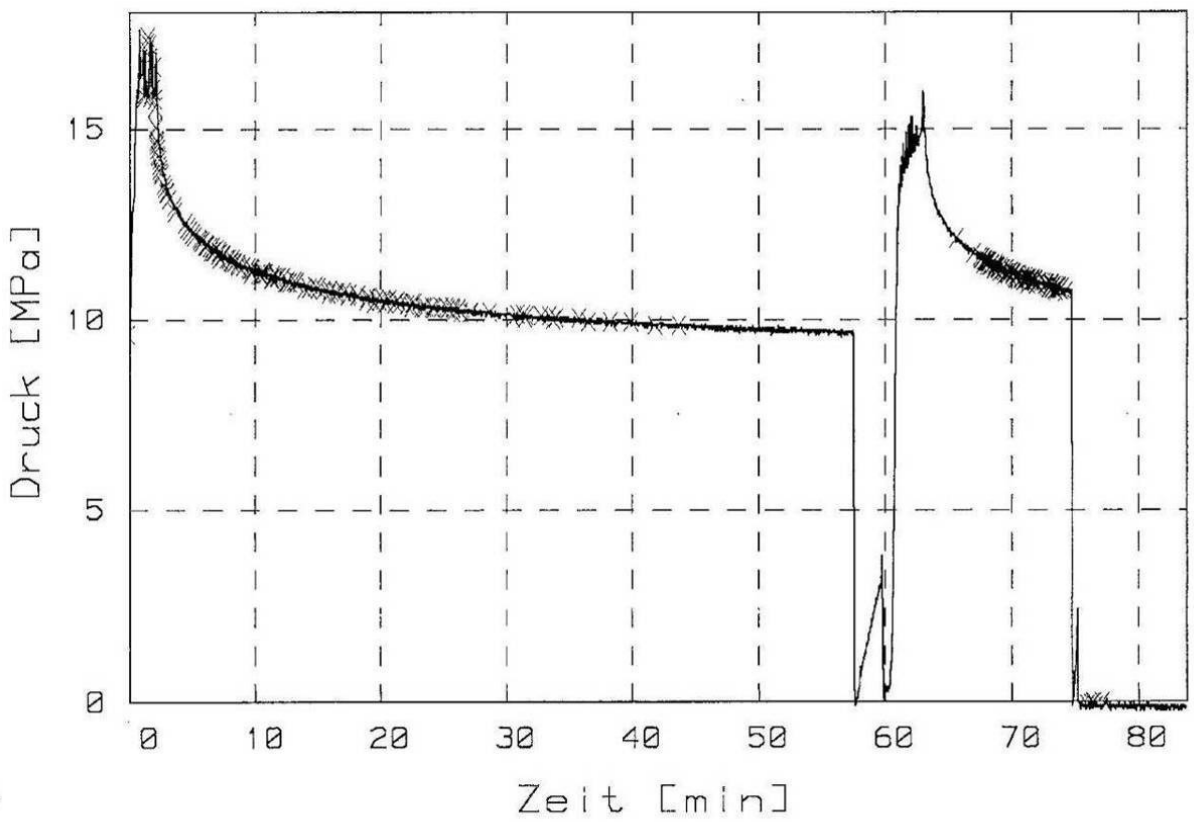


Abb. 7.19: Druckverlauf von Frac und Refrac bei einem Demonstrationsversuch im Steinsalz mit Angabe der georteten Ereignisse (Kreuze)

In Abbildung 7.20 sind die Ortungen der Schallemissionen bei einer Ölinjektion mit der Handpumpe während des Fracs und Refracs am Messort WQ 13 (siehe Abbildung 4.6) in einer horizontalen Steinsalzbohrung nach Osten in einer Stoßteufe von 4 m dargestellt. Die Abbildung zeigt die im Folgenden generell verwendete Projektion der georteten Quellen auf die X-Y-Ebene (links oben) als Draufsicht, die X-Z-Ebene (links unten) als Seitenansicht mit Blick auf den Bohrlochmund und die Y-Z-Ebene (rechts oben) als Seitenansicht mit Blick quer auf das Bohrloch. Das Koordinatensystem ist so orientiert, dass die Y-Achse parallel zum Bohrloch verläuft und der Ursprung am Bohrlochmund liegt. Die Zahlen an den Koordinatenachsen geben die Entfernung vom Koordinatenursprung in Metern an. Weiterhin sind das Druckintervall mit einer Länge von 0,5 m und die etwa 1,5 m voneinander entfernten Positionen der Aufnehmerkränze markiert.

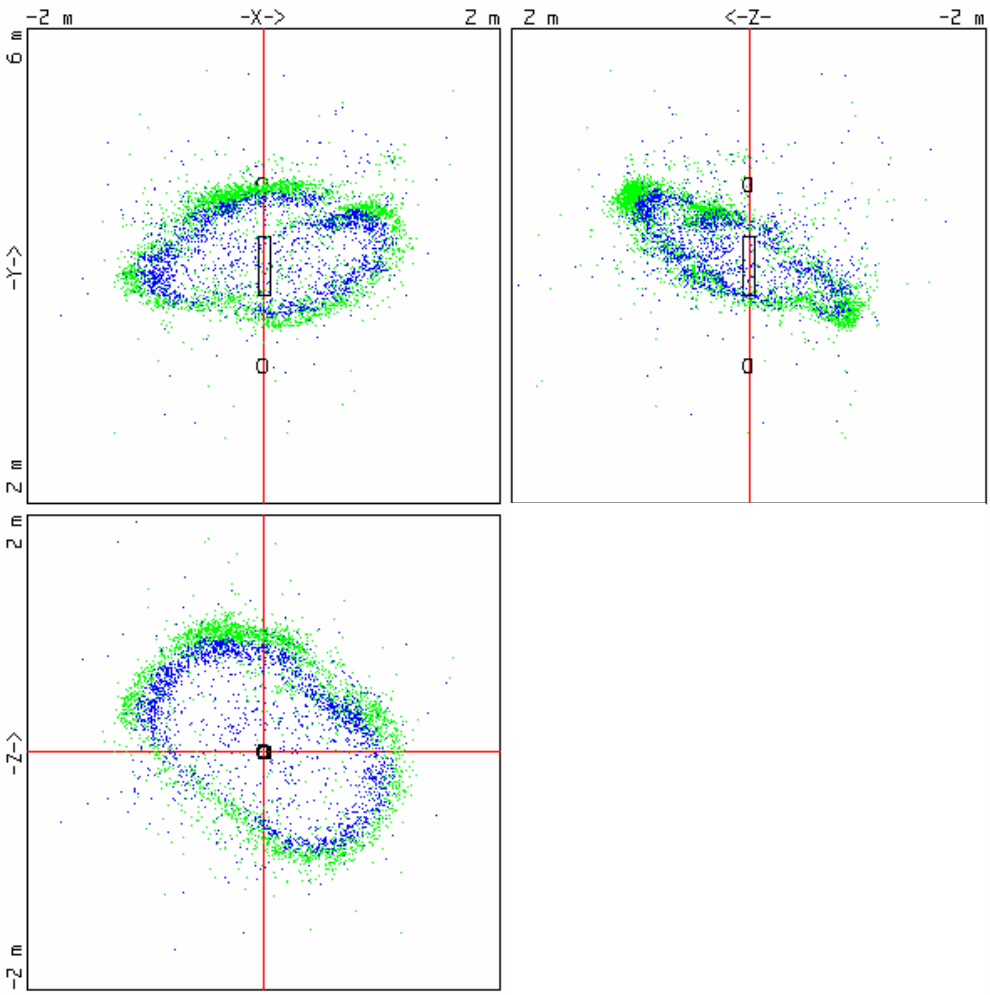


Abb. 7.20: Projektion der georteten Schallemissionen eines Fracversuches im Steinsalz in einer Bohrlochteufe von 4 m auf die drei Koordinatenebenen

In der Abbildung 7.20 wird farblich unterschieden zwischen Ortungen während des Fracs (blau) und während des Refracs (grün). Die ringförmige Gestalt des Risses und die scharfe Begrenzung seiner Kontur sowie die Aufweitung des Risses während des Refracs sind sehr gut zu erkennen. Die schmale Rissfläche und die scharfe Abgrenzung zwischen Frac und Refrac belegen eine hohe Ortungsgenauigkeit mit einem Ortungsfehler kleiner als 10 cm.
Die Ortungen zeigen ein typisches Beispiel für einen Riss schräg zum Bohrloch, dessen Ausrichtung zum Bohrloch in den Projektionen in der Abbildung 7.20 nur schwer zu erkennen ist. Der Riss verläuft quer zur Bohrlochachse (Y-Koordinatenachse) und ist gegenüber der Z-Achse mit etwa 30° geneigt. Die genaue Bestimmung von Rissorientierung und Rissausdehnung werden erst möglich nach einer Drehung des Koordinatensystems mit einem von GMuG entwickelten mathematischen Ausgleichsverfahren. Dabei wird die Punktwolke der Ereignisse des Koordinatensystems X-Y-Z so in ein X'-Y'-Z'-System

transformiert, dass der Rauminhalt der Punktwolke ein Minimum erreicht. Zur Volumenminimierung werden zuerst Drehungen im Bereich zwischen –90° und +90° um die vertikale Z-Achse und anschließend im Bereich zwischen –45° und +45° um die (schon gedrehte) horizontale X'-Achse durchgeführt. Für das gefundene Minimalvolumen erscheint in Abbildung 7.21 eine scharf abgegrenzte ebene Rissfläche (zu erkennen in der X'-Y'-Ebene und Y'-Z'-Ebene). Die in der Parallelprojektion unverfälschte Form und Größe der Rissfläche ist in der X'-Z'-Ebene erkennbar. Die Rissfläche besitzt eine elliptische Form mit einem maximalen Durchmesser von ca. 2,5 m und enthält die Ereignisse des Fracs und Refracs. In der oberen Hälfte der Rissfläche (Z'-Koordinate positiv) liegen mehr Ereignisse als in der unteren Hälfte. Die Rissfläche ist dabei streng genommen als dreidimensionaler Bereich im Gesteinsgefüge aufzufassen, in den das Fluid penetriert ist und zu SE-Ereignissen geführt hat.

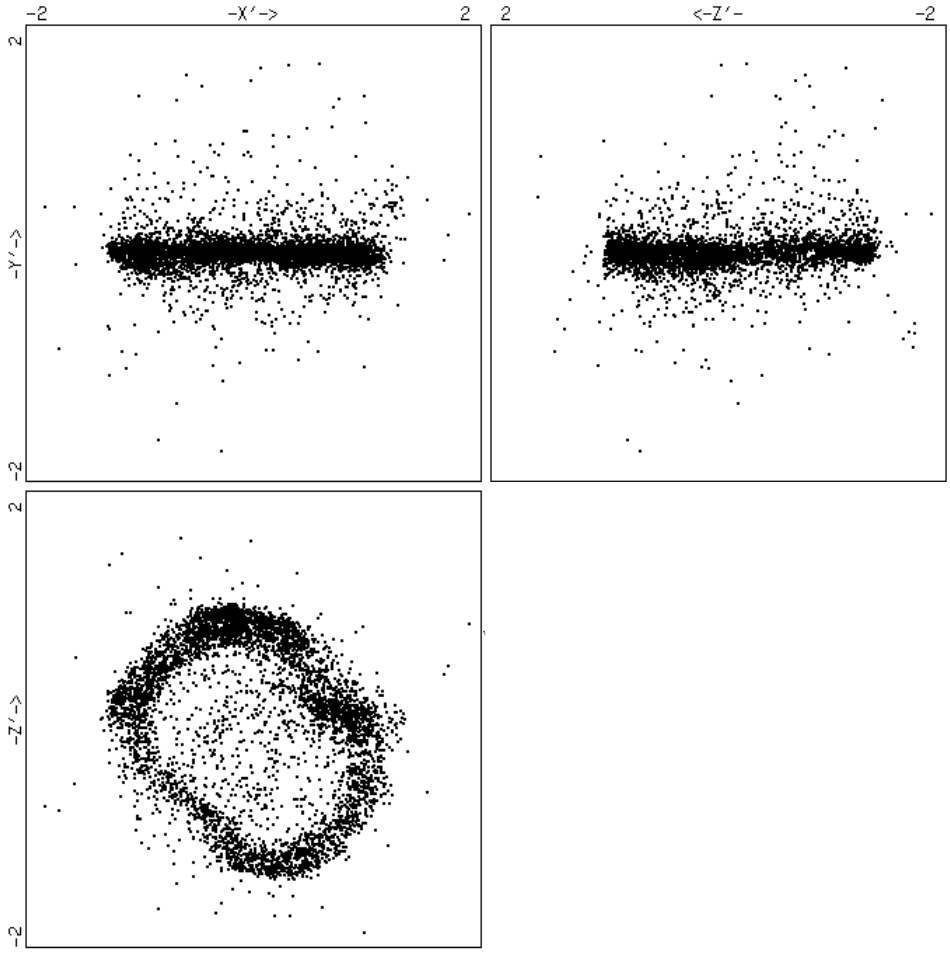


Abb. 7.21: Projektion der georteten Schallemissionen eines Fracversuches im Steinsalz in einer Bohrlochteufe von 4 m im gedrehten Koordinatensystem

Aus den beiden Drehwinkeln bei der Anpassung des Koordinatensystems kann die Normalenrichtung der Rissfläche (entspricht der Richtung der minimalen Hauptspannung) analog zur für die Kluftcharakterisierung verwendeten Halbkugeldarstellung im Schmidtschen Netz abgeleitet werden. In Abbildung 7.22 ist der Durchstoßpunkt des Flächennormalenvektors durch die untere Herdhalbkugel projiziert. Um den Winkelbereich des Einfallswinkels zwischen 45° und 90° nicht zu sehr zu verzerren, wird keine Zentralprojektion angewendet, sondern eine flächentreue Projektion („equal area projection“). Der Azimutwinkel φ (gemessen von Norden im Uhrzeigersinn) des Normalenvektors der Rissfläche beträgt 72°. Der Neigungswinkel ϑ (gemessen von der horizontalen Ebene nach unten) ergibt sich mit 31°.

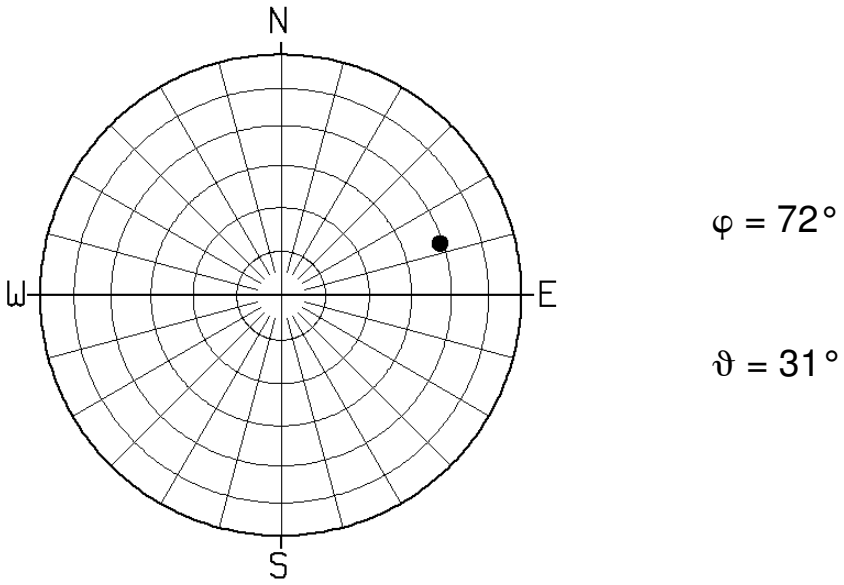


Abb. 7.22: Richtung von σ_{min} als Durchstoßpunkt der Flächennormalen in der unteren Halbkugel

7.5 Anwendung der Bohrlochschlitzmethode im Steinsalz unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation an der Bohrlochkontur

7.5.1 Beschreibung der Methode

Wie bereits ausgeführt, basiert das Bohrlochschlitzverfahren auf dem Prinzip der lokalen Entspannung einer Bohrlochkontur. Versuchstechnisch wird diese Entspannung mit Hilfe schmaler, jeweils ca. 20 mm tiefer und ca. 1 mm breiter Sägeschlitze hervorgerufen. Zur Herstellung der Schlitze dient als Bestandteil der Bohrlochschlitzsonde eine pneumatisch angetriebene Diamantsäge. Die Schlitze sind entlang des Bohrlochumfangs parallel zur

Bohrlochachse angeordnet und bewirken einen lokalen Abbau der Tangentialspannungen unmittelbar neben dem Schlitz. Der Kraftfluss an der Bohrlochkontur wird durch den Schlitz unterbrochen. Die dabei auftretende tangentiale Entspannung wird etwa 6 mm neben dem Schlitz mit einem Kontakt-Dehnungsaufnehmer, der vor dem Schlitzen hydraulisch an die Bohrlochwand gedrückt und während des Schlitzens dort gehalten wird, gemessen. Mit einem elastischen Stoffgesetz des Spannungs-Deformationszusammenhanges am Kreis können im elastischen Gestein unter Kenntnis des Elastizitätsmoduls E und der Poissonzahl ν mit mindestens drei um ca. 120° gegeneinander versetzten Messungen der Tangentialentspannung ε_ϕ die Spannungen in der Ebene quer zum Bohrloch σ_x, σ_y und τ_{xy} berechnet werden (siehe Formel 7.1).

Eine derartige Konfiguration repräsentiert die Minimalforderung zur Bestimmung des zweidimensionalen Spannungszustandes in der Ebene normal zur Bohrlochachse. Zur Aufstellung einer auf Grund der natürlichen Materialstreuung notwendigen redundanten Messdatenbasis werden für eine 2-D Spannungsmessung in der Regel jedoch noch zusätzliche Schlitze gesägt. Dies ist unproblematisch, da wesentliche Vorteile dieses Verfahrens in der Schnelligkeit bei der Gewinnung von Messwerten (das Sägen eines Schlitzes dauert nur etwa eine Minute) und der Wiederholungsmöglichkeit der Messung (etwa 10 cm in Bohrlochrichtung versetzt) bei Unregelmäßigkeiten des Dehnungssignals z.B. beim Anschneiden einer Kluft bestehen.

Zur Bestimmung der drei unbekannten Spannungskomponenten σ_x, σ_y und τ_{xy} werden in Gleichung 7.1 die entsprechenden Messwerte $\varepsilon_{\theta i}$ und θ_i eingesetzt (mit i = 1, 2 ... n). Dies ergibt mit $n \geq 3$ eine Anzahl von n Gleichungen. Über mathematische und statistische Standardlösungen werden die Spannungskomponenten σ_x, σ_y und τ_{xy} sowie bei Überbestimmtheit ($n > 3$) zusätzlich noch die Standardabweichung bestimmt. Die Spannungskomponenten σ_x, σ_y und τ_{xy} können über die einschlägigen Transformationsgleichungen der Technischen Mechanik in entsprechende Hauptnormalspannungen σ_1 und σ_2 sowie einen Richtungswinkel α (Winkel ab Ordinate im Uhrzeigersinn) bzgl. σ_1 umgerechnet werden.

Der dreidimensionale Spannungszustand ist aus 2-D Bohrlochschlitzsonden-Messungen ableitbar, sofern drei rechtwinklig zueinander abgeteufte Bohrlöcher beprobt werden und für das Gestein im Bereich dieser Bohrungen Homogenität und Isotropie vorausgesetzt werden können.

Mit diesem Standardverfahren war es bisher nur sinnvoll, die Bohrlochschlitzmethode in vorwiegend elastisch reagierenden Gesteinen einzusetzen. Im Rahmen der hier diskutierten Arbeiten sollen jedoch die Gebirgsspannungen auch im Steinsalz mit einem überwiegend nichtelastischen und zeitabhängigen Stoffverhalten ermittelt werden. Die Zielstellung muss

deshalb darin bestehen, eine zeitabhängige Relaxationsfunktion für den Tangentialspannungsabbau an der Bohrlochkontur im Steinsalz aufzustellen. Es wird davon ausgegangen, dass unmittelbar nach der Freilegung der Bohrlochkontur durch das Bohren die elastische Tangentialspannung infolge Relaxation abgebaut wird. Beim späteren Bohrlochschlitzen wird demzufolge eine gegenüber dem elastischen Wert verringerte Tangentialspannung gemessen. Bei Kenntnis des Relaxationsverhaltens ist es theoretisch möglich, in Abhängigkeit von der Bohrlochstandzeit die ursprüngliche elastische Tangentialspannung als „Startwert“ des Spannungszustandes an der Kontur zu berechnen und daraus die Spannungskomponenten in der Ebene quer zum Bohrloch zu bestimmen. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich während der Relaxation die elastischen Materialparameter nicht ändern. Die Ermittlung des dreidimensionalen Spannungstensors ist unter Nutzung von 3 senkrecht zueinander stehenden Bohrlöchern analog zur elastischen Auswertung möglich. Eine solche Auswertemethode des Bohrlochschlitzens ist neuartig, wurde in den letzten Jahren jedoch bereits mehrfach erfolgreich angewendet. Die erste Veröffentlichung der Methode ist in KAMLOT, P.; HARTKORN, P.; SCHREINER, W. (1994) enthalten und wurde in KAMLOT, P.; BÖHNEL, H.; BOCK, H. (2002) nach dem Einsatz an verschiedenen Standorten und Salzgesteinen (Steinsalz, Sylvinit) weiterentwickelt.

Zur Aufstellung zeitabhängiger Relaxationsfunktionen für den Tangentialspannungsabbau an der Bohrlochkontur im Steinsalz wurden die üblichen, für eine Festigkeitsuntersuchung verwendeten Relaxationsversuche an zylindrischen Prüfkörpern aus Leinesteinsalz genutzt. Es wurden Versuche ausgewählt, die in axialer Richtung deformationsgeregelt mit einer Rate von $5 \cdot 10^{-6}$ s^{-1} bis in den Bereich typischer elastischer Tangentialspannungen an der Bohrlochkontur in der entsprechenden Teufe belastet wurden. Nach dem Anhalten der Prüfmaschine erfolgte die Aufzeichnung der Spannungsrelaxation bis zu einem Zeitraum von etwa 24 Stunden. Die erreichten axialen Startspannungen für die Relaxationen lagen noch deutlich unter dem Spannungsmaximum im Verfestigungspfad und die Dilatanz war demzufolge begrenzt. Die Prüfzylinder sollen ein Volumenelement an der Bohrlochkontur repräsentieren, dessen Axialspannung der Tangentialspannung am Bohrloch entspricht. Der Manteldruck des Prüfzylinders entspricht dem Mittelwert der auf Null abgesenkten Bohrlochradialspannung sowie der Spannungskomponente parallel zum Bohrloch im unmittelbaren Konturbereich und es wurden demzufolge nur Versuche mit Manteldrücken von Null bis 1 MPa verwendet. In Abbildung 7.23 sind drei typische uniaxiale Relaxationsversuche mit Versuchszeiten bis über 27 Stunden dargestellt.

Der Relaxationsverlauf der Differenzspannung $\sigma_{diff} = \sigma_1 - \sigma_3$ lässt sich mit einer Funktion

$$\sigma_{diff} = \sigma_{diff}^{start} \cdot \left[1 - B \cdot \ln(1 + \frac{t}{t_0}) \right] \tag{7.2}$$

approximieren und nach der Normierung auf den Startwert können übertragbare Relaxationsfunktionen σ_{relax} aufgestellt werden:

$$\sigma_{relax} = \frac{\sigma_{diff}}{\sigma_{diff}^{start}} = 1 - B \cdot \ln(1 + \frac{t}{t_0}) \tag{7.3}$$

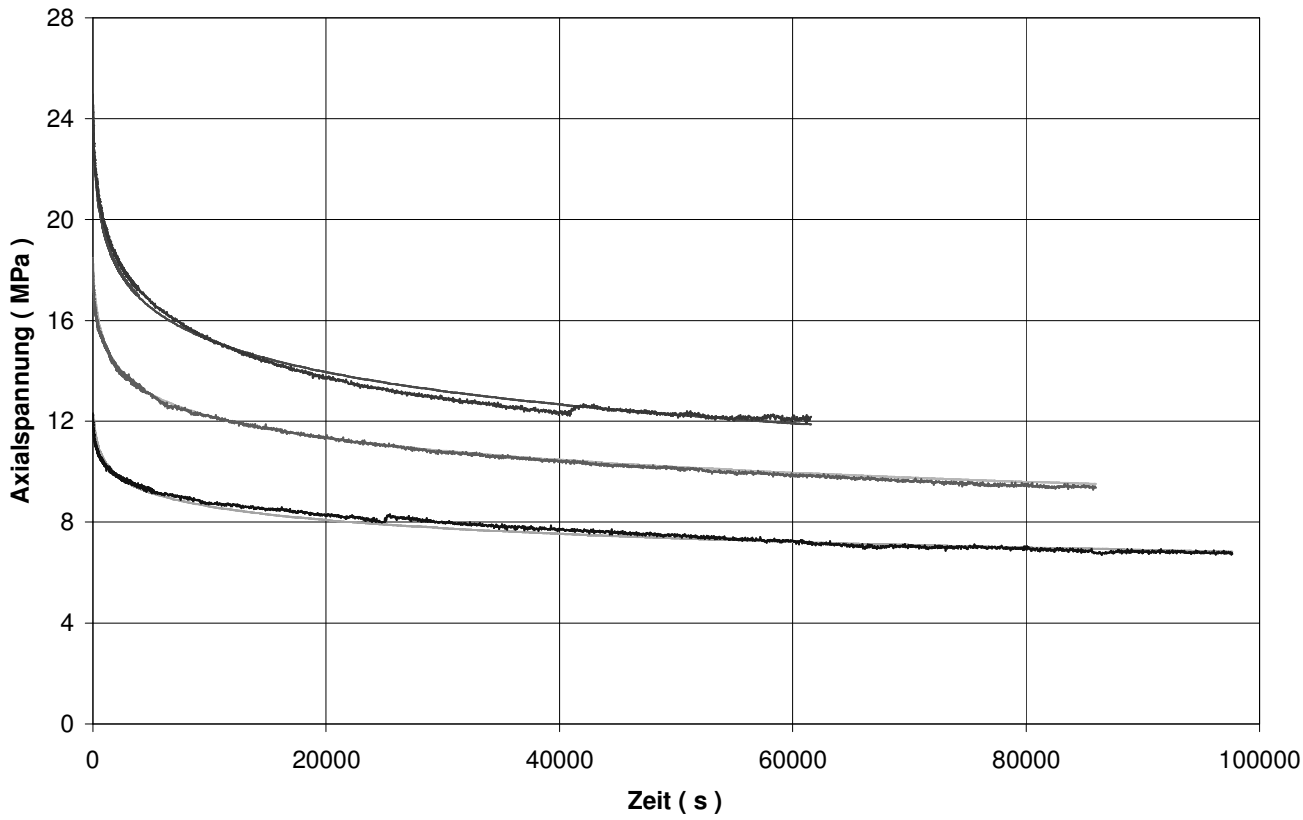


Abb. 7.23: Kurvenfit der uniaxialen Axialspannungsrelaxationen, die in Übertragung auf die Bohrlochkontur der Tangentialspannungsrelaxation entsprechen

In Abbildung 7.24 sind für 5 Versuche sowie einen mittleren Verlauf die abgeleiteten Funktionen bis zu einem Zeitraum von 500 Stunden mit den Parametern des Kurvenfits aufgezeigt.

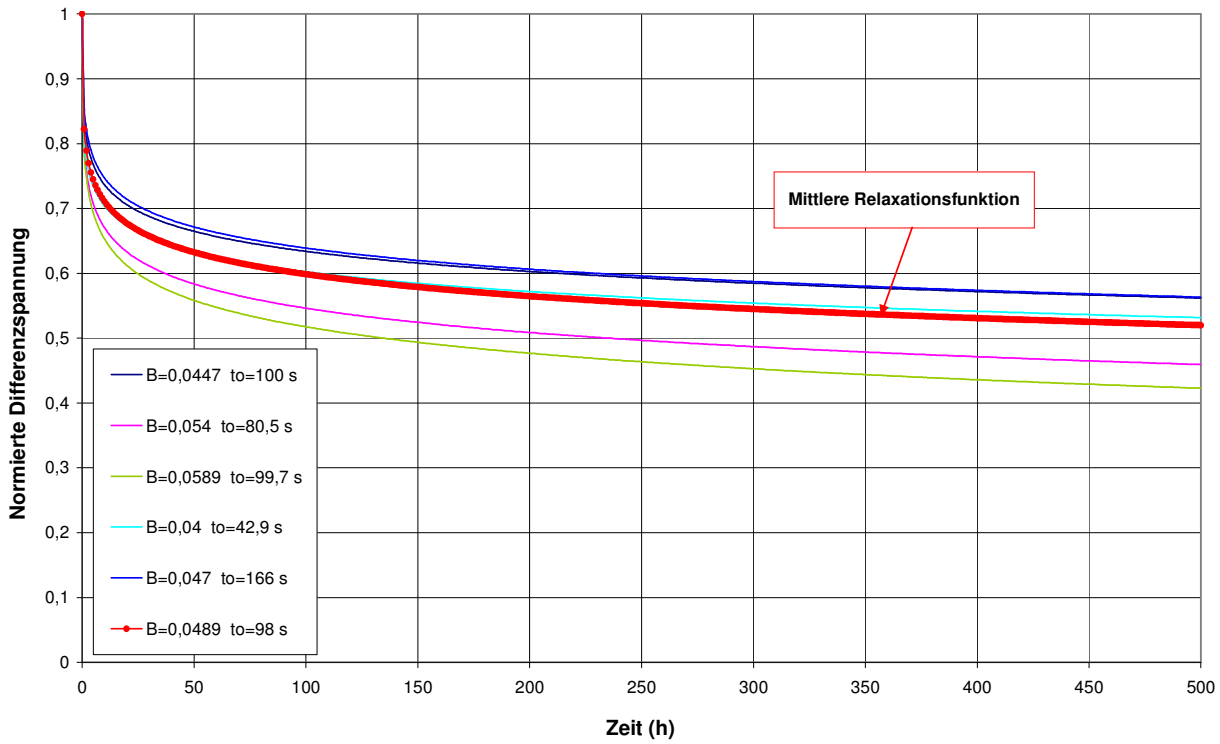


Abb. 7.24: Verlauf der mittels Kurvenfit ermittelten normierten Relaxationsverläufe im Steinsalz

Mit der Funktion 7.3 und den mittleren Parametern B = 0,0489 und t_0 = 98 s können die beim Bohrlochschlitzen gemessenen Entspannungsdeformationen auch nach einigen Tagen einer freien Standzeit der Bohrung (es darf zu keinem Bruch der Bohrlochkontur kommen) auf die Entspannungsdeformationen „zurückgerechnet“ werden, die sich sofort nach dem Bohren des Untersuchungsabschnittes ohne zeitlichen Tangentialspannungsabbau gezeigt hätten. Wenn die Messung z.B. 7 Tage (168 Stunden) nach der Bohrlocherstellung erfolgt, hat sich die Tangentialspannung auf 57 % ihres Startwertes abgebaut und die elastische Entspannungsdeformation beim Schlitzen beträgt gleichfalls 57 % des gesuchten Startwertes.

In den folgenden Ausführungen wird die Anwendbarkeit dieser neuartigen Auswertebeziehung für das Steinsalz im Bereich des Wartungsplatzes WQ 13 im Bergwerk Bernburg (Abbildungen 4.4 und 4.6) nachgewiesen. Dieser Ort besitzt den Vorteil, dass in den Streckenstummeln gegenüber der Anhydritmesskammer relativ unproblematisch drei senkrecht aufeinander stehende Steinsalzbohrlöcher gebohrt und die Sondierungsergebnisse mit den bereits vorliegenden Bohrlochschlitzmessungen und Hydrofracmessungen in der Anhydritkammer sowie vorliegenden Modellrechnungen

verglichen werden können. Eine solche Anwendung voneinander unabhängiger Spannungsmessverfahren ist grundsätzlich empfehlenswert.

7.5.2 Nachweis der Anwendbarkeit zur 3D-Spannungssondierung im Steinsalz

Ermittlung der Orientierung des Untersuchungskoordinatensystems

Die drei Bohrungen für den Einsatz der Schlitztechnik in einer Steinsalznische gegenüber der Anhydritmesskammer mit einem Durchmesser von 101 mm und einer Länge von jeweils 10 m repräsentieren die Achsen X', Y' und Z' eines Untersuchungssystems mit folgender Orientierung relativ zum Bezugssystem:

Bohrung	Streichen [in Grad]	Einfallen [in Grad]
1 (X'-Achse)	220	0
2 (Y'-Achse)	310	30
3 (Z'-Achse)	130	60

Das Bezugssystem besitzt folgende Orientierung:

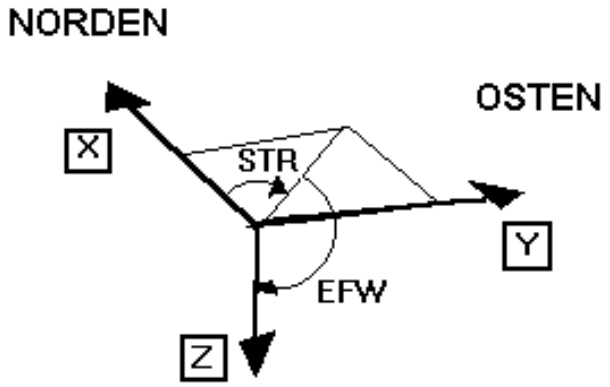


Abb. 7.25: Konvention des Bezugssystems

- Streichrichtung von NORD beginnend im UZS bis 360° ($0 \leq STR \leq 2\pi$)
- Einfallwinkel ab der Horizontalen nach unten bis 90° positiv und nach oben bis 90° negativ ($-\pi/2 \leq EFW \leq \pi/2$)

Beides sind kartesische Koordinatensysteme, d.h. orthogonale Rechtssysteme. Die Kugelkoordinaten STR und EFW lassen sich in die kartesischen Koordinaten umrechnen mit

x = cos(STR)·cos(EFW) y= sin(STR))·cos(EFW) z = sin(EFW)

Die Winkel der Achsen des Untersuchungssystems X', Y' und Z' zu den Achsen des Bezugssystems X, Y und Z lassen sich über den Richtungskosinus berechnen und betragen:

Tabelle 7.2: Winkel zwischen den positiven Koordinatenachsen

	bzgl. der X - Achse	bzgl. der Y - Achse	bzgl. der Z - Achse
X' - Achse	140°	130°	90°
Y' - Achse	56,2°	131,6°	60°
Z' - Achse	108,7°	67,5°	30°

Regressionsanalyse der Dehnungssignale und Ermittlung der 2D-Spannungstensoren

Bei der Zusammensetzung der 2D-Spannungstensoren, jeweils gültig für die Ebene quer zum Bohrloch, zum 3D-Spannungstensor muss die von Formel 7.1 abweichende Drehrichtung beachtet werden. Für alle drei Bohrlöcher ist konsequent folgende Konvention des Rechtssystems anzuwenden:

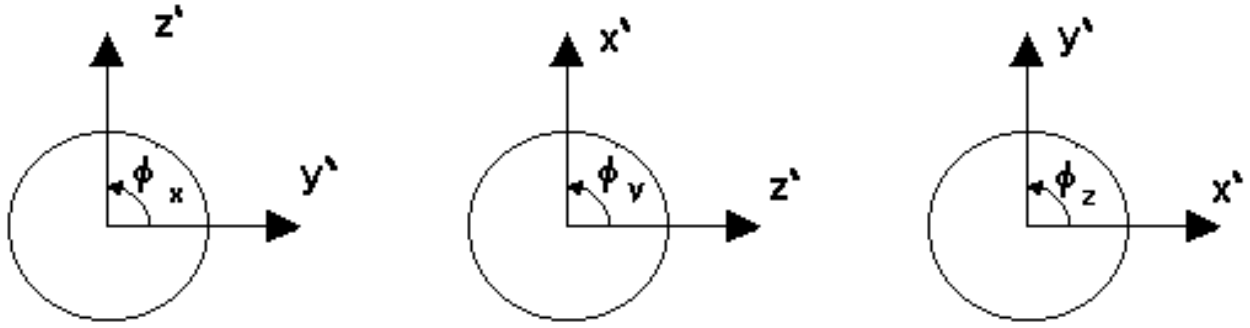


Abb. 7.26: Konvention der jeweiligen Bohrlöcher (Achsen des Untersuchungssystems) bei Blickrichtung entgegen der positiven Achsenrichtung

Die beim Bohrlochschlitzen ermittelten Entspannungsdeformationen wurden entsprechend der oben beschriebenen Methode unter Verwendung der mittleren Relaxationsfunktion für den zeitlichen Tangentialspannungsabbau auf den Relaxationsbeginn korrigiert. Für die Messung etwa 500 Stunden nach dem Bohren kam ein Divisor von 0,52 zur Anwendung.

Da die Dehnungssignale im jeweiligen Untersuchungsabschnitt im Bohrloch, hier als Beispiel in der X'-Y'-Ebene, einer natürlichen Streuung unterliegen, wird eine Ausgleichsrechnung mit mindestens 4 Messwerten (Maximalanzahl unbegrenzt) je Bohrlochabschnitt unter der Annahme durchgeführt, dass die zufälligen Fehler normalverteilt sind.
Für die Beziehung

$$\varepsilon_\phi = \frac{1 - \nu^2}{E}[\sigma'_x + \sigma'_y - 2(\sigma'_x - \sigma'_y)\cos 2\phi - 4\,\tau'_{xy}\sin 2\phi) \tag{7.4}$$

ε_ϕ - Tangentialdeformation, Dehnungssignal beim Schlitzen
E - Elastizitätsmodul
v - Poissonzahl
ϕ - Drehwinkel ab Abszisse entgegen dem Uhrzeigersinn

werden die Substitutionen

$$\begin{aligned} y &= \frac{E \cdot \varepsilon_\phi}{1-\nu^2} & & a = \sigma'_x + \sigma'_y \\ x_1 &= \cos(2\phi) & \text{und} \quad & b_1 = -2(\sigma'_x - \sigma'_y) \\ x_2 &= \sin(2\phi) & & b_2 = -4\tau'_{xy} \end{aligned} \tag{7.5}$$

eingeführt und für die Gleichung

$$y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 \tag{7.6}$$

eine Drei-Gruppen-Regressionsanalyse durchgeführt. Die ebenen Spannungskomponenten σ'_x, σ'_y und τ'_{xy} ergeben sich aus den berechneten Parametern und den vorgenommenen Substitutionen. Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten als Maß für die Güte des statistischen Zusammenhanges erfolgt nach SACHS, L. (1969).

Die drei ebenen Spannungstensoren können nur dann zu einem gemeinsamen 3D-Tensor zusammengeführt werden, wenn die Untersuchungsabschnitte in den Bohrungen außerhalb der Entspannungswirkung der Hohlräume liegen. Die ebenen Spannungstensoren sollen für ein gemeinsames Volumenelement im Raum gültig sein. Streng genommen müssten die ebenen Tensoren in einem eng begrenzten Gebirgsbereich ermittelt werden. Bei einer räumlichen „Aufspaltung“ ist ein unterschiedlicher Hohlraumeinfluss zu vermeiden.

Nach der Regressionsanalyse lagen für Bohrlochteufen > 7 m folgende Tensoren (Spannungen in MPa) vor:

Bohrloch in Richtung X' - Achse: σ'_y = 12,5 σ'_z = 19,9 τ'_{yz} = -0,66
Bohrloch in Richtung Y' - Achse: σ'_z = 19,7 σ'_x = 13,9 τ'_{zx} = -0,40
Bohrloch in Richtung Z' - Achse: σ'_x = 13,5 σ'_y = 13,5 τ'_{xy} = -1,40

Koordinatentransformation aus dem Untersuchungs- in das Bezugssystem

Der Spannungstensor σ'_x = 13,7 MPa, σ'_y = 13,0 MPa, σ'_z = 19,8 MPa, τ'_{xy} = -1,40 MPa, τ'_{yz} = -0,66 MPa und τ'_{zx} = -0,40 MPa (Mittelwertbildung bei den Normalspannungen) wird in das Bezugssystem transformiert. Die entsprechenden Transformationsbeziehungen sind z.B. in HERGET, G. (1988) auf Seite 41 zu finden. Für das Bezugssystem X-Y-Z ergibt sich ein Tensor σ_x = 12,0 MPa, σ_y = 14,2 MPa, σ_z = 20,4 MPa, τ_{xy} = 0,5 MPa, τ_{yz} = 3,2 MPa sowie τ_{zx} = -2,1 MPa.

Berechnung des Betrages der 3 Hauptnormalspannungen (Spannungen in MPa)

Es werden zunächst die Invarianten I_1, I_2 und I_3 ermittelt:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_y \cdot \sigma_z - \sigma_z \cdot \sigma_x + \tau^2_{xy} + \tau^2_{yz} + \tau^2_{zx} \\ I_3 &= \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \tau_{yz} \cdot \tau_{zx} - \sigma_x \cdot \tau^2_{yz} - \sigma_y \cdot \tau^2_{zx} - \sigma_z \cdot \tau^2_{xy} \end{aligned} \tag{7.7}$$

Die Beträge lauten I_1 = 46,6, I_2 = -690,6 und I_3 = 3300.

Es wird die kubische Gleichung aufgestellt mit

$$y^3 - \left(\frac{I_1^2}{3} + I_2\right) \cdot y - \frac{2}{27} \cdot I_1^3 - \frac{I_1 \cdot I_2}{3} - I_3 = 0 \tag{7.8}$$

Diese Gleichung entspricht

$$y^3 + 3 \cdot p \cdot y + 2 \cdot q = 0$$

mit (7.9)

$$p = -\frac{I_1^2}{9} - \frac{I_2}{3} \quad \text{und} \quad q = -\frac{I_1^3}{27} - \frac{I_1 \cdot I_2}{6} - \frac{I_3}{2}$$

Zur Lösung wird eine Hilfsvariable hilf verwendet mit

$$\text{hilf} = \arccos\left(\frac{q}{r^3}\right) \quad \text{und } r = -\sqrt{|p|} \text{ wenn } q < 0 \text{ und } r = \sqrt{|p|} \text{ wenn } q \geq 0. \tag{7.10}$$

<u>Die 3 Hauptnormalspannungen berechnen sich zu</u> (7.11)

$$\sigma_i = -2 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\text{hilf}}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \qquad \sigma_j = 2 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\text{hilf}}{3}\right) + \frac{I_1}{3} \qquad \sigma_k = 2 \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\text{hilf}}{3}\right) + \frac{I_1}{3}$$

Nach der Sortierung entsprechend ihrer Beträge ergeben sich die Spannungen (in MPa) σ_1 = 22,0, σ_2 = 13,7 und σ_3 = 10,9.

<u>Richtung der Hauptnormalspannungen im Bezugssystem</u>

Die Richtung der 3 Hauptnormalspannungen im Bezugssystem lässt sich aus der Lösung des Gleichungssystems

$$\begin{aligned} l \cdot (\sigma_x - \sigma) + m \cdot \tau_{xy} + n \cdot \tau_{zx} &= 0 \\ l \cdot \tau_{xy} + m \cdot (\sigma_y - \sigma) + n \cdot \tau_{yz} &= 0 \\ l \cdot \tau_{zx} + m \cdot \tau_{yz} + n \cdot (\sigma_z - \sigma) &= 0 \end{aligned} \tag{7.12}$$

ableiten. Die Lage der Hauptnormalspannungen σ_i, σ_j und σ_k ist jeweils charakterisiert durch den Richtungskosinus l zur X-Achse, m zur Y-Achse und n zur Z-Achse. Die Umstellung liefert

$$m = \left[\left[\frac{\tau^2_{yz} - (\sigma_y - \sigma) \cdot (\sigma_z - \sigma)}{\tau_{xy} \cdot (\sigma_z - \sigma) - \tau_{zx} \cdot \tau_{yz}}\right]^2 + 1 + \left[\frac{\tau^2_{xy} - (\sigma_y - \sigma) \cdot (\sigma_x - \sigma)}{\tau_{yz} \cdot (\sigma_x - \sigma) - \tau_{zx} \cdot \tau_{xy}}\right]^2\right]^{-0,5}$$

$$l = \frac{\tau^2_{yz} - (\sigma_y - \sigma) \cdot (\sigma_z - \sigma)}{\tau_{xy} \cdot (\sigma_z - \sigma) - \tau_{zx} \cdot \tau_{yz}} \cdot m \qquad n = \frac{\tau^2_{xy} - (\sigma_y - \sigma) \cdot (\sigma_x - \sigma)}{\tau_{yz} \cdot (\sigma_x - \sigma) - \tau_{zx} \cdot \tau_{xy}} \cdot m \tag{7.13}$$

Aus dem Richtungskosinus jeder Hauptnormalspannung sind dann wieder die Streichrichtung STR und der Einfallwinkel EFW für die Darstellung in Kugelkoordinaten berechenbar. Für die 3 Hauptnormalspannungen liegt folgendes Ergebnis vor:

Spannung	Streichen [in Grad]	Einfallen [in Grad]
σ_1 = 22,0 MPa	115,4	66,5
σ_2 = 13,7 MPa	236,4	12,6
σ_3 = 10,9 MPa	331,0	19,5

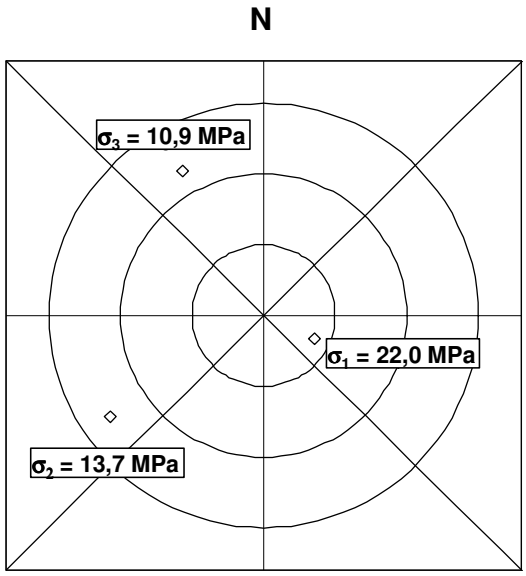


Abb. 7.27: Richtung der Hauptnormalspannungen als Durchstoßpunkte in der unteren Halbkugel

Ein Vergleich mit den Messergebnissen aus der gegenüberliegenden Anhydritkammer (Kapitel 7.3) bestätigt die schon dort gefundene Ausrichtung der Spannungstensors an der Schichtgrenze zum Hauptanhydrit. Die von σ_1 und σ_2 aufgespannte Ebene liegt parallel zur Schichtgrenze und die Minimalspannung σ_3 zeigt in Richtung der volumetrisch größten Hohlraumauffahrung am Wartungsplatz. Alle Spannungen sind infolge der Überzugswirkung auf den steifen Anhydrit, die im Bereich der Schichtgrenze auch auf das unmittelbar benachbarte Steinsalz ausstrahlt, erhöht. Die Maximalspannung σ_1 ist nahezu identisch zur Messung in der Anhydritkammer und die beiden anderen Spannungen σ_2 und σ_3 sind um etwa 25 % kleiner. In beiden Gesteinen wird die Festigkeitsgrenze bei weitem nicht überschritten.

8. Ausgewählte In-situ-Untersuchungen im Hauptanhydrit und benachbarten Steinsalz zur Fluiddruckbelastbarkeit und Rissbildung

8.1 Einleitung

Nachdem im Kapitel 7 die Entwicklung einer neuen Messsonde bzw. von neuen Verfahren zur Spannungsmessung vorgestellt und die Anwendbarkeit demonstriert wurden, soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, unter welchen Bedingungen eine Rissbildung einsetzt, wie sich der Riss ausbildet bzw. fortpflanzt und welche hydraulischen Parameter zuzuordnen sind. Da der wirkende Gebirgsspannungszustand eine entscheidende Randbedingung für die Gebirgsintegrität repräsentiert, wurden die In-situ-Untersuchungen im Bergwerk Bernburg zunächst in einem abbaufreien Bereich und danach in einem Abbaubereich mit sich ändernden Gebirgsspannungen durchgeführt. Die Experimente stellen eine Auswahl der wichtigsten Resultate aus KAMLOT, P.; U. A. (1999, 2002, 2005) dar.

8.2 Untersuchungen unter konstanten Gebirgsspannungen

8.2.1 Beobachtung der Rissöffnung und -ausbreitung mit Oberflächenradar-, Schallemissions- und Verschiebungsmessungen im ungeklüfteten Anhydrit

8.2.1.1 Anwendung der Oberflächenradarmessung im Hauptanhydrit

Als erfolgversprechendste Methode zur Detektion der Rissausbreitung im Anhydrit kam die Oberflächenradarmessung in Frage. Das Elektromagnetische Reflexionsverfahren (EMR) wird seit den 1970er Jahren zur Ortung salinarinterner Strukturen eingesetzt und ist speziell auf die Anforderungen im Salzbergbau zugeschnitten. Es ist relativ einfach ohne zusätzliche Bohrungen oder sonstige aufwendige messtechnische Vorbereitungsarbeiten in einer untertägigen Strecke anwendbar, indem elektromagnetische Impulse entlang der Stoßkontur auf Profillinien in das Gebirge gesendet und die Reflexionen empfangen werden. Die Sende- und Empfangsantenne müssen lediglich am Stoß entlang geführt werden.
Mit der Sendeantenne wird ein elektromagnetischer Impuls in den Untergrund abgestrahlt und die in das Gebirge eingebrachte Energie breitet sich als elektromagnetische Welle räumlich aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Eindringtiefe der elektromagnetischen Welle werden durch die elektrischen Eigenschaften (Dielektrizitätszahl) des Mediums bestimmt. Eine größere Dielektrizitätszahl des Mediums verursacht eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit eine Verlängerung der Laufzeit des ausgesandten Impulses. Hohe Leitfähigkeiten im untersuchten Material bewirken eine starke

Dämpfung des elektromagnetischen Signals und damit eine Verringerung der Eindringtiefe. An Materialgrenzen kommt es durch Kontraste in den elektrischen Eigenschaften zur Reflexion und Brechung der elektromagnetischen Energie. Die Empfangsantenne registriert in einem festgelegten Abstand zur Sendeantenne die durch die elektromagnetischen Wellen hervorgerufenen Schwankungen des elektrischen Feldes in Abhängigkeit von der Zeit. Als Nullpunkt wird dabei der Zeitpunkt gewählt, an dem der elektromagnetische Impuls von der Sendeantenne abgestrahlt wird.
Durch das Auftragen der elektrischen Feldstärke gegen die Zeit erhält man ein Radargramm. Dieses enthält die Information, wann und in welcher Stärke ein Signal an der Empfangsantenne angekommen ist, jedoch keinen Hinweis auf den Weg des Signals und die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Messung mehrerer Radargramme an verschiedenen Antennenlokationen ergibt eine Radargrammsektion.

Die innerhalb des Projektes KAMLOT, P.; U.A. (1999) im Jahr 1997 durchgeführten Profilmessungen hatten das Ziel, Untergrundstrukturen in ihrem räumlichen Verlauf abzubilden. Praktisch wurde dies realisiert, indem mit einer festen Anordnung der Antennen an verschiedenen Positionen entlang eines Profils einzelne Spuren gemessen und diese zu einer Radargrammsektion zusammengefügt wurden. Dabei war besonders zu beachten, dass die Signale in einer Spur nicht einen Vertikalschnitt des Untergrundes repräsentieren, sondern aus dem Vollraum um die Antennen stammen können. Die Einsätze in der Radargrammsektion können deshalb auch durch oberirdische Störkörper oder durch andere Störeinflüsse bedingt sein. Um die Radargrammsektion in ein Tiefenmodell des Untergrundes umsetzen zu können, benötigt man Informationen über die Herkunft der in der Radargrammsektion sichtbaren Einsätze sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Zur Klärung der Herkunft einzelner Einsätze müssen strahlengeometrische Überlegungen und Erfahrungswerte herangezogen werden. Zur Ermittlung der Wellengeschwindigkeiten in den einzelnen Schichten wurden CMP (Common Mid Point) - Messungen an einem fixen Reflektor durchgeführt. Hierbei werden die Sende- und Empfangsantenne zunächst äquidistant bezüglich eines festen Mittelpunktes entlang eines Profils aufgestellt und anschließend nach jeder Messung einer Spur der Abstand der beiden Antennen vergrößert. Durch die so erzeugten unterschiedlichen Laufwege einer Reflexion an einem Reflektor ergeben sich auch verschiedene Laufzeiten, woraus die Geschwindigkeiten bestimmt werden können. Alternativ kann die Geschwindigkeit der ersten Schicht auch durch die Bodenwelle zwischen den Antennen bestimmt werden.
Für den Messeinsatz standen verschiedene Antennen für unterschiedliche Frequenzen zur Verfügung. Niederfrequente Signale erzielen in der Regel größere Eindringtiefen, liefern jedoch eine geringere Auflösung. Höherfrequente Signale ermöglichen durch ihre

vergleichsweise kleinen Wellenlängen eine bessere Auflösung der Strukturen, besitzen aber eine geringere Eindringtiefe.
Für die vorliegende Aufgabenstellung war die Erfahrung relevant, dass Ton- und Anhydritschichten eine starke Dämpfung der elektromagnetischen Wellen verursachen und deshalb ihre Reichweite erheblich vermindern. Die Lokalisierung von injizierten Flüssigkeiten in Rissen und Klüften im Anhydrit wurde von vornherein als problematisch angesehen und stellte „Neuland“ dar. Die Risse im Anhydrit sollten in einer geringen Stoßteufe mit der Hydrofrac-Spannungssondierung erzeugt und das EMR zunächst grundsätzlich bezüglich seiner Eignung getestet werden. Die Versuche zur Ortung eines geeigneten Reflektors wurden deshalb zunächst im Technikum und erst danach in situ durchgeführt.

Technikumsversuche

Wie vom IfG vorgegeben und in YARAMANCI, U.; U.A. (1996) beschrieben, bestand die Zielstellung zunächst darin, eine Injektionsflüssigkeit mit einem so hohen Reflexionsvermögen zu finden, dass eine Ortung auch bei der geringen Reflektorstärke in den Anhydritklüften gewährleistet ist. Aus den Laborversuchen im Abschnitt 5 war bekannt, dass mit Reflektorstärken < 10^{-2} mm gerechnet werden musste.

Am IfG wurden deshalb drei Sorten von Reflektoren hergestellt. Das waren quadratische Filztücher mit einer Seitenlänge von 0,5 m, die trocken, mit Lauge getränkt sowie mit Lauge getränkt und zusätzlich mit Eisenpulver versetzt in Plastikfolie eingeschweißt wurden. Die Lauge besaß eine Konzentration von 295 bis 300 g/l $MgCl_2$, 80 g/l NaCl, 70 bis 90 g/l KCl und 20 g/l $MgSO_4$. Der Filz hatte eine Stärke von etwa 1 mm. Die Salinität der Lauge wurde als ausreichend hoch für eine deutliche Reflexion angesehen. In der Absicht, auf Grund der geringen Reflektorstärke die Reflexionsfähigkeit weiter zu erhöhen, erfolgte im dritten Präparat eine Zugabe von sehr feinem Eisenpulver. Die verschweißten Präparate wurden an den Auftragnehmer übergeben und dort in einer etwa 1 m hohen Sandschüttung mit einer Fläche von 1,7 m² ausgelegt. Der als Messobjekt verwendete Sandhaufen war auf einem ebenen Betonsockel aufgeschüttet.

Die Messung mit einer 400-MHz-Antenne des Radargerätes vom Typ RAMAC/GPR auf der ebenen Sandoberfläche wurde zunächst auf dem Sandhaufen ohne Präparat als Referenzsektion durchgeführt. Anschließend wurden die präparierten drei Reflektoren nacheinander in einer Tiefe von 0,6 m im Sandhaufen vergraben und die Messungen wiederholt.

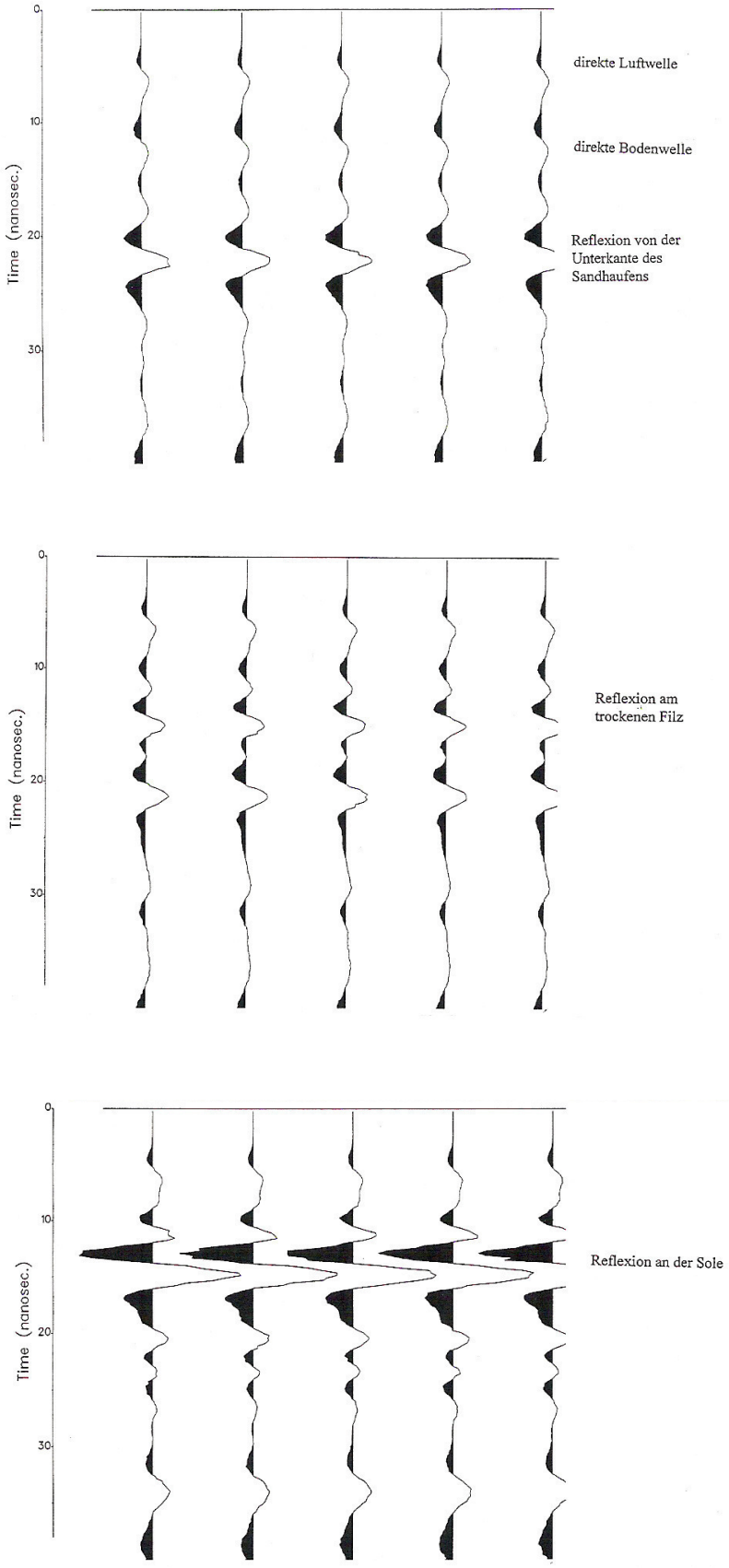


Abb. 8.1: Radarmessungen im Technikumsversuch ohne Reflektor (oben), mit trockenem Filz (Mitte) und mit laugegetränktem Filz (unten)

Die äußeren Bedingungen blieben während der einzelnen Messungen bis auf das Einbringen der jeweiligen Präparate konstant. Jede Messung wurde mit mehreren Referenzspuren wiederholt. In Abbildung 8.1 sind die Radargramme in amplitudenverstärkter Form dargestellt. Der obere Teil der Abbildung zeigt die Messdaten vom Sandhaufen ohne Präparate mit den Einsätzen der direkten Boden- und Luftwelle sowie der Reflexion von der Sandhaufenunterkante. Im mittleren Teil ist die schwache Reflexion der mit trockenem Filz gefüllten Folienstreifen zu sehen. Die mit Lauge gefüllten Folienstreifen im unteren Teil wiesen ein um Größenordnungen stärkeres Reflexionsverhalten auf, welches auch mit dem dritten Präparat mit zusätzlichem Metallpulver nicht mehr verbessert werden konnte. Im Ergebnis wurde festgelegt, im Untertageversuch eine Mindestsalinität der Lauge, wie oben angegeben (möglicht noch höher), ohne zusätzliche Beimischungen von Metallpulver zu verwenden.

In-situ-Versuche

Die Messungen wurden in der Hauptförderstrecke im Bergwerk Bernburg durchgeführt (siehe Abbildungen 4.4 bis 4.6). Die Abbildung 8.2 zeigt die Hauptanhydritaufwölbung am nordöstlichen Streckenstoß. Die Firste der Strecke ist im Steinsalz ausgebildet. Die Grenzfläche zwischen Anhydrit und Steinsalz ist am Streckenstoß gut zu erkennen. Das Injektionsbohrloch liegt unter dem Scheitel der Anhydritaufwölbung.

Bei der Wahl der Profile für die Radarmessungen am Versuchsort war ausschlaggebend:

1. Das Messraster sollte, soweit auf Grund äußerer Bedingungen möglich, eine flächenhafte Abbildung der mit der Injektion erzeugten Rissfläche erlauben.

2. Die Ausdehnung des Messgebietes sollte genug Raum für mehrere Einpressversuche bieten.

3. Die Profile sollten wegen der Maßgabe möglichst gleich bleibender Ankopplungsbedingungen entlang relativ glatter Stoßbereiche geführt werden.

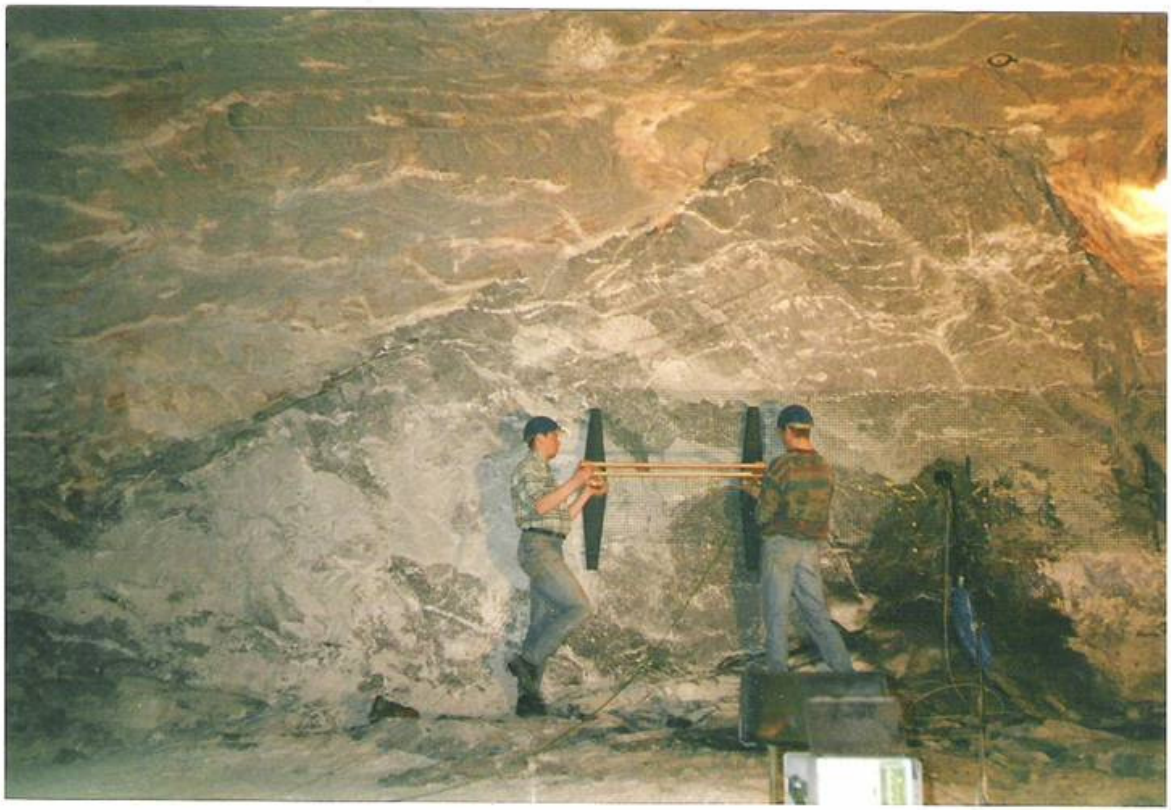


Abb. 8.2: Radar-Profilvermessung am Anhydrit mit begleitender SE-Rissortung

Da durch die sprengtechnische Auffahrung der Strecke die Oberfläche des Anhydritstoßes relativ uneben war, die maximalen Unebenheiten lagen zwischen 10 und 15 cm, wurde am Stoß eine Gittermasche mit einer Breite von 4 m und Höhe von 1 m sowie einer Maschenweite von 4 cm aus Plastik befestigt. Diese Vorrichtung gab dem Messteam eine genaue Orientierung der Radarsende- und Empfangsantenne zur Differenzmessung vor und nach dem Verpressen und gewährleistete einen gleich bleibenden Abstand zum Streckenstoß.

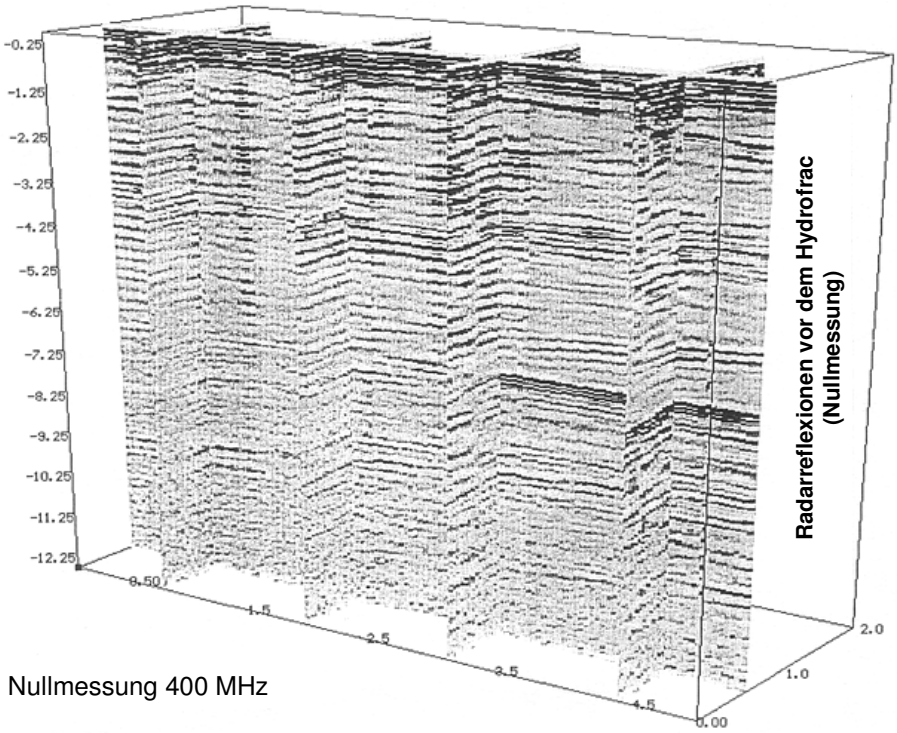
Das für die Oberflächenradarmessungen verwendete Equipment ist in YARAMANCI, U.; FUNK, J. (1997) beschrieben. Die Radarmessungen wurden wieder mit dem Bodenradargerät Typ RAMAC/GPR und den zugehörigen 100 MHz-, 200 MHz- und 400 MHz-Antennen durchgeführt. Für alle Profilmessungen kamen ein Antennenabstand von 1 m und eine senkrecht zur Einfallsebene orientierte Anordnung der Antennen (parallele Dipole) zur Anwendung. Die verwendete Lauge besaß die Konzentration 388 g/l $MgCl_2$, 11 g/l NaCl, 7 g/l KCl und 7 g/l $MgSO_4$ bei einer Dichte von 1,31 g/cm^3. Entlang der Kunststoffgittermasche erfolgte die Festlegung eines Horizontalprofils von 5 m Länge und von 4 Vertikalprofilen von jeweils 1,4 m Länge im Abstand links und rechts vom Injektionsbohrloch von 0,7 m und 2 m. Der Messpunktabstand betrug auf allen Profilen 4 cm.

Die Positionierung wurde von Hand vorgenommen und einzeln getriggert. Zu Beginn der Messungen wurden zunächst die Radarprofile eingemessen und die Nullmessung aller Profile durchgeführt. Um die erhaltenen Laufzeiten in Tiefen umrechnen zu können, wurden CMP-Messungen mit allen drei Antennenpaaren durchgeführt. Hieraus erfolgte die Geschwindigkeitsberechnung der elektromagnetischen Wellen im Anhydrit mit 0,116 m/ns. Mit den CMP-Messungen konnte die ausreichende Eindringtiefe der Radarwellen von 16 m bei den verwendeten Frequenzen von 100 MHz, 200 MHz und 400 MHz nachgewiesen werden, jedoch traten bis in eine Stoßtiefe von 4 m sehr viele Störsignale (wahrscheinlich Reflexionen aus der Messstrecke) auf.

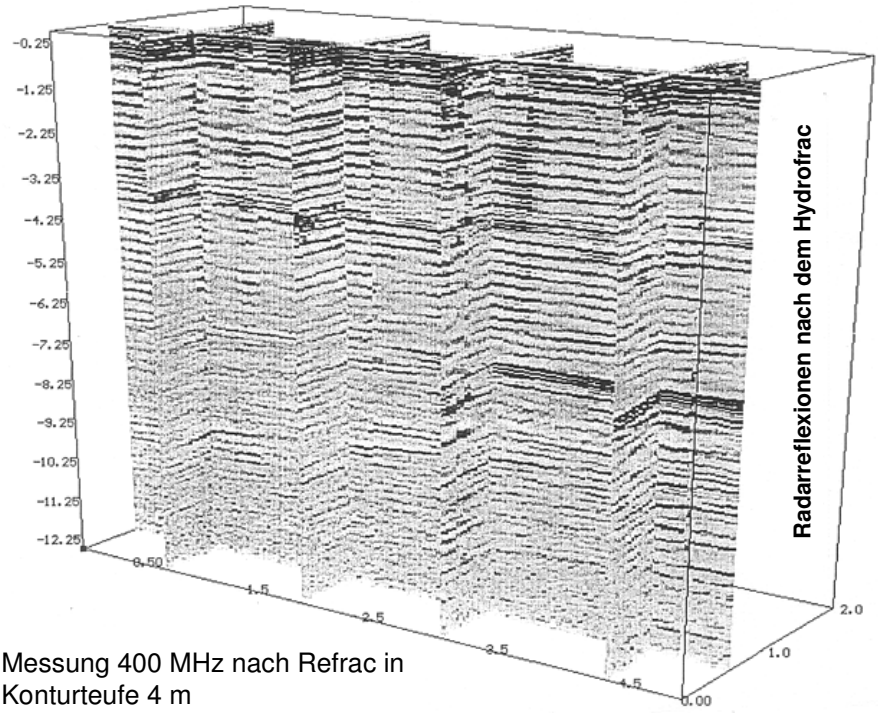
Es wurde vor und nach dem Verpressen in unterschiedlichen Bohrlochteufen von 6 bis 10 m mit allen drei Antennenfrequenzen analog zu den Nullmessungen gemessen und nach einem entstandenen Reflektor gesucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messparameter, vor allem die Spurabstände und die Umfeldbedingungen, den Nullmessungen entsprachen. Die Bearbeitungsabfolge setzte sich für alle Profile aus einer Bandpassfilterung, einer Nullzeitkorrektur und einer daran anschließenden Verstärkung der Daten zusammen. Die verpressten Fluidmengen lagen zwischen 3,3 und 8,8 l. Weiterhin erfolgte während des Verpressens eine Dauermessung. Dazu wurde das Antennengestell neben das Injektionsbohrloch gehängt und mit Triggerungsabständen von 2 bzw. 10 Sekunden eine Zeitserie aufgenommen. Dabei erhält man zwar nur eine Spur, infolge der Antennenfixierung durchläuft aber die Radarwelle immer wieder den Stoßbereich, in dem der Fracriss erwartet wird.

In Abbildung 8.3 ist als Messergebnis das Raumbild, jeweils bestehend aus einem horizontalen und vier vertikalen Profilen vor und nach dem Verpressen, dargestellt. Die sondierte Stoßtiefe bis -12,25 m ist an der linken Koordinatenachse abzulesen. Die untere Achse repräsentiert die Horizontalerstreckung bis 5 m und die rechte Achse die Vertikalerstreckung bis 1,4 m. Für die Darstellung wurde die am besten auflösende Antennenfrequenz von 400 MHz verwendet. Wie im Vergleich beider Bilder erkennbar, war in den vermessenen Bohrlochteufen weder die Entstehung eines Reflektors nachweisbar, noch konnte mittels der aufgezeichneten Zeitserie eine signifikante Reflexion bei der Rissausbreitung festgestellt werden.

Trotz intensiver Voruntersuchungen, hoher Datenqualität und guter Reproduzierbarkeit der Radargramme war es nicht möglich, die laugeerfüllten Fracrisse im Anhydrit zu detektieren. Auch bei der hohen Salinität war die Reflektormächtigkeit oder -erstreckung offensichtlich zu gering, um mit dem verwendeten Verfahren erkannt zu werden.



Nullmessung 400 MHz



Messung 400 MHz nach Refrac in
Konturteufe 4 m

Abb. 8.3: Raumbild der Profilvermessung am Anhydrit vor und nach der Laugeninjektion

Eine weiterentwickelte Versuchstechnik muss zukünftig zu einer Anwendungsverbesserung beitragen. Wünschenswert wäre z.B. eine Fokussierung des elektromagnetischen Feldes nur in der beabsichtigten Messrichtung. Bei dem verwendeten Equipment entstanden zahlreiche Reflexionen auch aus der Messstrecke (z.B. von einem Stahlgehäuse am Streckenstoß) und wurden als Inhomogenität im Gebirge interpretiert.

8.2.1.2 Einsatz der SE-Rissortung und von Verschiebungsmessungen zum Nachweis der Rissbildung

Zur Überprüfung und sicheren Klärung, ob es überhaupt zur Rissbildung parallel zum Stoß gekommen ist, wurden in einem Folgeversuch parallel zur Laugenverpressung Schallemissionsmessungen eingesetzt und die verpressten Fluidmengen gemessen. Dazu wurde die neu entwickelte Hydrofracsonde mit kombinierter Schallemissions-Rissortung eingesetzt. Aus den bereits durchgeführten Messeinsätzen lag die Erfahrung vor, dass die Empfindlichkeit und Ortungsgenauigkeit der Aufnehmer für eine Lokalisierung sich infolge der Injektion ausbreitender Risse ausreichend hoch sein würde. Dem Untersuchungskonzept lag die Überlegung zugrunde, dass bei der Fluidausbreitung an der Rissfront infolge der Gefügedurchtrennung ortbare Schallemissionen entstehen.
Weiterhin sollte die sich infolge Hydrofrac initiierte Öffnung eines stoßparallel liegenden Risses in einer Bohrlochtiefe von 1,9 m begleitend mit Wegaufnehmern gemessen werden.

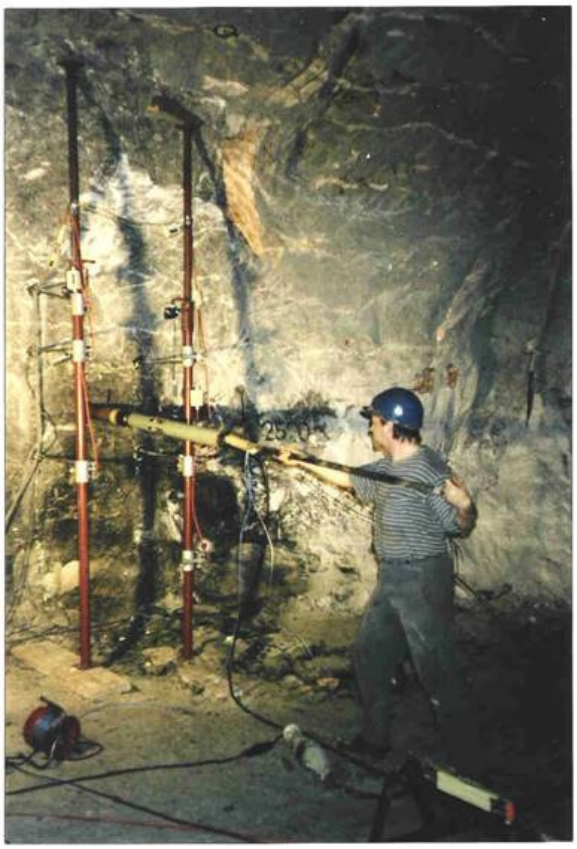


Abb. 8.4: Hydrofracsonde mit SE-Aufnehmern und Gestell mit 6 Wegaufnehmern zur Rissöffnungsmessung

Die Messortsituation in der alten Hauptförderstrecke ist in Abbildung 8.4 dargestellt. Die Bohrung am nordöstlichen Streckenstoß mit einem Durchmesser von 101 mm liegt etwa rechtwinklig zum Streckenstoß und ist 10 m lang. Sie ist unmittelbar benachbart zum Messort für die Oberflächenradarmessungen und verläuft in einer vergleichbaren Anhydritaufwölbung.

Eine untertägige Messung der Öffnungsweite eines Hydrofracrisses erschien nur dann sinnvoll, wenn der Riss in geringer Stoßteufe in stoßparalleler Richtung erzeugt wird und ausreichend empfindliche Wegaufnehmer verwendet werden können. Aus den Würfelfrac-versuchen war eine Öffnungsweite in der Größenordnung von 10^{-2} mm bekannt. Entsprechend der eigenen im Abschnitt 5 dargelegten Erfahrungen kann in einer Stoßteufe von 1,9 m die Rissflächenparallelität zum Stoß vorausgesetzt werden. Für die Wegmessung wurden elektrische Aufnehmer der Fa. Interfels mit einer Genauigkeit von 10^{-3} mm eingesetzt.

Wie in der Abbildung 8.4 zu sehen, wurden etwa 0,5 m vor dem Bohrlochmund (vor dem Stoß) zwischen Sohle und Firste zwei im Bauwesen übliche Metallstützen vertikal fixiert und mittels Klemmverbindungen insgesamt sechs horizontal messende Wegaufnehmer befestigt. In radialer Entfernung vom Bohrloch von 0,5 m sind vier Spreizhülsenanker und in radialer Entfernung von 1 m links oben und rechts unten zwei weitere Spreizhülsenanker jeweils etwa 0,3 m im Stoß versenkt. Die Wegaufnehmer sollten die durch den Hydrofrac erzeugte und über die Anker übertragene Stoßverschiebung in Richtung der unbeweglichen Metallstützen erfassen. Es wurde vorausgesetzt, dass sich bei einer stoßparallelen Rissausbreitung zumindest an einem näher am Bohrloch lokalisierten Aufnehmer ein Messeffekt zeigt und später, bei weiterer Injektion, einer der weiter entfernt gelegenen Wegaufnehmer anspricht.

In Abbildung 8.4 ist der ursprüngliche, später nicht mehr verwendete, Prototyp mit 0,75 m langen SE-Aufnehmergehäusen und einer Druckintervalllänge von 1 m erkennbar.

Entsprechend der Bohrungsbemusterung lag der abgepackerte Bohrlochabschnitt in einer Teufe von 1,4 m bis 2,4 m im ungeklüfteten Hauptanhydrit. Der Versuchsablauf ist in Abbildung 8.5 gezeigt.

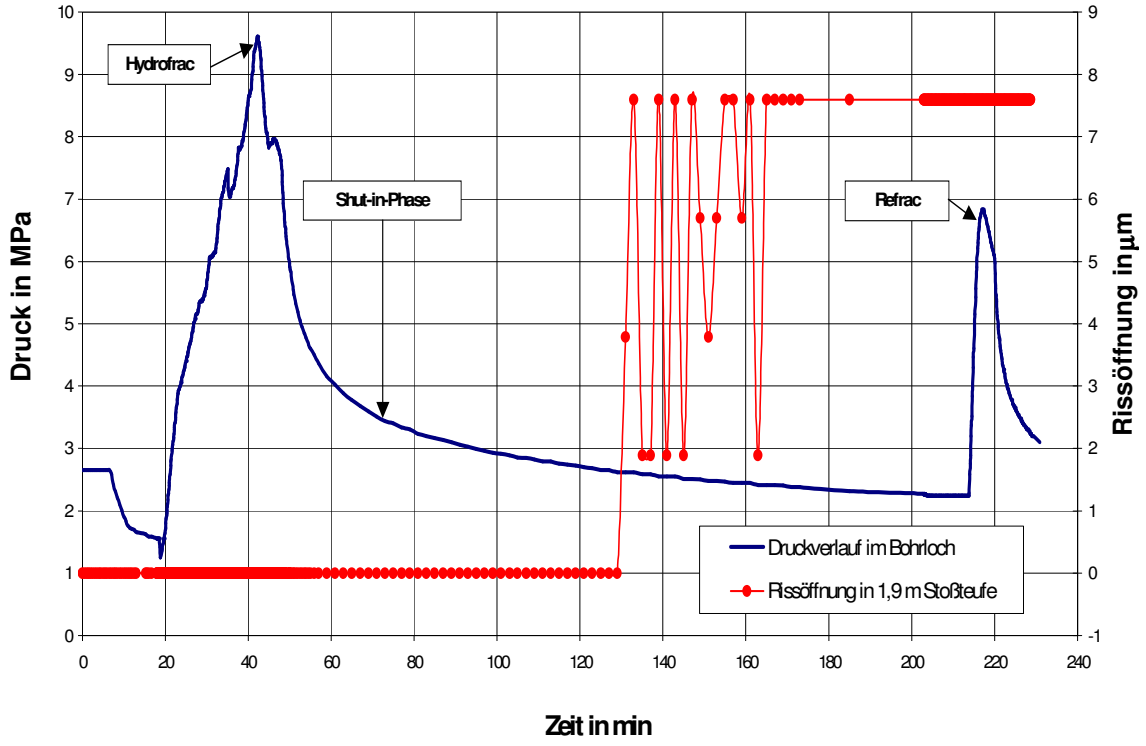


Abb. 8.5: Hydrofrac-Rissbildung im Anhydrit in einer Stoßteufe von 1,9 m und Messung der dabei realisierten Rissöffnung

In der Abbildung ist zu erkennen, dass im Verlauf der Shut-In-Phase etwa 90 Minuten nach dem Hydrofrac an einem Wegaufnehmer in einer radialen Entfernung vom Bohrloch von 0,5 m tatsächlich eine Rissöffnung nachweisbar ist, die nach dem Refrac einen endgültigen Betrag von 7 bis 8 µm erreicht. Eine solche Rissöffnung konnte nur an dem Aufnehmer links oben (bei Blick auf das Bohrloch) festgestellt werden, alle anderen Aufnehmer zeigten keine Reaktion.

In Abbildung 8.6 sind die während des Verpressens und der Schließphase aufgezeichneten Schallemissionen in 3 Ebenen dargestellt. Die Ereignisse in der X-Z-Ebene bei Blick in Bohrlochrichtung häufen sich im vierten Quadranten links oben. Der Riss breitet sich vorrangig in diese Richtung aus. Somit ist erklärlich, warum nur der Wegaufnehmer in diesem Bereich eine Rissöffnung anzeigen konnte. Die meisten Ereignisse traten während des mit der Handpumpe erzeugten Fracs und Refracs mit Rissausbreitungsgeschwindigkeiten bis 600 mm/min auf. In der folgenden langzeitigen Injektionsphase mit 30 ml/h klang die SE-Aktivität deutlich ab. Insgesamt wurden 8870 Ereignisse automatisch geortet.

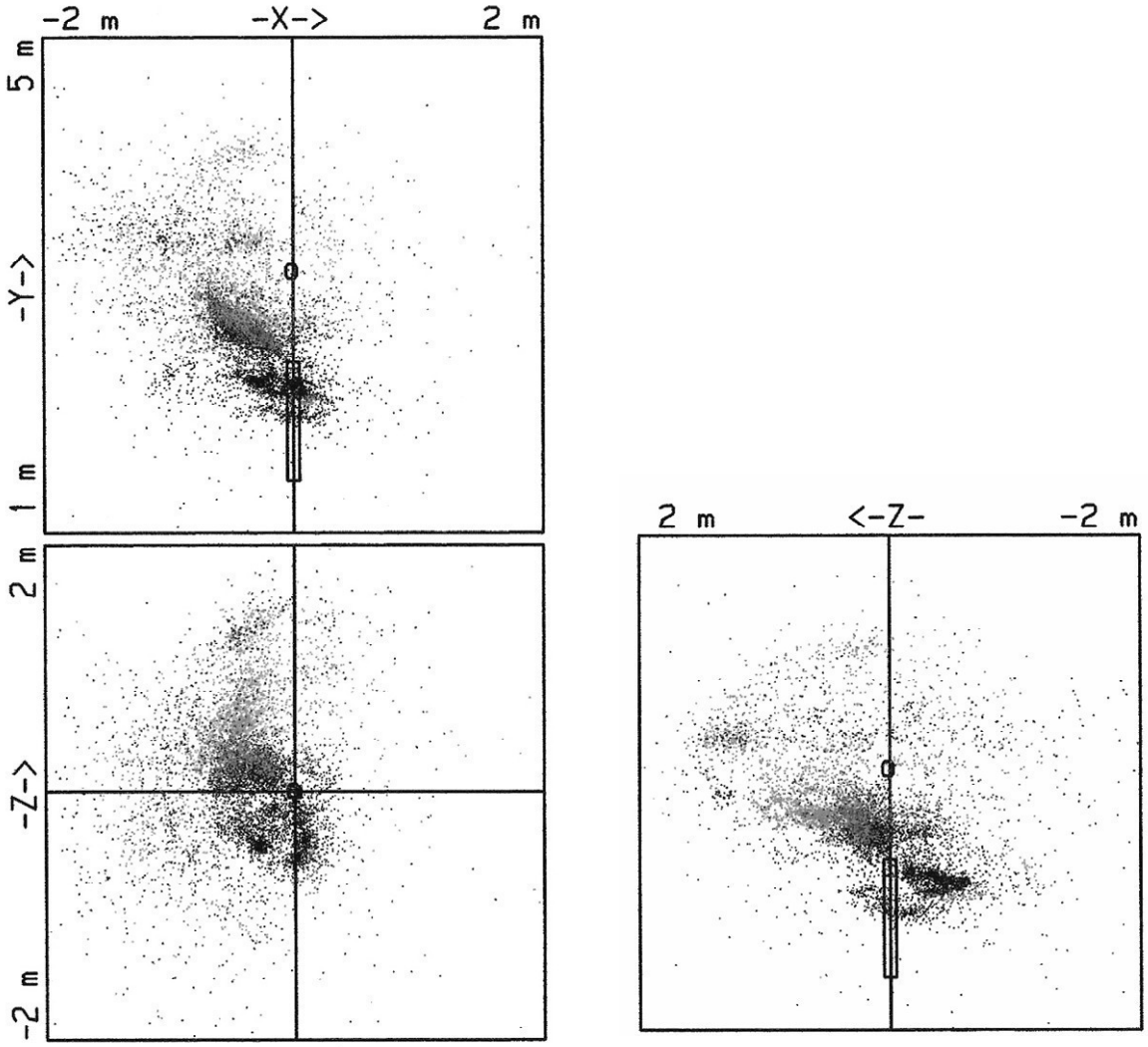


Abb. 8.6: SE-Ortungen im ungeklüfteten Anhydrit in einer Stoßteufe von 1,9 m (links oben Draufsicht, links unten Blick in Bohrlochrichtung, rechts Seitenansicht)

In der Schließphase nach dem Frac bis zum Refrac konnte eine Rissausbreitungsgeschwindigkeit festgestellt werden, die auf 2 bis 5 mm/min fiel. Nach dem Refrac wurde zunächst ein Risswachstum mit etwa 8 mm/min beobachtet, während des Langzeittests mit einer Verpressrate von 30 ml/h ging die Ausbreitungsgeschwindigkeit jedoch immer weiter zurück, bis überhaupt keine weitere Rissausdehnung mehr festzustellen war. Die SE-Ereignisse lagen dann nur noch im schon vorhandenen Rissgebiet. Die diffus verteilten SE-Ereignisse zeigen, dass bei der Rissausbreitung das Gefüge nicht vollständig durchtrennt wird und noch zahlreiche Materialbrücken vorhanden sind, an denen sich im Langzeitversuch Impulsquellen lokalisieren. Diese Beobachtung erklärt noch einmal den Misserfolg der oben beschriebenen Oberflächenradarmessung: Ein nicht zusammenhängendes Rissgebiet im Anhydrit mit Öffnungsweiten unter 10^{-2} mm ist nur schwer zu detektieren.

8.2.2 Beobachtung der Rissöffnung in einer Kluft mit Carnallitfüllung

An einem weiteren Versuchsort konnte auch die Fluiddruckbelastbarkeit einer Kluft mit Carnallitfüllung untersucht werden.

Abb. 8.7: Anhydritklüfte mit Carnallitfüllung am südwestlichen Streckenstoß der alten Hauptförderstrecke in Bernburg

Der am Streckenstoß ausstreichende Carnallit ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Die Horizontalbohrung (Ø = 101 mm) wurde entgegen dem Klufteinfallen angesetzt. In dem Bohrkern war der Carnallit deutlich zu erkennen und in dieser Teufe von 5,5 m wurden die in Abbildung 8.8 dargestellten Schallemissionen gemessen.

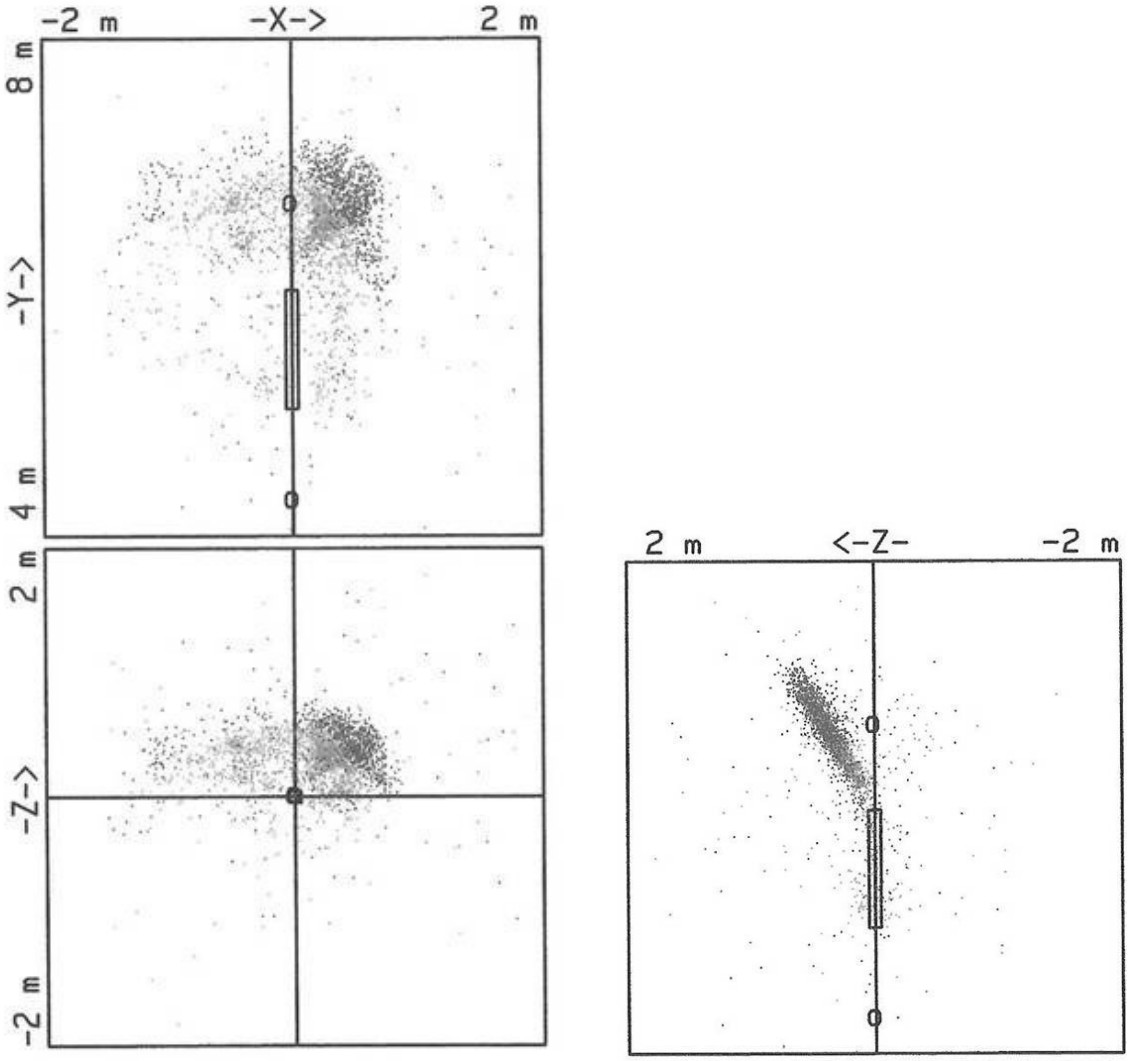


Abb. 8.8: SE-Ortungen im Anhydrit mit Carnallitfüllung in einer Bohrlochteufe von 5,5 m (links oben Draufsicht, links unten Blick in Bohrlochrichtung, rechts Seitenansicht)

Während des Hydrofracs mit Injektionsraten von 300 bis 400 ml/h und des darauf folgenden Langzeittests mit 18 ml/h wurden insgesamt ca. 2800 Schallemissionsereignisse geortet. Auch hier zeigte sich wieder das Risswachstum insbesondere bei hoher Injektionsrate. Die Rissausbreitung ist vorrangig im 1. Quadranten der X-Z-Ebene (Blick in Bohrlochrichtung) festzustellen. Die scharf abgegrenzte Rissfläche in der Y-Z-Ebene weist auf den Aufriss der carnallitgefüllten Kluft hin. Im homogenen Anhydrit wäre das Rissgebiet wesentlich großräumiger in einer „wolkenartigen“ Struktur ausgebildet. In Abbildung 8.8 ist zu erkennen, dass von einigen gestreuten Ereignissen abgesehen, fast alle Ereignisse oberhalb der Frac-Bohrung in der aufgerissenen Carnallitfüllung liegen.

Die Rissausbreitungsgeschwindigkeit während des Fracs und Refracs betrug etwa 25 bis 30 mm/min und fiel während des Langzeittests auf Null ab. Die Rissfläche erreichte eine maximale Ausdehnung in X- und Z-Richtung von 2,3 m bzw. 2,6 m.

8.2.3 Gesamtinterpretation einschließlich der minimalen Druckeinspannungen und Permeabilitäten

An dem Standort ohne Abbaueinfluss konnte die mittels Hydrofrac initiierte Rissausbreitung im ungeklüfteten und geklüfteten Anhydrit eindeutig lokalisiert werden. Es zeigte sich jedoch, wie bereits bei den Würfelfracversuchen im Labor festgestellt, dass die Rissöffnungsweiten in der Größenordnung von 10^{-2} mm liegen und keine durchgehenden Risse entstehen. Vielmehr kommt es zu einer lokalen Durchdringung des Gefüges mit zahlreichen dazwischen liegenden unversehrten Materialbrücken. Diese Ausbildung ist anhand der „wolkenartigen“ Verteilung der SE-Ortungen zu erkennen. Unter diesen Bedingungen ist es plausibel, dass eine Rissflächenreflexion von Radarwellen erfolglos war.
Die mittels der SE-Ortung angezeigte Ausbreitung der Rissgebiete war auf Entfernungen von etwa 2 m von der Bohrlochkontur beschränkt. Eine signifikante Rissfortpflanzung war nur bei einer Verpressung mit der Handpumpe (etwa Hundert Hübe mit je 2 ml in ca. 2 Minuten) mit einer Geschwindigkeit bis 600 mm/min festzustellen. Unter Verwendung der elektrischen Dosierpumpe bei konstanten Injektionsraten von 0,1 ml/h bis 500 ml/h kam es zu Geschwindigkeiten von 10 bis 50 mm/min bei den höheren Injektionsraten. In der Schließphase bzw. bei sehr geringen Injektionsraten konnte keine Rissfortpflanzung mehr festgestellt werden. Die Ereignisse lagen dann im schon bekannten Rissgebiet und zeigten die Schädigung von noch existierenden Materialbrücken an.
Ein Austritt des Fluids am Streckenstoß bei einer Entfernung bis zum Injektionsort im Bohrloch von 4 bis 7 m war gleichfalls nicht nachzuweisen. Als Fluid wurde dabei ein dünnflüssiges, mit Fluoreszin versetztes Spindelöl verwendet und am Stoß mittels einer UV-Lampe nach der Austrittsstelle gesucht.
Weiter entfernte Ortungen bis zu 3,5 m Entfernung vom Injektionsort waren nur nach mehrtägigen Druckbeaufschlagungen feststellbar. Die Abbildung 8.9 zeigt einen solchen Versuch im ungeklüfteten Anhydrit am Messort „Liegendzufahrt Kippstelle 9b“ (siehe Kapitel 8.3). Nach einer hohen Injektionsrate zur Rissinitiierung am Versuchsbeginn wurde danach über insgesamt 10 Tage eine niedrige Injektionsrate von 1 ml/h eingestellt, die zweimal am Tag für jeweils 30 Minuten auf 100 ml/h mit dem Ziel gesteigert wurde, SE-Ereignisse zu initiieren. Die Zeit zwischen den beiden Injektionsintervallen betrug 5 Stunden.

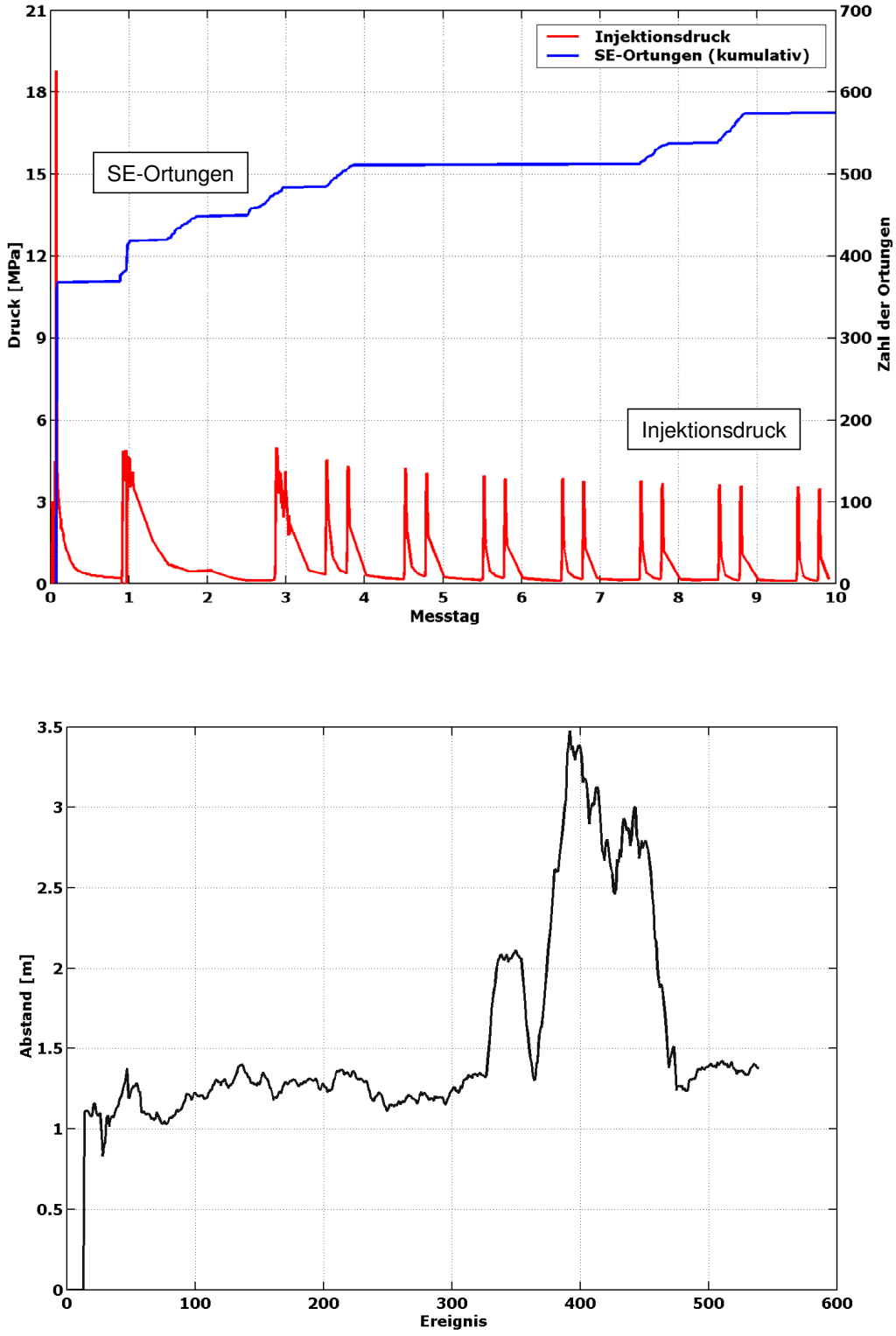


Abb. 8.9: Verlauf und Abstand der kumulierten Ortungen vom Injektionsort sowie des Injektionsdruckes

Es wurden insgesamt 574 Ortungen festgestellt, die in Abbildung 8.9 (obere Darstellung) kumulativ aufgetragen sind. Die meisten Ereignisse (etwa 370) entstanden während der

Rissinitiierung und danach fast nur noch in den schnellen Injektionsphasen, in denen sich Injektionsdrücke bis 5 MPa aufbauten (vom 4. bis 7. Messtag war die SE-Messung defekt). Nach der schnellen Injektion stellte sich infolge der permanenten Rissöffnung kein Ruhedruck ein, sondern es kam zu einem Druckabfall auf Null. Die langsame Injektion mit 1 ml/h führte zu keinen Schallemissionen. Im unteren Teil der Abbildung 8.9 ist der Abstand der Ereignisse, gemessen von der Mitte des Injektionsintervalls aus, in der zeitlichen Entwicklung dargestellt. Die Abszisse repräsentiert die zeitlich fortlaufende Ereignisnummer. Zur Glättung der Kurve wurde ein gleitender Mittelwert über 25 Ereignisse gebildet. Die Kurve zeigt zu Beginn eine schnelle Rissausbreitung bis zu einem Abstand von etwa 1 m und anschließend bis zu einer Entfernung von 1,3 m. Später nimmt der Abstand deutlich zu und erreicht vorübergehend ein Maximum bei etwa 3,5 m. Die Ereignisse am Ende des Versuchs stammen wieder aus der Nähe der Injektionsstelle. Damit wird ersichtlich, wie lokal differenziert die Ausbreitung einer Permeationsfront im geklüfteten Anhydrit verlaufen kann.

In Abbildung 8.11 sind alle im abbaufreien Bereich (kein aktiver Bergbau in der unmittelbaren Umgebung) in der alten Hauptförderstrecke in Bernburg ermittelten Minimalspannungen dargestellt. Die Minimalspannungen wurden entsprechend der im Kapitel 5 bei den Würfelfracversuchen im Anhydrit angewandten Methode aus den Rissöffnungsspannungen ermittelt. Der Minimalspannungsaufbau ist plausibel. In 9 m Stoßteufe wird ein den Erfahrungen für ungestörte Abbauverhältnisse in dieser Teufe entsprechender Einspannungszustand von etwa 11 MPa erreicht.

Die an den Gesteinswürfeln in dem begrenzten Prüfkörpervolumen im Kapitel 5 angewandten Auswertebeziehungen für stationäre Bedingungen (konstante Injektionsrate bei konstantem Abströmwiderstand) zur Berechnung von Kluftpermeabilitäten ließen sich jedoch nicht übertragen. An den Untersuchungsorten in den Bohrlöchern mussten instationäre Bedingungen vorausgesetzt werden und es wurden in den meisten Fällen diffuse räumliche Rissbildungen (siehe z.B. Abbildung 8.6) gefunden. Zur Bestimmung der integralen Permeabilitäten in den sondierten Anhydritbereichen kam deshalb die in SAUPE, H. (1961) bzw. in HÄFNER, F.; U.A. (1985) dargelegte Methode nach HORNER zur Anwendung. Dieses Verfahren wurde ursprünglich für die Abschätzung der Förderbedingungen in einer Flüssigkeitslagerstätte (z.B. Erdöl) entwickelt und geht von einer zeitlich begrenzten konstanten Förderrate Q über eine Förderzeit t_F aus, wobei sich die Reservoirbedingungen, insbesondere der Druck in der Lagerstätte, nicht ändern. Der Flüssigkeitsdruck an der Bohrlochkontur ist dabei abgesenkt. Nach dem Schließen der Sonde kommt es in der Schließzeit t_S zu einem Druckanstieg, bis der ursprüngliche Reservoirdruck wieder erreicht ist. Aus dem Druckanstieg können unter Berücksichtigung der Förderrate Q in der Förderzeit t_F

Rückschlüsse auf die integrale Permeabilität im Einflussgebiet der Druckentlastung in der Lagerstätte gezogen werden.

Für die vorliegende Aufgabenstellung wird in den vernetzten Poren und Rissen des Gesteins von einem Reservoir(Poren)druck von Null ausgegangen und statt der konstanten Förderrate aus dem Gestein eine konstante Injektionsrate in das Gestein realisiert. In der Schließphase kommt es danach zu einem Druckabfall in Richtung Null. Aus dem Druckabfall wird sinngemäß vergleichbar die integrale Permeabilität im Injektionsgebiet abgeleitet. Der Druckabfall $p(t_S)$ in der Schließzeit t_S ergibt sich zu:

$$p(t_S) = \frac{Q \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot H} \cdot \ln \frac{t_F + t_S}{t_S} \tag{8.1}$$

mit Q = konstante Injektionsrate in der Förderzeit t_F

μ = dynamische Viskosität des injizierten Hydrauliköls mit 6,8 mPa·s

H = Höhe des Injektionsintervalls und der injizierten Gesteinsschicht mit 1 m

K = integrale Permeabilität in der injizierten Gesteinsschicht

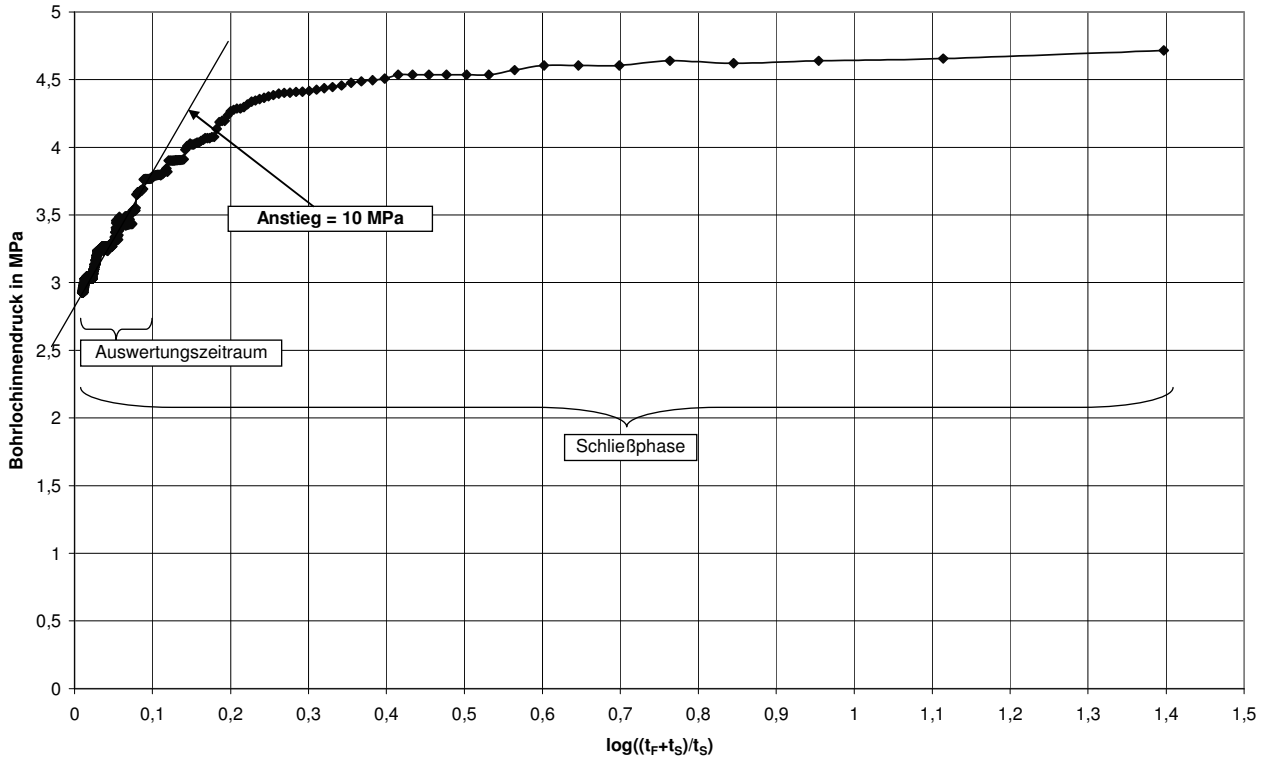
Aus

$$\ln \frac{t_F + t_S}{t_S} = \frac{\log \frac{t_F + t_S}{t_S}}{\log e} \approx 2{,}3 \cdot \log \frac{t_F + t_S}{t_S} \tag{8.2}$$

folgt

$$p(t_S) = \frac{2{,}3 \cdot Q \cdot \mu}{4 \cdot \pi \cdot K \cdot H} \cdot \log \frac{t_F + t_S}{t_S} \tag{8.3}$$

In Abbildung 8.10 ist exemplarisch ein Permeabilitätstest im kompakten Anhydrit mit einer konstanten Injektionsrate und anschließender Schließphase dargestellt. Die konstante Injektionsrate Q betrug 0,1 ml/h und die Injektionszeit t_F 6 Stunden. Die Schließphase erstreckte sich auf 11,2 Tage. Mittels einer Darstellung des Druckverlaufes $p(t_S)$ gegen log $((t_F+t_S)/t_S)$ lassen sich der Anstieg gemäß Beziehung 8.3 mit 10 MPa ermitteln und unter Verwendung der weiteren bekannten Parameter die integrale Permeabilität K berechnen.



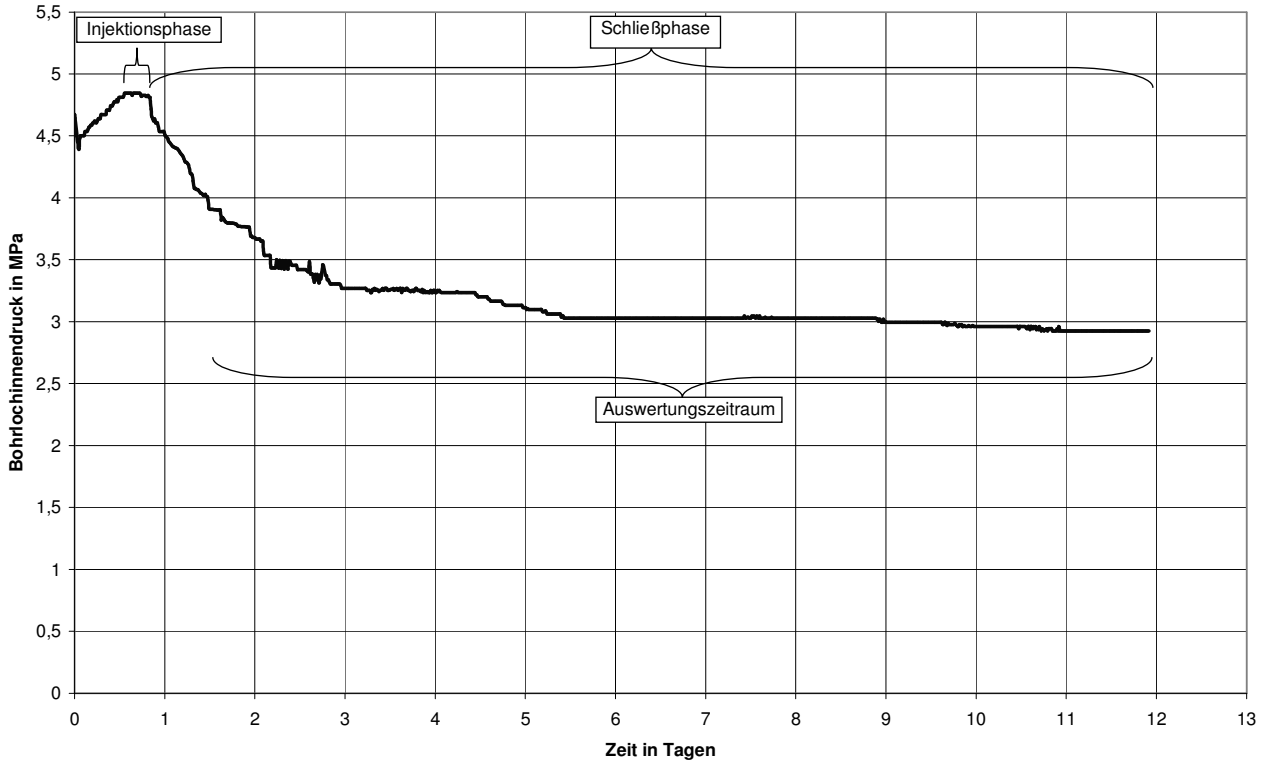


Abb. 8.10: Exemplarische Auswertung eines Permeabilitätstests im ungeklüfteten Anhydrit

Entsprechend HÄFNER, F.; U.A. (1985) zeigt sich oft eine Linearität der logarithmischen Darstellung infolge von Übergangseffekten erst im späteren Verlauf der Schließphase, so dass der lineare Anstieg in diesem Bereich ermittelt werden muss. Wie aus der

logarithmischen Darstellung zu ersehen, ist eine Linearität ab Werten log $((t_F+t_S)/t_S) < 0{,}1$ mit einem Anstieg von 10 MPa gegeben. Das entspricht einer zugrunde liegenden Versuchszeit von immer noch 10,5 Tagen (siehe lineare Darstellung). Mit den oben aufgeführten Parametern ergibt sich damit eine mittlere Permeabilität im Druckintervall von $4 \cdot 10^{-21}$ m².

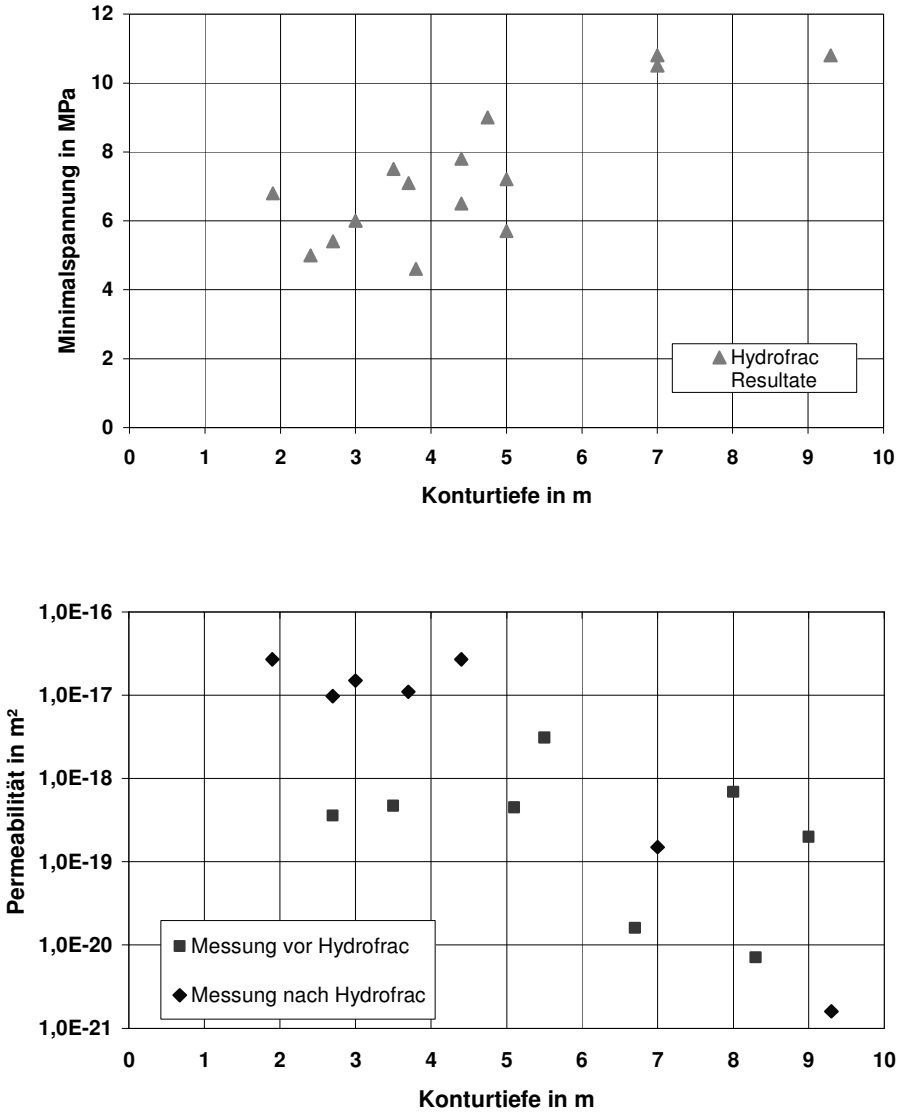


Abb. 8.11: Gesamtdarstellung der in Bernburg in einem abbaufreien Bereich ermittelten minimalen Druckeinspannungen und Permeabilitäten

In der unteren Darstellung in Abbildung 8.11 sind alle am abbaufreien Versuchsort in der alten Hauptförderstrecke in Bernburg bestimmten Permeabilitäten im Anhydrit angegeben. Die Messungen wurden im kompakten Anhydrit sowie in Partien mit geschlossenen und mit Sekundärmineralien gefüllten Klüften durchgeführt. Die Permeabilität ändert sich über mehrere Größenordnungen von 10^{-17} m² in 2 m bis 4 m Bohrlochteufe bis 10^{-19} m² im

Bohrlochtiefsten als Obergrenze bzw. von 10^{-19} m² in 2 m bis 4 m Bohrlochteufe bis 10^{-21} m² im Bohrlochtiefsten als Untergrenze.
Die Abhängigkeit von der Bohrlochteufe und damit der Einspannung war auf Grund der in Abschnitt 5 beschriebenen Würfelfracversuche zu erwarten. Der Streubereich der Permeabilitätswerte ergibt sich aus den Messungen vor bzw. nach dem Hydrofrac, wird aber auch stark von der geologischen Ausbildung des Anhydrits beeinflusst. Die Versuche in 8 m bzw. 8,3 m Bohrlochteufe wurden z.B. beide im ungeklüfteten Anhydrit vor dem Aufreißversuch durchgeführt und die Resultate liegen eine Größenordnung über bzw. unter dem mittleren Zusammenhang.
Es war keine grundsätzlich höhere Permeabilität der geklüfteten und mit Carnallit verwachsenen Untersuchungsbereiche im Vergleich zum homogenen Anhydrit zu erkennen. Die tektonisch vorgeprägten Anhydritbereiche erhalten offensichtlich infolge der Kluftfüllung ihre ursprüngliche Gebirgsdichtheit zurück.
In Bohrlochabschnitten mit offenen Klüften oder mit bei zurückliegenden Messeinsätzen durch die ungesättigte Bohrspülung angelösten Kluftfüllungen konnte dagegen keine Dichtheit erreicht und damit kein Versuch durchgeführt werden.

8.3 Untersuchungen unter wechselnden Gebirgsspannungen infolge Abbautätigkeit

8.3.1 Bergbauliche und geologische Situation

Aufbauend auf den Erfahrungen der Kluftpermeabilitätsmessungen im Labor (Kapitel 5), dass die hydraulische Dichtheit des geklüfteten Anhydrits neben der geologischen Ausbildung (Gefüge, Klüftigkeit) wesentlich vom Einspannungszustand der Klüfte abhängt, wurde in der Grube Bernburg ein Hauptanhydritaufschluss gesucht, der in der Projektlaufzeit infolge des sich nähernden Steinsalzabbaus Gebirgsspannungsänderungen ausgesetzt wird, die auch in einem Endlager, hier jedoch über wesentlich längere Zeiträume bis zum Abklingen aller Hohlraumkonvergenzprozesse und in einer geringeren Größenordnung, zu erwarten sind. In dem aktiven Abbaufeld 211 konnte dem IfG ein solcher Messort für gebirgsmechanische und hydraulische Untersuchungen am geklüfteten Anhydrit zur Verfügung gestellt werden.

Der Messort „Liegendzufahrt zur Kippstelle 9b“ befindet sich in einer Teufe von 403 m unter NN bzw. 480 m unter Geländeoberkante im Westen des Grubenfeldes des Steinsalzwerkes Bernburg (siehe Abbildung 8.12 als Detail bzw. 8.13 in Relation zum Abbaufeld). Dort wurde im Abbaublock 211 in 35 m hohen und 20 m breiten Abbaukammern Steinsalz gewonnen.

Die Abbildung 8.13 zeigt den Abbaustand im Februar 2001. Der Abbau 2111 mit einer minimalen Entfernung zum Messort von etwa 100 m wurde im Februar 2003 leergefördert. Die mittlere Länge der Abbaukammern beträgt etwa 220 m und zwischen den Kammern befinden sich Langpfeiler mit einer Breite von 28 m.

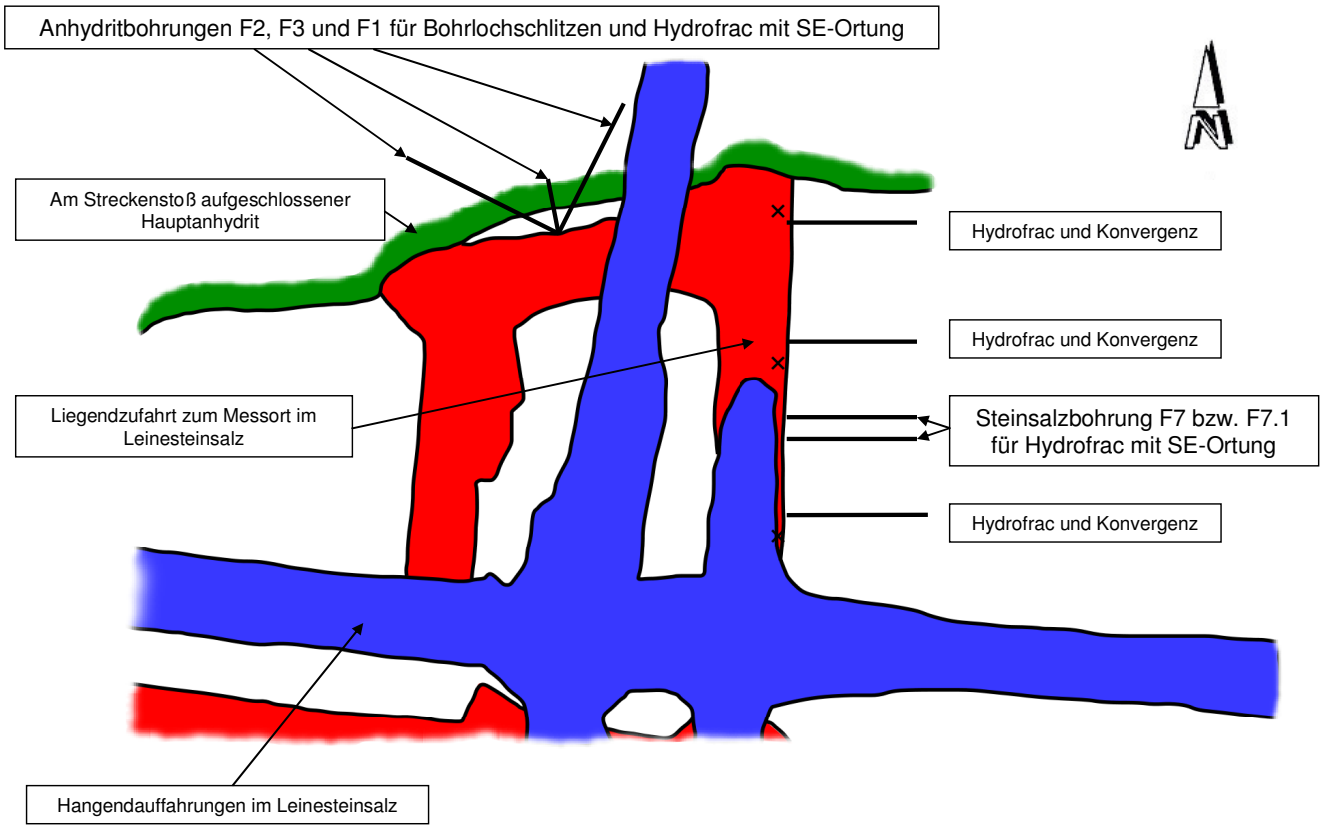


Abb. 8.12: Detailansicht des Messortes „Liegendzufahrt zur Kippstelle 9b“ (Teufe 480 m) mit Konvergenzmessstellen und den Bohrlöchern für Spannungssondierungen

Der Abbau erfolgte in zwei Phasen: Dem Vortrieb einer Hangendstrecke mit einer Höhe von 4 m und der zukünftigen Abbaubreite von 20 m ist zeitlich versetzt das Strossen in Richtung Liegendes bis zur endgültigen Abbauhöhe nachgeordnet. Die Gewinnung erfolgt durch Bohren und Sprengen. Für die Aus- und Vorrichtung der Abbaufelder wird ein Doppelstreckensystem aufgefahren, wobei die Bandstrecken zum Abtransport des Rohsalzes und die Wetterstrecken getrennt sind. Der Material- und Personentransport wird vorwiegend über die Wetterstrecken geführt.

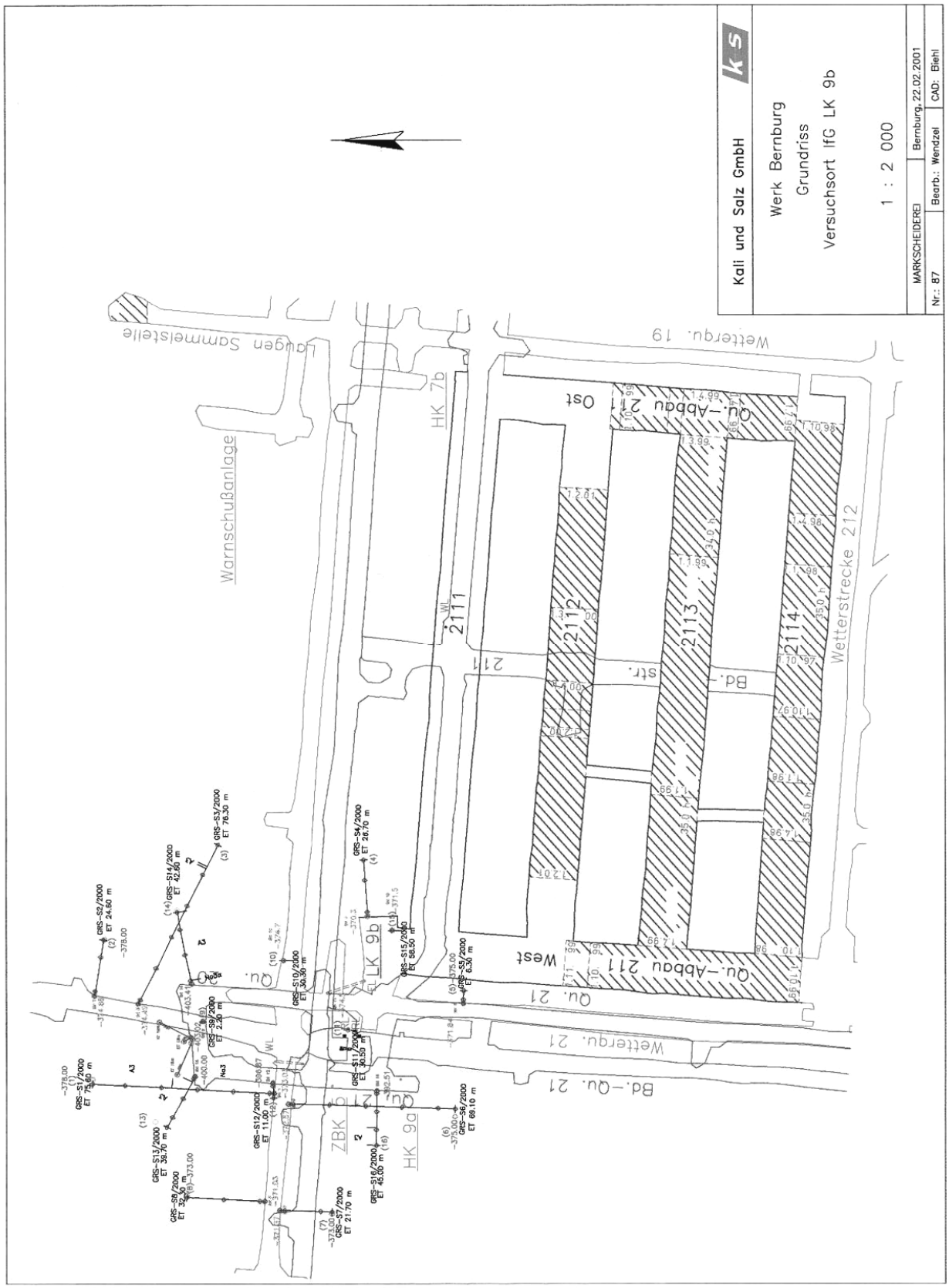


Abb. 8.13: Abbaublock 211 (Abbaue gestrichelt) und Lage des Anhydrit-Messortes mit Untersuchungsbohrungen

Am Messort wird das Leinesteinsalz von einer Anhydritklippe durchbrochen. Im Gegensatz zu dem plastisch reagierenden Steinsalz reagiert der Hauptanhydrit auf tektonisch-halokinetische Beanspruchungen starr und kann sich nicht wie das Steinsalz verformen. Zwar zeigt auch der Anhydrit im größeren Maßstab faltenähnliche Ausbildungen, bei stärkerer Beanspruchung zerreißt jedoch die im Mittel 35 m mächtige Schicht und durchdringt in Form von Klippenstrukturen das Steinsalz. Die Klüftigkeit des Hauptanhydrits ist dabei unterschiedlich stark. Die Ausdehnung der Klüfte beträgt wenige Dezimeter bis zu mehreren Dekametern. Die Öffnungsweiten sind meist gering, seltener treten Öffnungen bis zu einigen Zentimetern auf. Die Füllung derartiger Klüfte besteht überwiegend aus Carnallit oder Halit.

Zum Messort am aufgeschlossenen Hauptanhydrit (grün in Abbildung 8.12) gelangt man über die Liegendauffahrt (rot) in einer Teufe von 406 m unter NN. Die Hangendauffahrungen, die zum Firstbereich der Abbaue führen, sind blau eingefärbt.

In der Auffahrt im Steinsalz bis zum Anhydritaufschluss mit einer Streckenhöhe von 4 m wurden drei Konvergenzmessstellen errichtet und Bohrlöcher zur Bestimmung der minimalen Gebirgsspannung mittels Hydrofrac gestoßen. Die Messstellen und Bohrlöcher liegen zwischen dem Hauptanhydrit und den Abbaukammern und waren demzufolge zuerst den Spannungsänderungen ausgesetzt. Obwohl der Untersuchungsschwerpunkt bei der Ermittlung gebirgsmechanischer und hydraulischer Auswirkungen des Abbaus im Hauptanhydrit lag, sollten die Konvergenz- und Spannungsmessungen im Steinsalz als begleitende Untersuchungen die Registrierung von Überzugswirkungen unterstützen.

8.3.2 Konvergenz in der Steinsalzzufahrtsstrecke zum Anhydritmessort

Die Installation der drei Konvergenzmessstellen erfolgte am 12.03.1999 in der Auffahrt zum Anhydritmessort an den in Abbildung 8.12 angegebenen Lokationen. Es wurden je Messstelle drei Ankerstangen mit einer Länge von 1,3 m für die Firste und drei Ankerstangen mit einer Länge von 1,3 m für die Sohle verwendet, mittels Innengewindebolzen zusammengeschraubt, gekontert und mit Spreizhülsenankern etwa 2 m in der Firste und 1,2 m in der Sohle befestigt. Die First- und Sohlenstange verliefen etwa 0,6 m parallel zueinander und in diesem Bereich wurden elektrische Wegaufnehmer der Firma Interfels mit Leitplastikwiderstandselement (Gesamtweg 25 mm, Auflösung 0,01 mm) mittels Klemmvorrichtungen befestigt und zur gegenüberliegenden Stange verspannt. Die Länge der Messstrecke vom verankerten Firstpunkt bis zum verankerten Sohlenpunkt betrug

etwa 7,2 m. Die unmittelbaren Auflockerungszonen in der Firste und Sohle beeinflussten damit die Messwerte nicht.

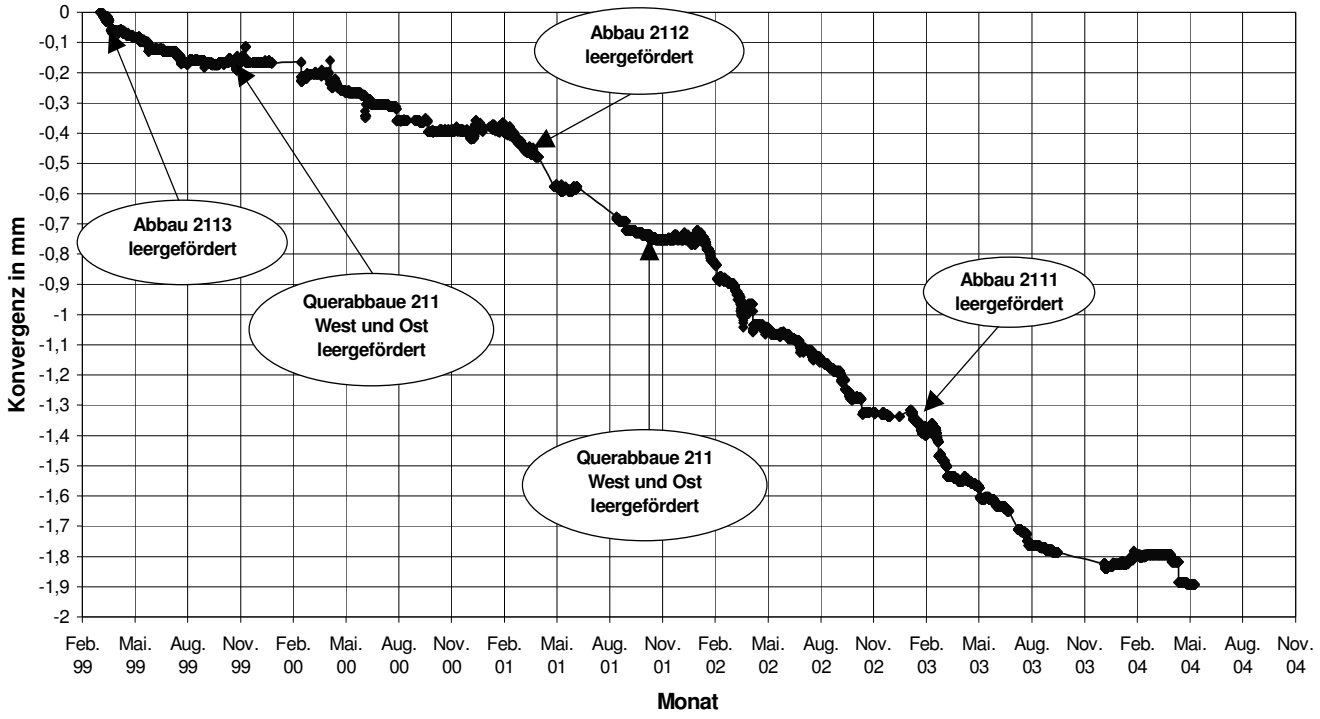


Abb. 8.14: Vertikalkonvergenz obere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

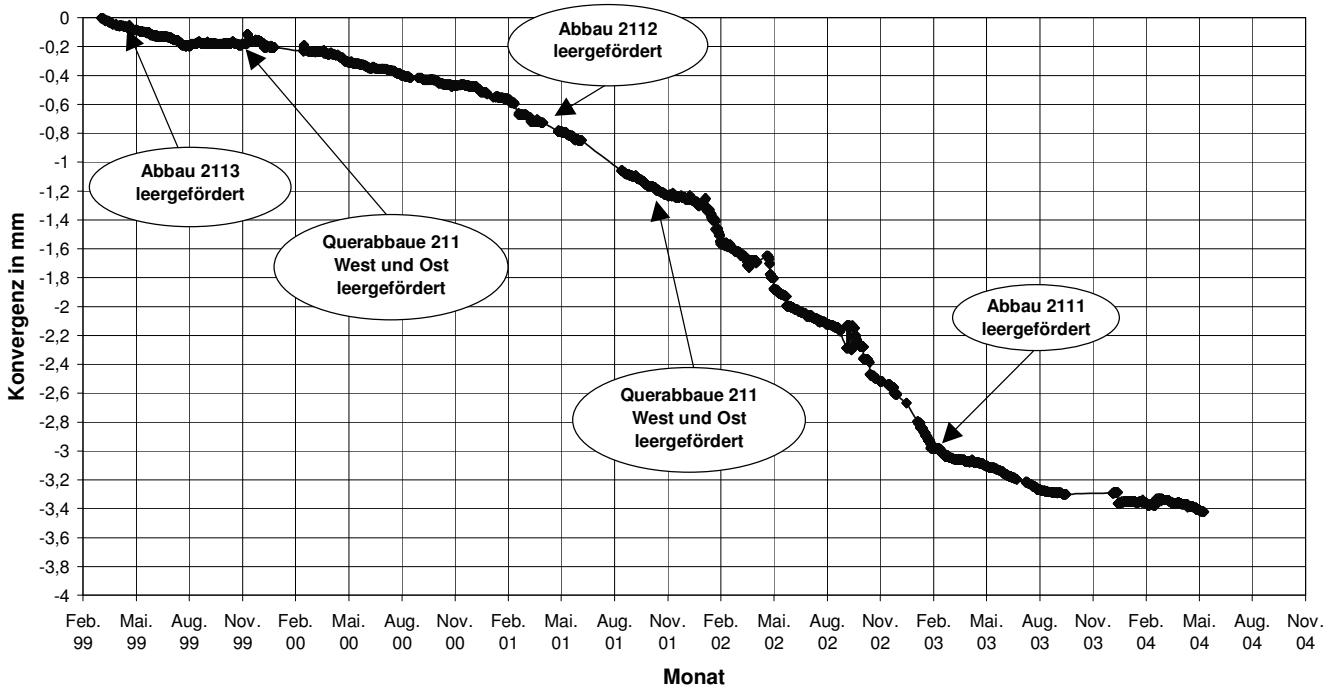


Abb. 8.15: Vertikalkonvergenz mittlere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

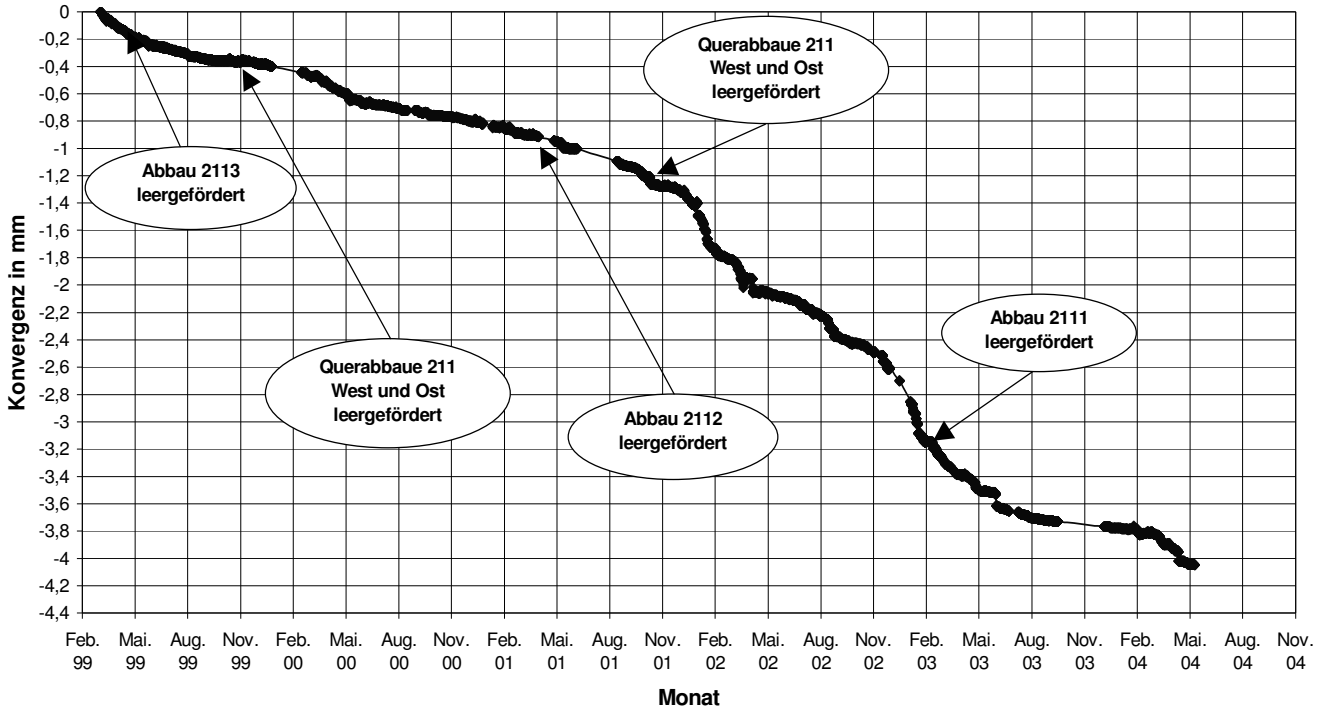


Abb. 8.16: Vertikalkonvergenz untere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

Die Konvergenzverläufe sind in den Abbildungen 8.14 bis 8.16 dargestellt. Zur besseren Zuordnung sind die Abbaustände mit angegeben. Die Gesamtkonvergenzen im dargestellten Messzeitraum von über 5 Jahren betragen an der oberen Messstelle 1,9 mm, in der Mitte 3,4 mm und an der unteren Messstelle 4,1 mm. In dieser Abstufung sind die Beträge plausibel und auf die unterschiedlichen Entfernungen der Messstellen zu den Abbaukammern zurückzuführen. An allen Messstellen wird eine Erhöhung der Konvergenzrate ersichtlich, die nur mit der Annäherung der Abbaufront erklärt werden kann. Insbesondere die mittlere und untere Messstelle zeigen deutliche Erhöhungen der Deformationsraten mit dem Abbau der nächstgelegenen Strosse 2111 ab dem Jahresbeginn 2002 und einen signifikanten Abfall der Raten nach der Leerförderung des Abbaus im Februar 2003.

Entsprechend Tabelle 8.1 nähern sich die Raten danach wieder dem Ausgangsniveau des Jahres 1999 an, welches repräsentativ für eine Einzelstrecke in dieser Teufe im Steinsalz ohne Abbaueinfluss ist. Mit den Konvergenzmessungen in der Zufahrtstrecke zum Anhydritmessort ist damit eindeutig ein Einfluss erhöhter Gebirgsspannungen in diesem Bereich nachgewiesen.

Tabelle 8.1: Auf die Messbasislänge normierter Konvergenzverlauf

Deformationsrate (bezogen auf die Basislänge von 7,2 m)	Vor Abbaubeginn der 2111	Während des Abbaus der 2111	Nach dem Abbau der 2111
Obere Messstelle	0,03 ‰ pro Jahr	0,07 ‰ pro Jahr	0,03 ‰ pro Jahr
Mittlere Messstelle	0,04 ‰ pro Jahr	0,16 ‰ pro Jahr	0,04 ‰ pro Jahr
Untere Messstelle	0,06 ‰ pro Jahr	0,17 ‰ pro Jahr	0,06 ‰ pro Jahr

Die Minimalspannungssondierungen vom März 1999 bis zum Februar 2004 in den Horizontalbohrungen rechtwinklig zur Steinsalzauffahrt (Abbildung 8.12) zeigten jedoch weder bzgl. der Beträge noch bzgl. der Rissflächenlage eine signifikante Änderung, die der Abbauentwicklung zugeordnet werden konnte. Die sondierten minimalen Hauptspannungen lagen in unterschiedlichen Messabschnitten außerhalb des Streckeneinflusses zwischen 9 und 11 MPa und die sich ausbildenden Hydrofrac-Rissflächen fielen unter einem Winkel von 40 bis 70 Grad nach SW ein.

Die Aktivierung der Streckenkonvergenzraten musste demzufolge durch eine Erhöhung der vertikalen Maximalspannung verursacht worden sein. Begleitend durchgeführte Modellrechnungen hatten deshalb das Ziel, die aus der Annäherung der Abbaukammern resultierenden Spannungsänderungen, die anhand der Konvergenzmessungen in der Zufahrt zum Anhydritmessort deutlich nachweisbar waren, in einem großräumigen Gebirgsausschnitt auch tatsächlich zu belegen. Die Modellrechnungen sollten den sich entwickelnden Abbaustand nachbilden und zeigen, dass die im Messortbereich berechneten Spannungs- und Deformationszustände mit den In-situ-Messwerten übereinstimmen.

Die in den Abbildungen 8.17 bis 8.20 dargestellten Isoflächenplots der maximalen und minimalen Hauptspannungen stammen aus KAMLOT, P.; U. A. (2002) und repräsentieren einen Vertikalschnitt in Richtung Nord-Süd durch das Abbaufeld quer zu den Langkammern (siehe Abbildung 8.13). Deren Umriss erscheint im Schnitt mit einer Breite von 20 m und einer Höhe von 35 m. Die Abbauhöhe entwickelt sich aus einer ersten Abbauphase mit Höhen von 4 m und wird im Modell in der realen bergbaulichen Zeitfolge umgesetzt. Die zwischen den Abbaukammern stehenden Pfeiler besitzen Breiten von 28 m. Die Schichtgrenzen zwischen dem Buntsandstein, Leinesteinsalz und Hauptanhydrit wurden entsprechend der Unterlagen des Grubengeologen festgelegt.
Das Modell besitzt eine Gesamtbreite von 300 m und eine Gesamthöhe von 300 m. Die Modelloberkante liegt in einer Teufe von 294 m und aus einer mittleren Wichte des überlagernden Gebirges mit 24 kPa/m ergibt sich eine vertikale Modellauflast von 7 MPa.

Die vertikalen Modellränder werden in horizontaler Richtung und die Unterkante in vertikaler Richtung festgehalten.
Die Strecke des Messortes selbst wurde im Modell nicht diskretisiert. Das Untersuchungsziel lag bei der Ermittlung der sich ändernden Umgebungsspannungen.

Es kamen folgende Stoffparameter zur Anwendung:

Tabelle 8.2: Materialparameter für begleitende Modellierung Abbaublock 211 Bernburg

	Buntsandstein	Leinesteinsalz	Hauptanhydrit
Dichte in g/cm^3	2,45	2,15	2,9
Kompressionsmodul in GPa	6,7	17	50
Schermodul in GPa	3,1	10	23

Die Schichten des Buntsandsteins und Hauptanhydrits wurden mit einem elastischen Stoffgesetz und das Leinesteinsalz mit einem Kriechansatz der Form

$$\dot{\varepsilon}_{diff} = A \cdot \sigma_{diff}{}^{n}$$

modelliert. Folgende Kriechparameter wurden verwendet:

- Spannungsexponent n = 4,8
- Vorfaktor A = $7{,}2 \cdot 10^{-13}$ MPa$^{-4,8}$·h^{-1}

Der Modellierungsablauf erfolgte in den Schritten:

- Berechnung des Grundspannungszustandes
- Simulation der Standzeit der Hangendauffahrungen mit einer Primärhöhe von 4 m von Mitte 1984 bis Mitte 1997 (13 Jahre)
- Auffahrung Abbau 2114 in 2 Schritten bis Mitte 1998
- Auffahrung Abbau 2113 in 2 Schritten bis Anfang 1999
- Auffahrung Abbau 2112 in 2 Schritten bis Anfang 2001
- Auffahrung Abbau 2111 in 2 Schritten bis Anfang 2003

In Abbildung 8.17 sind in Isoflächenplots die sich ausbildenden maximalen Hauptspannungen Anfang 1999 zu Beginn der In-situ-Messungen kurz vor Abschluss der Gewinnung des Abbaus 2113 und in Abbildung 8.18 für den Zeitpunkt Anfang 2003 unmittelbar vor Beendigung der Auffahrung des Abbaus 2111 dargestellt. Die Abbildungen 8.19 und 8.20 enthalten die entsprechenden minimalen Hauptspannungen.

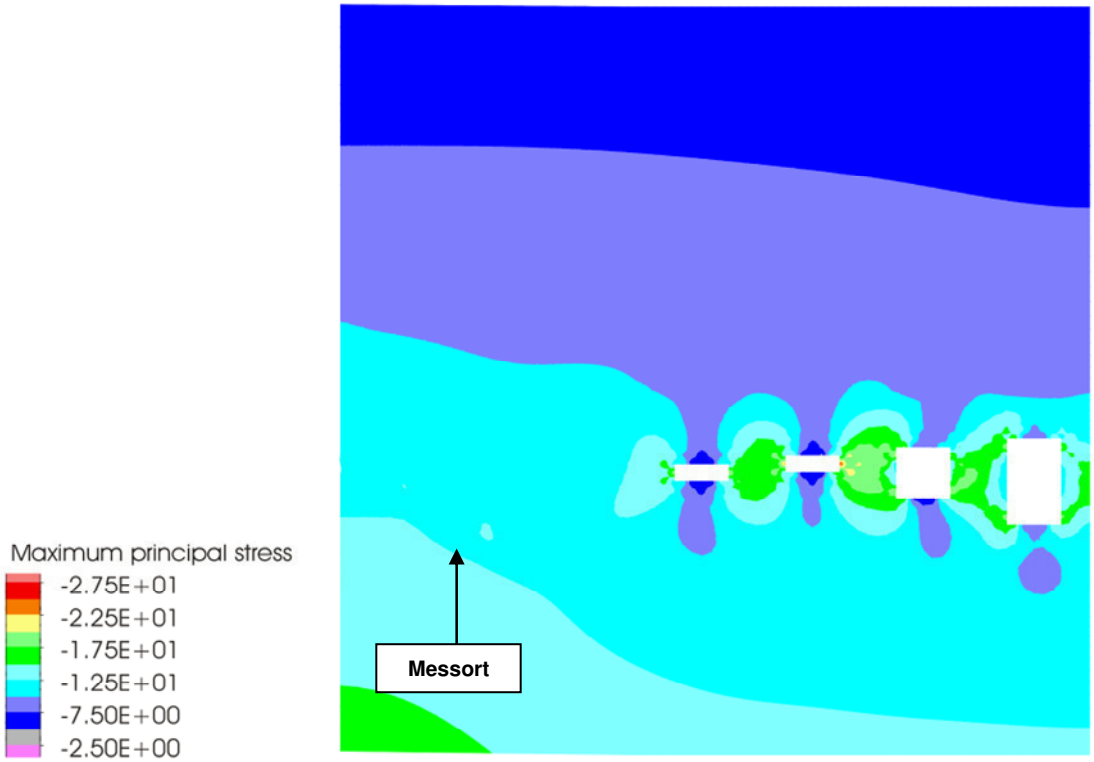


Abb. 8.17: σ_{max} [MPa] Anfang 1999 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2113

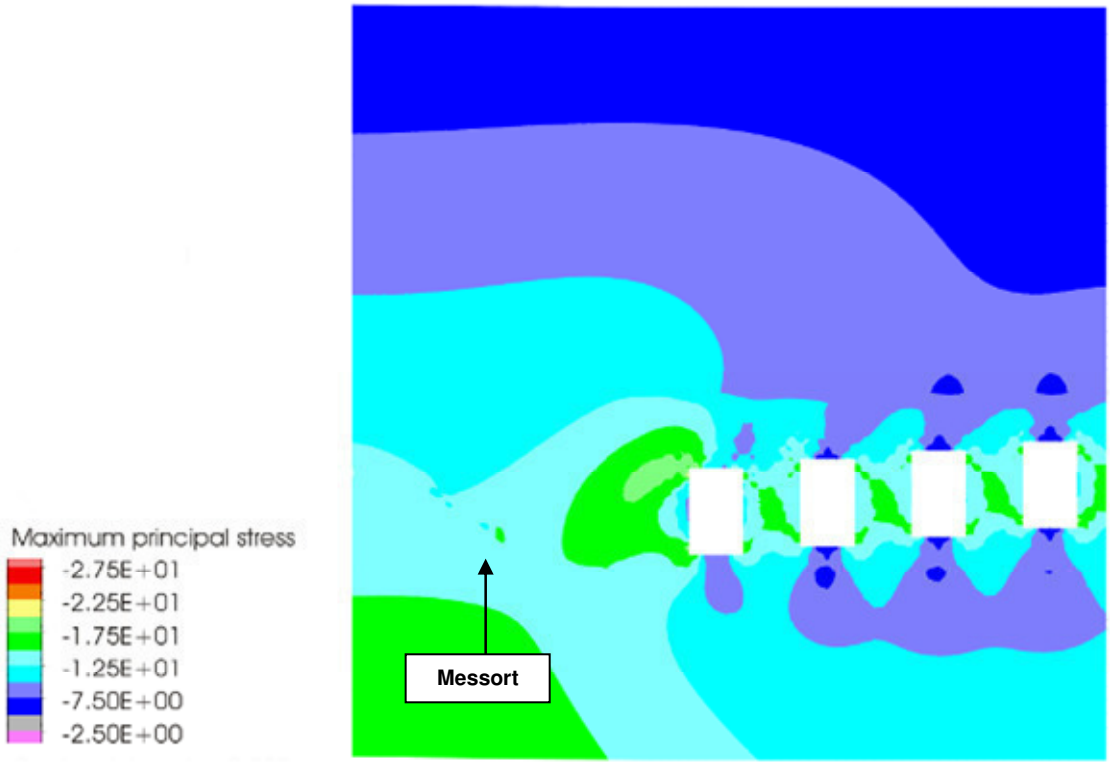


Abb. 8.18: σ_{max} [MPa] Anfang 2003 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2111

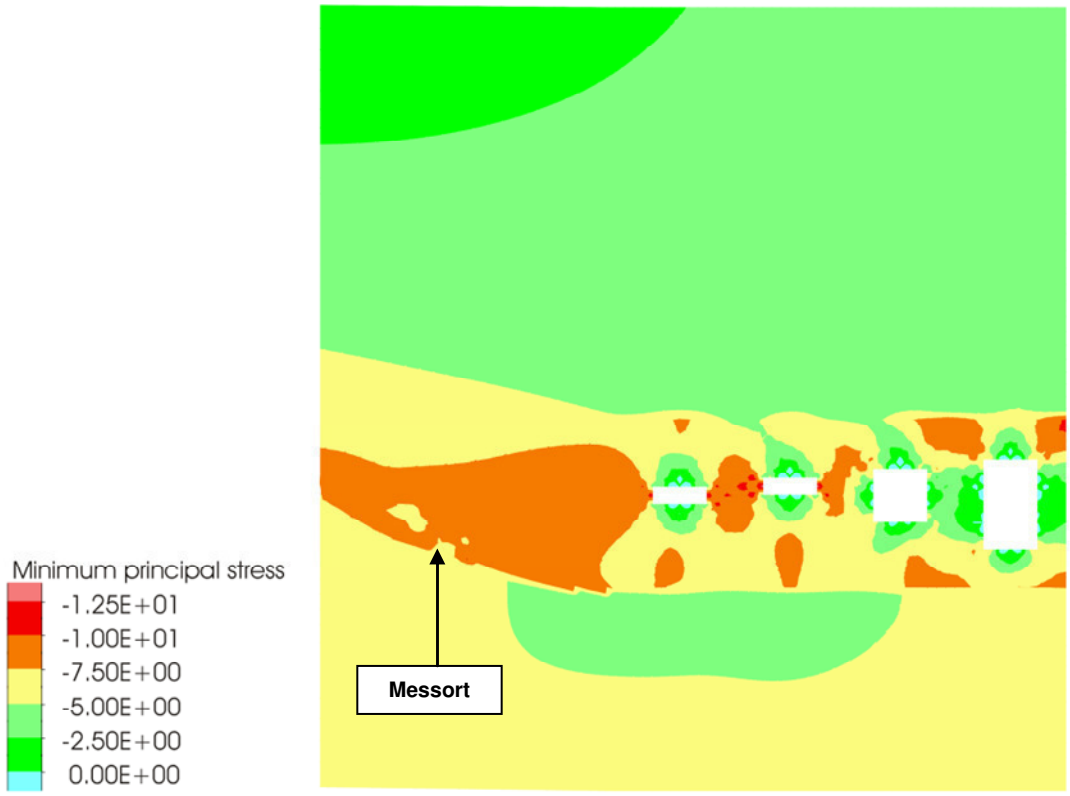


Abb. 8.19: σ_{min} [MPa] Anfang 1999 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2113

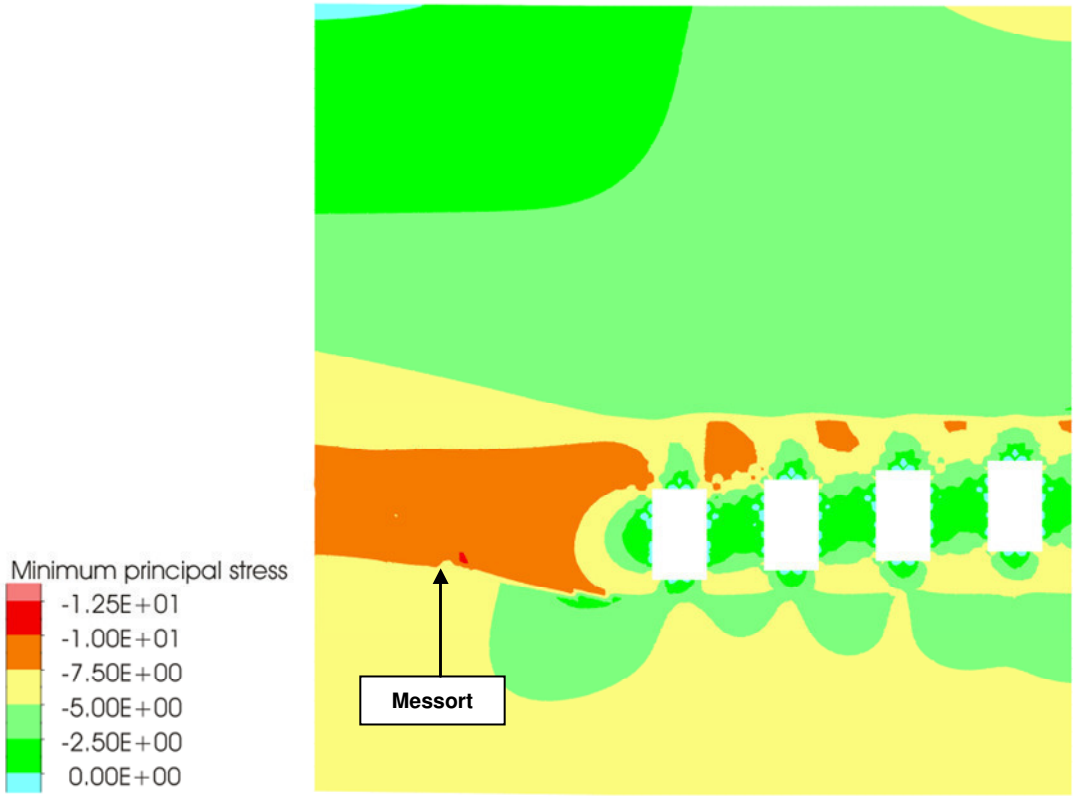


Abb. 8.20: σ_{min} [MPa] Anfang 2003 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2111

Es ist deutlich zu erkennen, wie sich infolge der Auffahrungen die Gebirgsspannungen verändern und sich ein vertikal wirkendes Spannungsmaximum dem Messort nähert. Während σ_{max} Anfang 1999 zwischen 10 MPa und 12,5 MPa lag, ist Anfang 2003 ein Spannungsbereich von 12,5 MPa bis 15 MPa ausgewiesen (das negative Vorzeichen kennzeichnet Druckspannungen). Die Minimalspannung σ_{min} ändert sich nur unbedeutend und liegt in beiden Abbildungen in einem Bereich zwischen 7,5 MPa und 10 MPa. Sie stimmt sehr gut mit den mittels Hydrofrac sondierten Minimalspannungen überein.

Setzt man die Hauptspannungen in ihrer zeitlichen Änderung als Randbedingung in einem (hier nicht dargestellten) Detailmodell einer Einzelstrecke im Steinsalz mit den Abmessungen der Zufahrt an und berechnet mit dem obigen Kriechgesetz die Streckenkonvergenz für die Spannungszustände Anfang 1999 und Anfang 2003, so ergibt sich eine Steigerung der Streckenkonvergenzrate auf den dreifachen Betrag. Eine solche Steigerung wurde mit den Konvergenzmessungen in der Auffahrt zum Anhydritmessort im Steinsalz tatsächlich gemessen. Damit kann festgestellt werden, dass die Auswirkungen der Spannungsänderungen auf den Konvergenzprozeß im Steinsalz mit den Rechenmodellen richtig abgebildet werden. Es besteht Konsistenz zwischen den berechneten und den in situ gemessenen Spannungen und Deformationen.

8.3.3 Untersuchung des hydraulischen Abströmwiderstandes im geklüfteten Anhydrit in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt

An dem in Abbildung 8.12 dargestellten Messort sollte überprüft werden, ob auch im Anhydrit veränderte Einspannungen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt festzustellen sind. Weiterhin wurde getestet, ob der sich im stationären Zustand in den Klüften bei einer vorgegebenen Injektionsrate einstellende Abströmwiderstand zur Minimalspannungssondierung verwendet werden kann.
Der am Nordstoß der Liegendauffahrt 9b aufgeschlossene Hauptanhydrit wurde mit drei Bohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 101 mm erschlossen. Die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 8.12 mit den Bezeichnungen F1, F2 und F3 gekennzeichnet und die Orientierung beträgt:

	Azimutwinkel	Neigungswinkel	
F1	27°	-10,5°	(steigend)
F2	-67°	-12,4°	(steigend)
F3		90°	(vertikal nach unten)

Vor der Festlegung der Bohrlochansatzpunkte erfolgte eine ingenieurgeologische Erstbemusterung des aufgeschlossenen Anhydritstoßes mit der Zielstellung, dass die Bohrungen möglichst die am Stoß zu erkennenden und mit Carnallit gefüllten Klüfte durchstoßen sollten. Nach dem Bohren wurden gleichfalls die Bohrkerne hinsichtlich der geologischen Klüfte bemustert und zusätzlich zur Überprüfung der für die Untersuchungen ausgewählten Bohrlochabschnitte diese mit einer Bohrlochkamera befahren.
In den Bohrlochbereichen mit geöffneten Anhydritklüften waren weder eine Spannungssondierung, noch eine Bestimmung hydraulischer Parameter möglich. Die Sonde musste etwa 1 m verschoben werden. In den 3 Bohrungen war das in 5 Testabschnitten der Fall. In Abschnitten mit geschlossenen Klüften, mit Carnallit verwachsenen Klüften sowie mit bitumengefüllten Suturen waren die geplanten Untersuchungen durchführbar.

In den Abbildungen 8.21.1 bis 8.21.3 ist der Druckverlauf in einem ungeklüfteten und primär dichten Abschnitt im Bohrloch F2 in einer Stoßteufe von 4,7 m (Bohrlochteufe 12 m) dargestellt. Die Erstmessung mit einem Frac und Refrac war im März 2001 und die Wiederholungsmessungen mit weiteren Refracs fanden im März 2002 sowie Oktober 2002 statt.

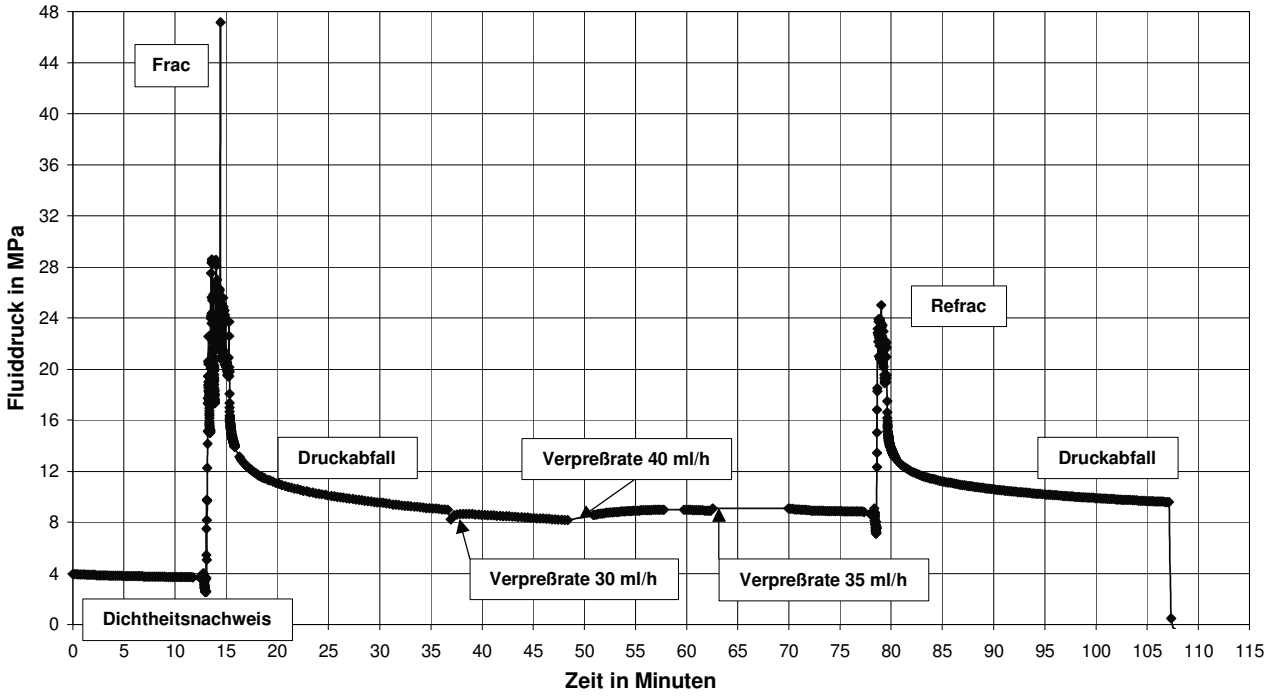


Abb. 8.21.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im März 2001

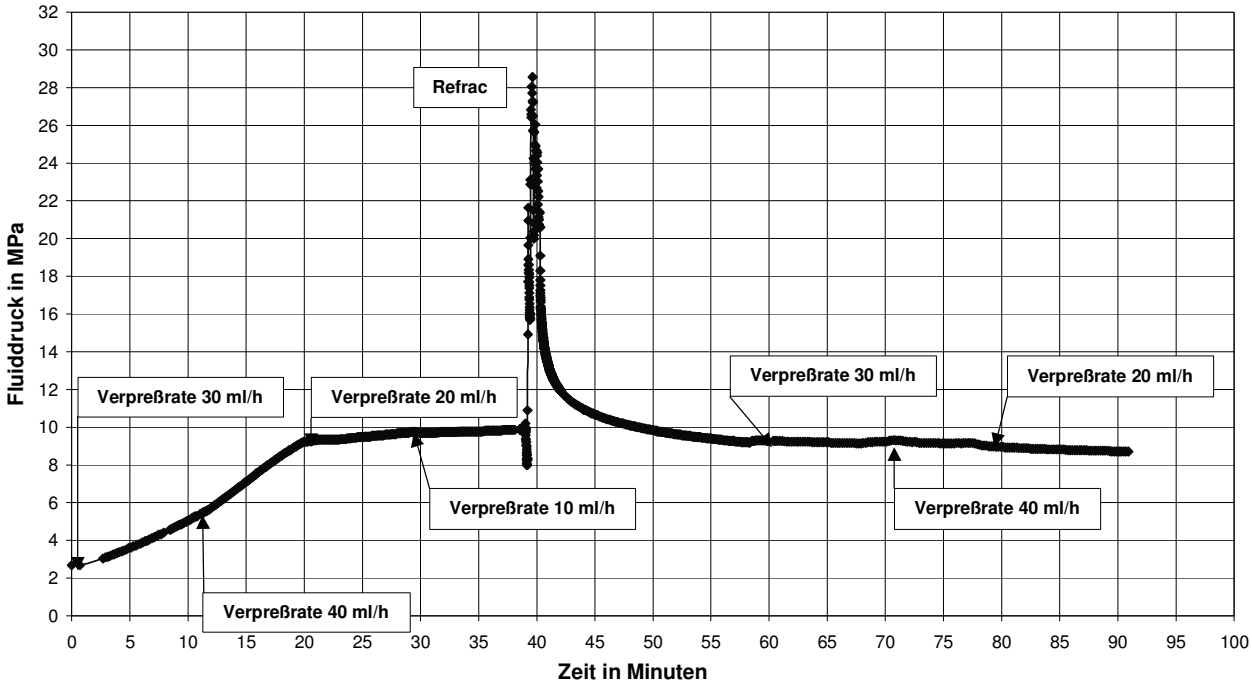


Abb. 8.21.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im März 2002

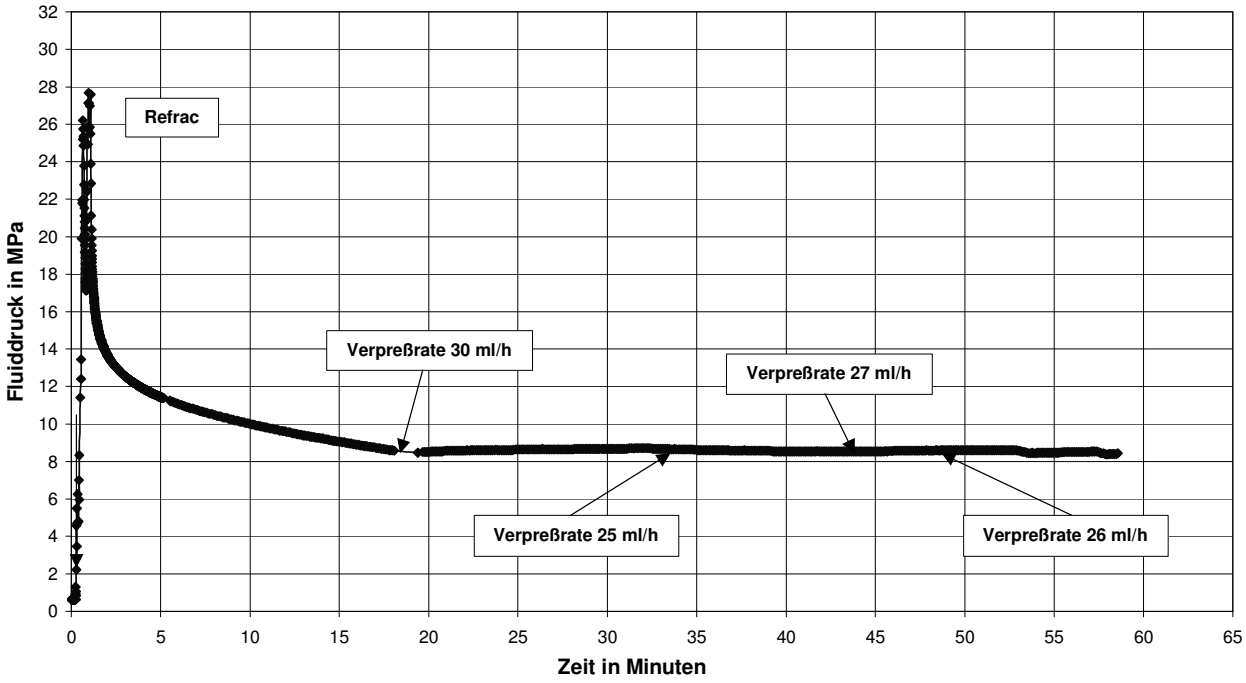


Abb. 8.21.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im Oktober 2002

Die Druckverläufe zeigen, dass es möglich ist, den nach dem Frac in der Shut-In-Phase stattfindenden Fluiddruckabfall infolge der weiteren Penetration mit einer geringen Nachverpressung zu kompensieren. Die Injektionsrate ist dabei sehr genau einzustellen. Es

wurde festgestellt, dass die Fluidrate die Abströmwiderstände im Rissgebiet wesentlich stärker beeinflusst als im Steinsalz. Im März 2001 wurde ein konstanter Abströmwiderstand von 9 MPa bei einer Verpressrate von 35 ml/h gefunden (Abb. 8.21.1). Eine Rate von 30 ml/h war zu niedrig und von 40 ml/h zu hoch zum Erreichen der Druckkonstanz.

Ein Jahr später führte am gleichen Messort im Bohrloch eine Rate von nur 10 ml/h noch zu einem kontinuierlichen Druckanstieg (Abb. 8.21.2). Es wurde geschlussfolgert, dass offensichtlich das Rissgebiet wieder zusammengedrückt wurde und durch einen Refrac aufgeweitet werden muss. Nach dem Refrac ließ sich tatsächlich wieder ein konstanter Abströmwiderstand von 9,2 MPa bei Raten zwischen 30 ml/h und 40 ml/h bestimmen. Nach einer längeren Standzeit zwischen den Wiederholungsmessungen ist es offensichtlich notwendig, zur Erzeugung vergleichbarer Bedingungen im Rissgebiet dieses mittels Refrac wieder zu öffnen.

Ein zweiter Wiederholungstest im Oktober 2002 ist in Abbildung 8.21.3 dargestellt. In Auswertung der vorangegangenen Versuche wurde diesmal von vornherein zunächst ein Refrac durchgeführt und danach mit unterschiedlichen Verpreßraten der konstante Abströmwiderstand gesucht. Dieser ließ sich sehr genau bei 8,6 MPa mit einer Rate von 26 ml/h einstellen. Die Versuchskurve zeigt noch einmal die sensitive Abhängigkeit des Verpressdruckes von der Verpressrate. Das ist auf den singulären und begrenzten Permeationsbereich im Anhydritriss zurückzuführen. Bei Vergleichsmessungen im Steinsalz umfasste der Permeationsbereich dagegen den gesamten Bohrlochbereich um das Druckintervall, was zu einer wesentlich geringeren Druckreaktion bei Veränderung der Verpressraten führte.

Ein Vergleich mit den Spannungswerten in den Steinsalzbohrungen zeigt, dass in diesem Untersuchungsabschnitt eines mittels Hydrofrac aufgerissenen Anhydrits der Abströmwiderstand genauso groß wie der Betrag der minimalen Hauptspannung ist. Eine Veränderung infolge der Gebirgsspannungsumlagerungen war nicht zu erkennen.

In der Bohrung F2 wurde in einer Stoßteufe von 3,7 m (Bohrlochteufe 9,5 m) eine geschlossene Anhydritkluft gefunden, dessen Fluiddruckbelastbarkeit in den Abbildungen 8.23.1 bis 8.23.4 dargestellt ist. Einen Eindruck von der Ausbildung einer solchen Kluft gibt die Abbildung 8.22 aus der Bohrlochteufe 5,7 m mit einer gleichartigen Kluft.

Abb. 8.22: Geschlossene Anhydritkluft im Bohrloch F2

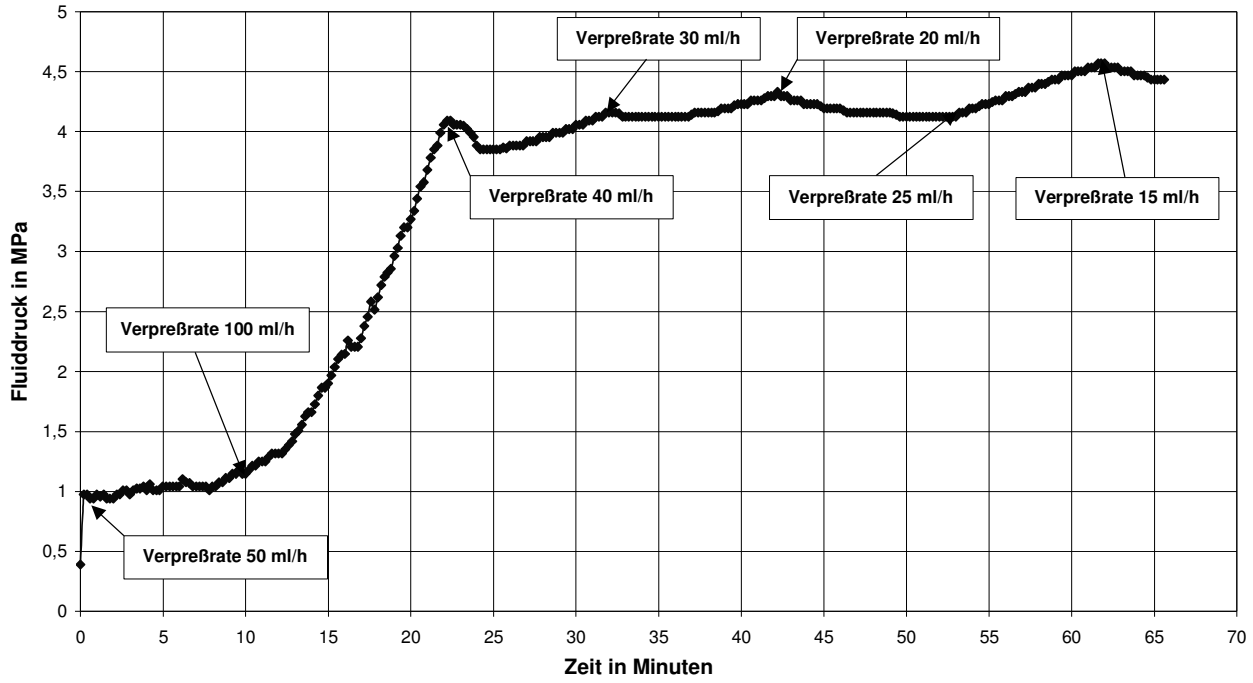


Abb. 8.23.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im März 2001

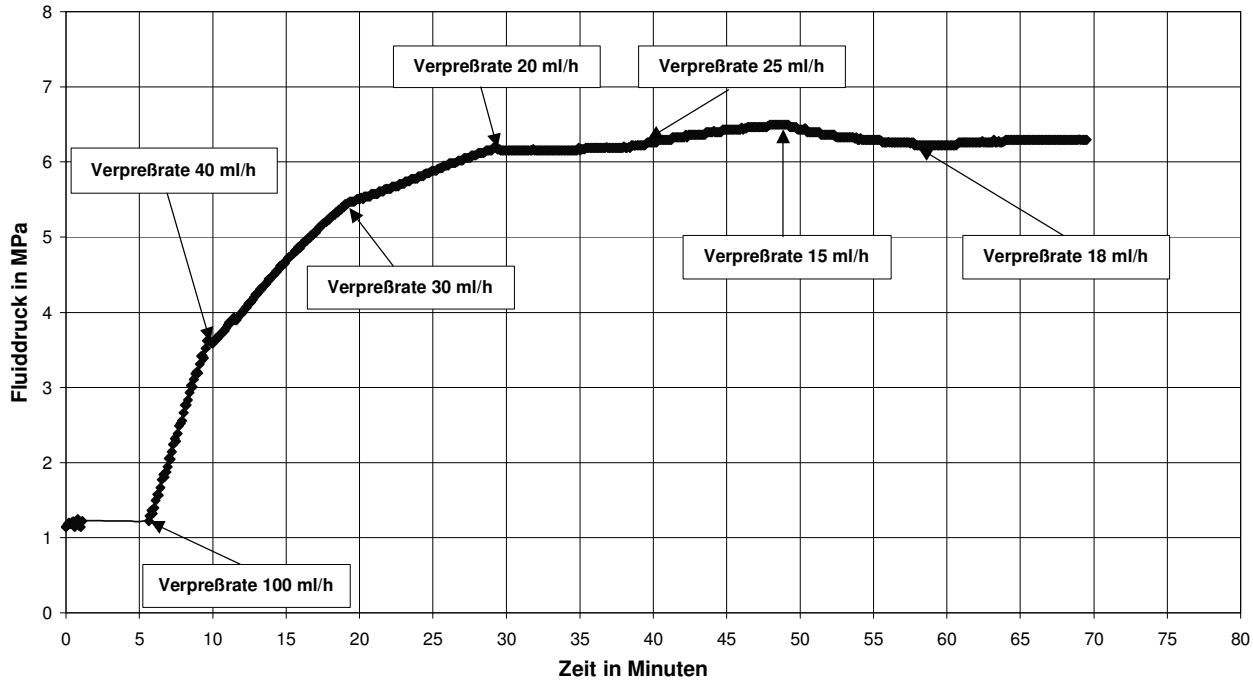


Abb. 8.23.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im März 2002

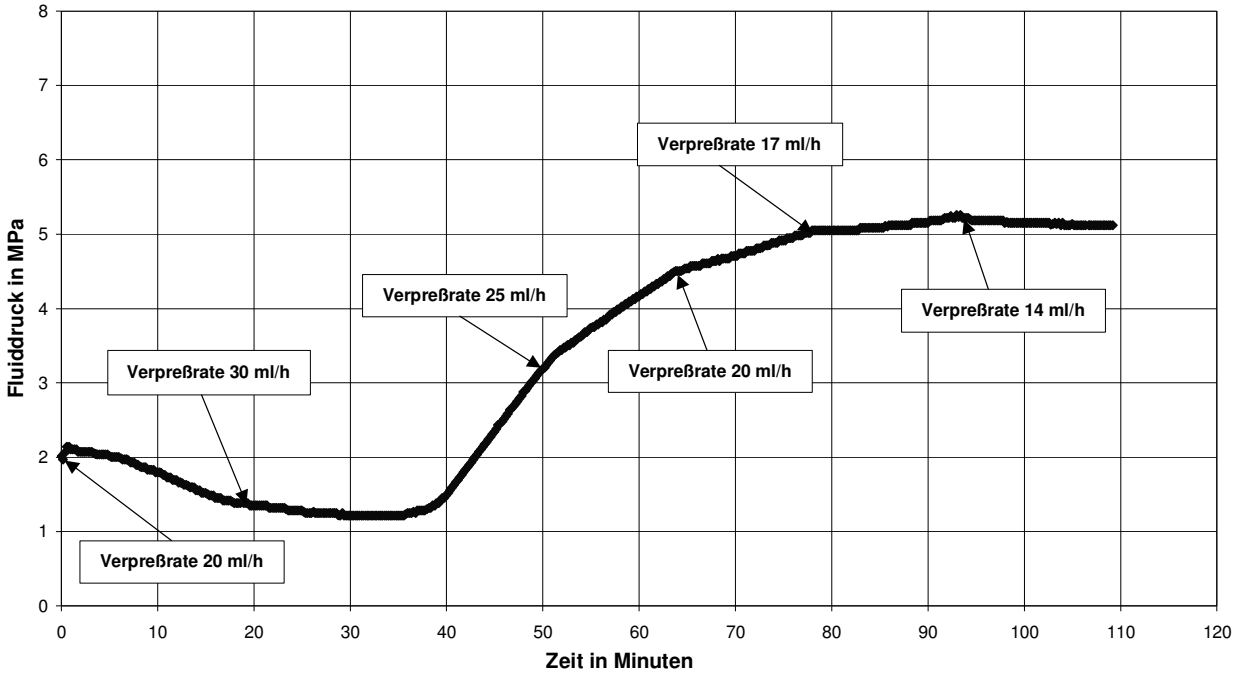


Abb. 8.23.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im Oktober 2002

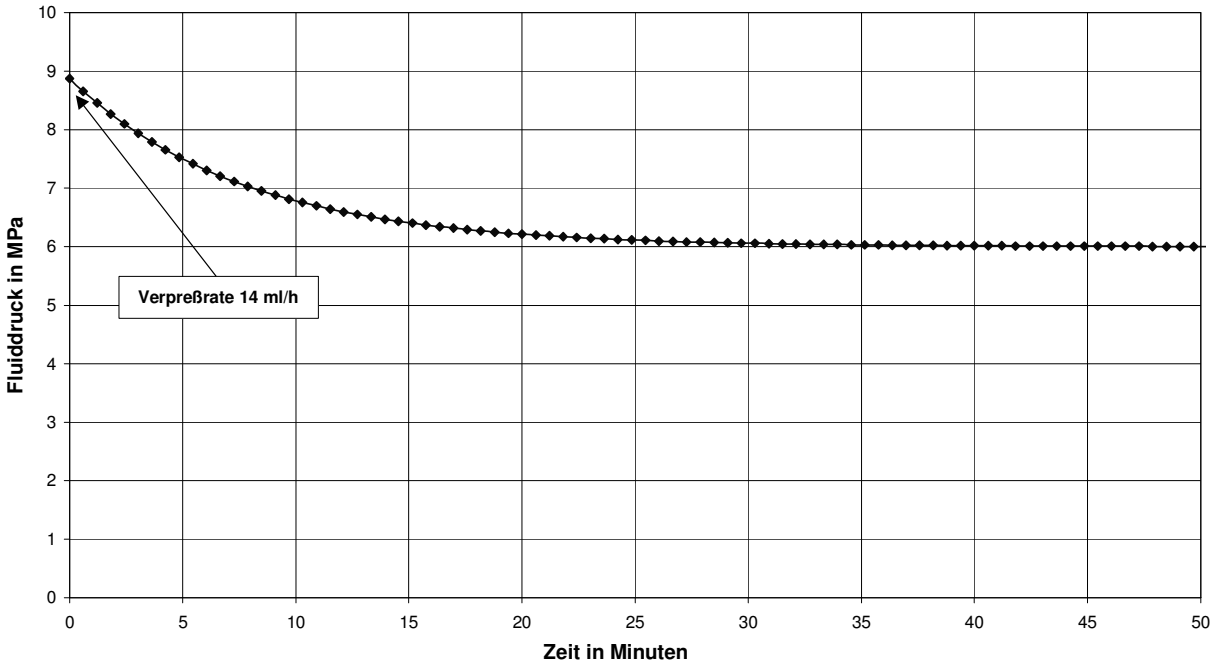


Abb. 8.23.4: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im Oktober 2002

Als Erstmessung konnte in diesem Bohrlochabschnitt kein Hydrofrac erzeugt werden. Der Bereich war von vornherein nicht völlig dicht und ohne aktive Verpressung war kein korrekter Dichtheitsnachweis möglich. Die Erstmessung in Abbildung 8.23.1 im März 2001 zeigt, dass danach mit eine Förderrate der Pumpe von 100 ml/h ein schneller Druckanstieg erreicht wurde. Bei einem Druckwert von etwa 4 MPa wurde die Verpressrate auf 40 ml/h verringert und schließlich mit den Raten 20 ml/h und 25 ml/h der Abströmwiderstand mit etwa 4,3 MPa eingegrenzt.

Die Wiederholungsmessung etwa 1 Jahr später im März 2002 (Abb. 8.23.2) begann aus Vergleichsgründen zunächst wieder mit einer Verpressrate von 100 ml/h und ab einem Druckwert von 3,6 MPa wurden die Raten auf 40, 30, 20, 25 und 15 ml/h (wie im Erstversuch) abgesenkt. Der nahezu konstante Abströmwiderstand ließ sich mit 6,2 MPa zwischen 15 und 18 ml/h eingrenzen. Diese Druckerhöhung war schwer mit der erst geringen Abbauannäherung in Übereinstimmung zu bringen. Es war nicht klar, welchen Einfluss auf den Druckwert die längere Verpressung mit einer Rate von 100 ml/h besitzt, d.h., es war nicht auszuschließen, dass mit dieser Verpressung der Druckwert bereits vorgegeben wurde.

Im Oktober 2002 wurde deshalb der Versuch sofort mit einer Rate von 20 ml/h begonnen und diese dann langsam gesteigert. In Abbildung 8.23.3 ist zu erkennen, dass der zunächst eintretende Druckabfall mit 30 ml/h in einen Anstieg übergeht und mit den Verpressraten von 17 und 14 ml/h wird schließlich ein geringerer Abströmwiderstand von 5,1 MPa eingegrenzt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kluft zunächst füllen muss, ehe es zu einem Druckaufbau kommt.

In einem vierten Versuchsschritt (Abb. 8.23.4), gleichfalls im Oktober 2002, wurde schließlich überprüft, ob sich das Druckniveau von etwa 5 MPa auch bei der Annäherung von „oben“ aus höheren Druckbereichen mit Verpressraten zwischen 14 und 17 ml/h finden lässt. In der Abbildung lässt sich nachweisen, dass sich mit einer langsamen Verpressung mit kontinuierlich 14 ml/h tatsächlich ein konstanter Abströmwiderstand von 5,9 MPa bestätigen lässt.

Die unterschiedlichen Beträge des Abströmwiderstandes zwischen 4,3 und 5,9 MPa lassen keine Abhängigkeit von der Abbauannäherung erkennen. Es blieb nach den Messungen in diesem Bohrlochabschnitt noch offen, ob die Kluftöffnungsweite bzw. -erstreckung und damit die Abströmwiderstände überhaupt signifikant von den Gebirgsspannungen beeinflusst werden. Eine Interpretation des Abströmwiderstandes als Gebirgsspannungswert, wie es im

sondierten Hydrofrac-Riss noch plausibel ist, erscheint in der geologischen Kluft als nicht gerechtfertigt.

Abb. 8.24: Mit Carnallit gefüllte Kluft im Bohrloch F2

Die letzte Versuchsserie fand gleichfalls im Bohrloch F2 in einer Stoßteufe von 2,7 m (Bohrlochteufe 7,1 m) statt. Entsprechend der Abbildung 8.24 ist dort eine mit Carnallit gefüllte Kluft aufgeschlossen.

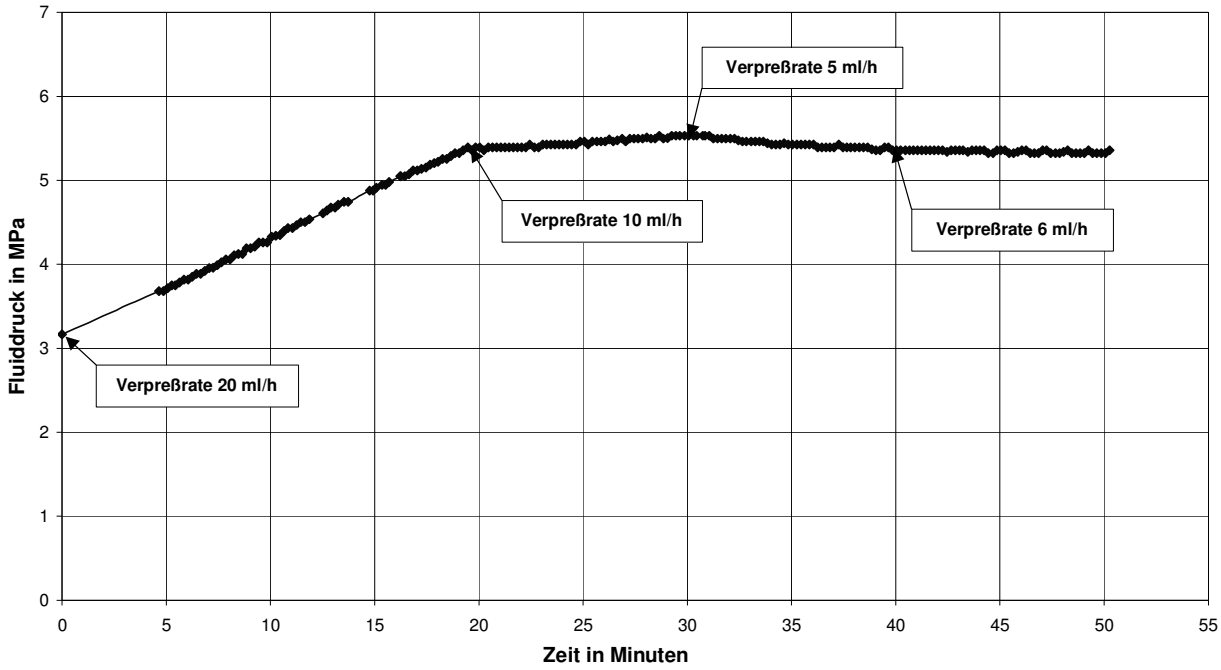


Abb. 8.25.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2001

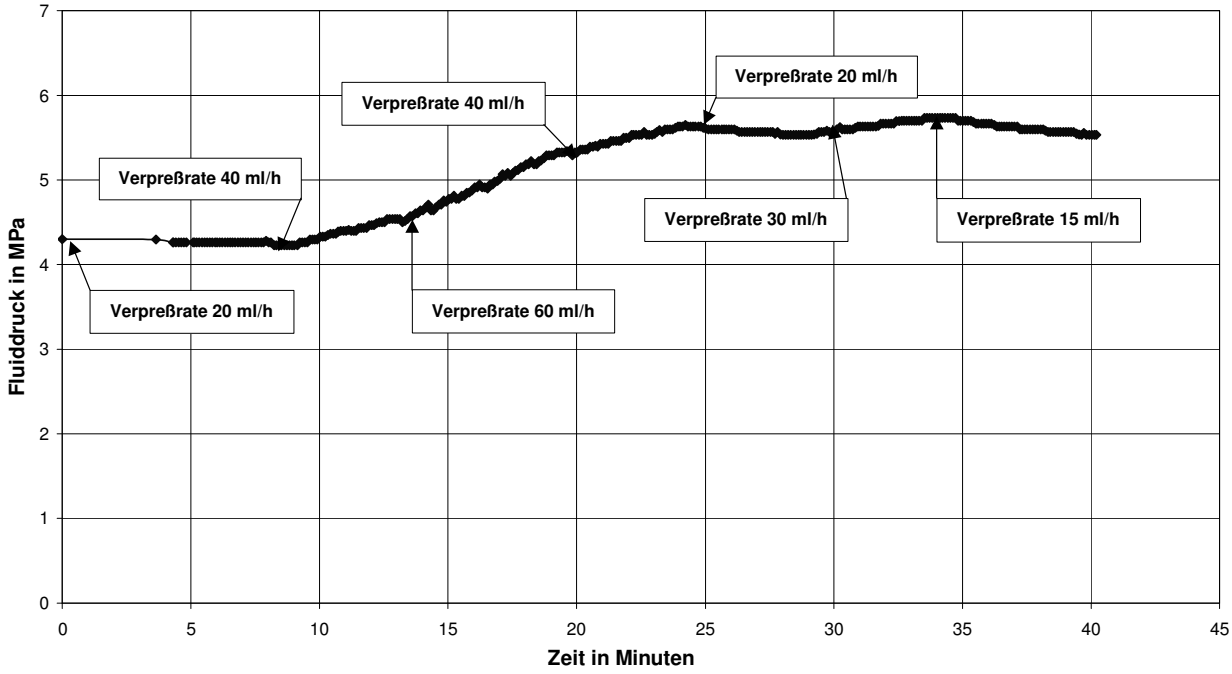


Abb. 8.25.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2002

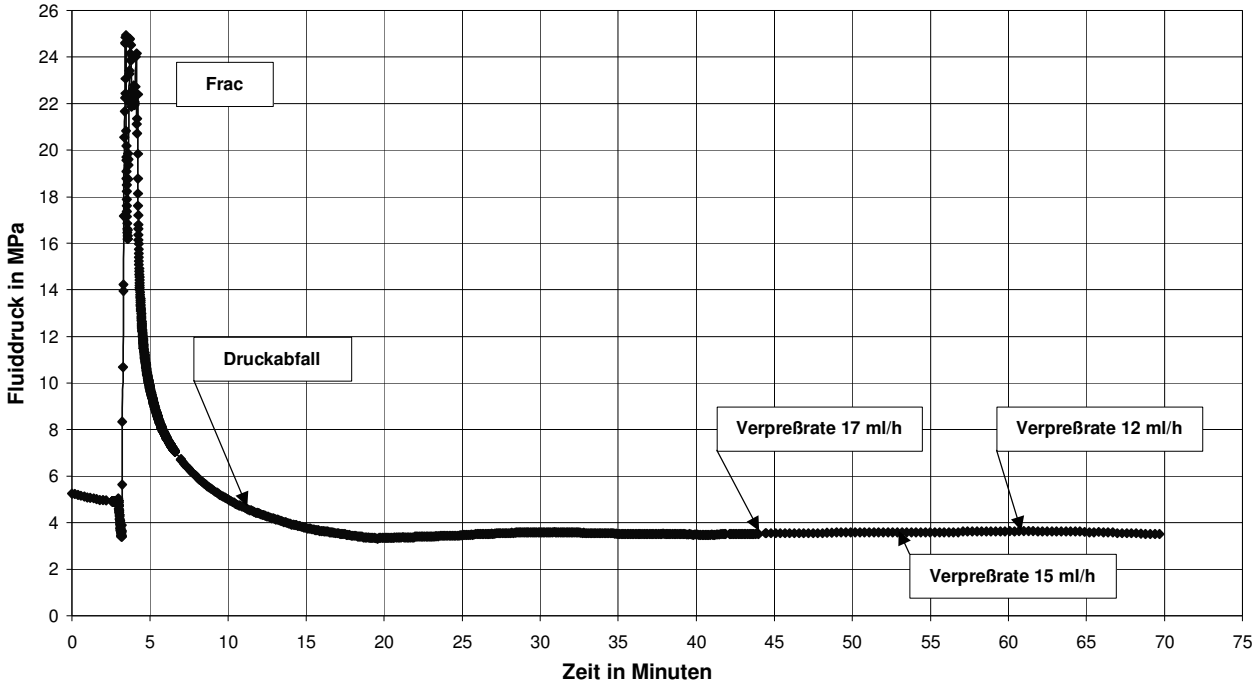


Abb. 8.25.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2002

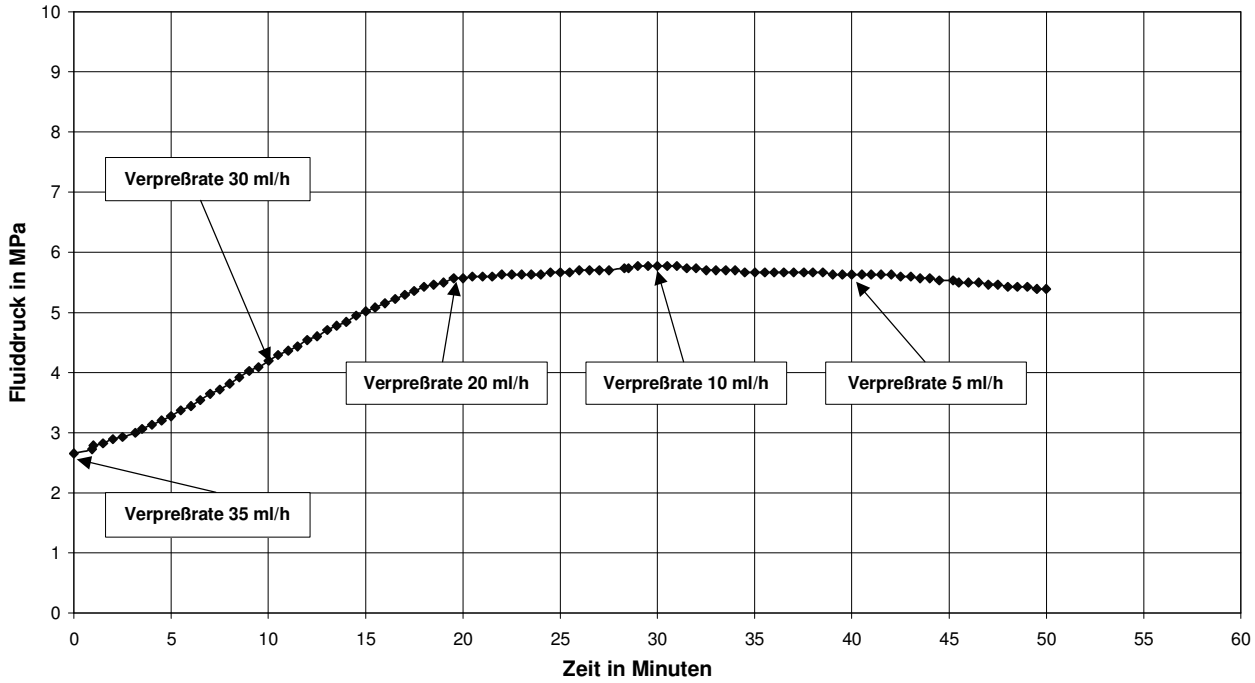


Abb. 8.25.4: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im September 2003

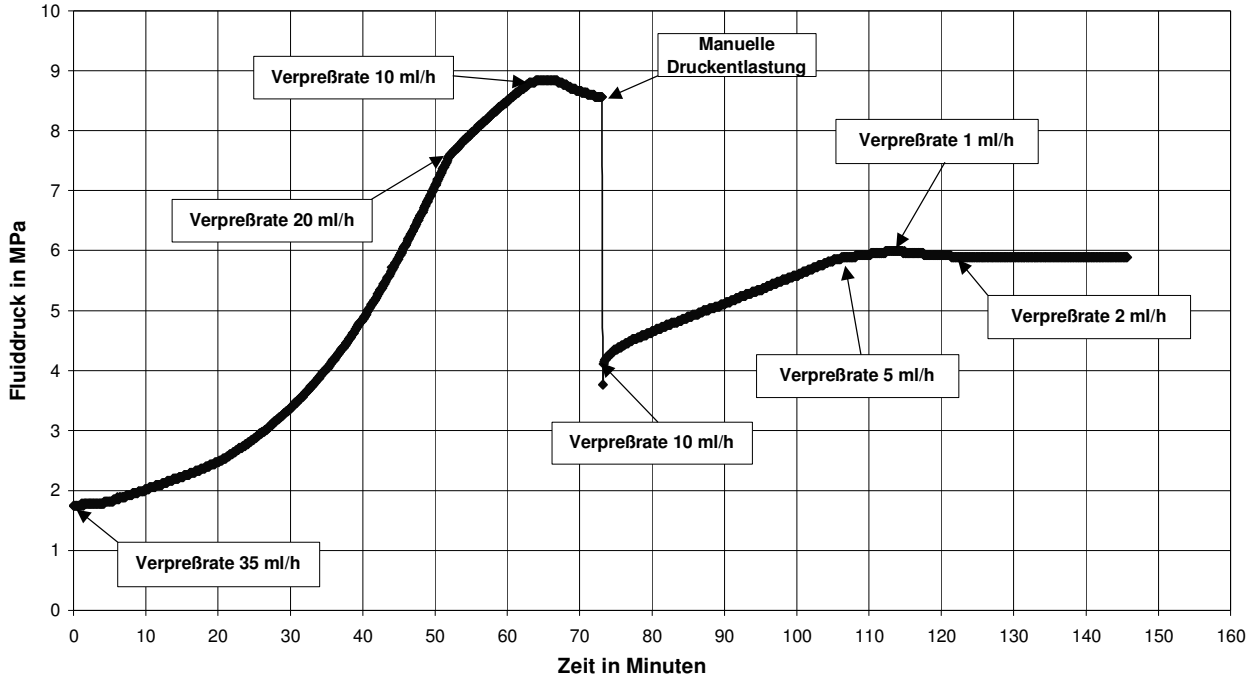


Abb. 8.25.5: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im September 2003

Die Erstmessung im März 2001 wurde mit einer vergleichsweise geringen Verpressrate von 6 ml/h ein Abströmwiderstand von 5,3 MPa ermittelt (Abb. 8.25.1). Dieser Wert konnte ein Jahr später im März 2002 mit 5,8 MPa bei einer Förderrate der Pumpe zwischen 20 ml/h und 30 ml/h nahezu bestätigt werden (Abb. 8.25.2). Die zur Initiierung des gleichen Abströmwiderstandes wesentlich höhere Verpressrate wies auf eine Öffnung der mit Carnallit gefüllten Kluft hin, was aber nicht gesichert war. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde am folgenden Versuchstag (Abb. 8.25.3) das Kluftgebiet zunächst gefract und danach wieder der konstante Abströmwiderstand gesucht. Jetzt stellte sich der Abströmwiderstand mit 3,6 MPa bei einer Rate von etwa 17 ml/h ein. Eine Kluftaufweitung führt demzufolge entweder bei gleichen Abströmwiderständen zu höheren Injektionsraten oder bei vergleichbaren Injektionsraten zu niedrigeren Abströmwiderständen.

Nach etwa 1,5 Jahren hatte sich die aufgeweitete Kluft wieder zusammengedrückt und in Abbildung 8.25.4 wird ein Abströmwiderstand von 5,7 MPa von den Injektionsraten 10 und 20 ml/h eingegrenzt.

Abschließend wurde noch einmal überprüft, ob in einem höheren Druckbereich nach einer längeren Verpressung auch ein anderes Wertepaar der Injektionsrate zum

Abströmwiderstand gefunden werden kann. In Abbildung 8.25.5 zeigt sich, dass dies der Fall ist. Eine Injektionsrate zwischen 10 und 20 ml/h führt zu einem Abströmwiderstand von 8,8 MPa und eine Injektionsrate von etwa 2 ml/h zu einem Abströmwiderstand von 5,9 MPa. Damit steht fest, dass die Abströmwiderstände zwar die Fluidströmung in den natürlichen rauen Klüften mit unterschiedlichen Öffnungsweiten, Kluftflächenanteilen und Mineralfüllungen repräsentieren, aber nicht die minimale Druckeinspannung. Lediglich die senkrecht zur Kluft wirkende Normalspannung wird ihre mittlere Öffnungsweite beeinflussen. Dieser Einfluss existiert aber nur neben den anderen genannten Einwirkungen und eine belastbar nachweisbare Änderung mit dem sich nähernden Gewinnungsbergbau konnte diesbezüglich auch nicht gefunden werden. Auf weitere Wiederholungsmessungen im Anhydrit im Verlauf des Abbaufortschritts wurde aus diesem Grund verzichtet.

8.3.4 Interpretation der Ergebnisse

Im vorstehenden Kapitel sollte untersucht werden, ob sich mit der Näherung der 35 m hohen und 20 m breiten Abbaukammern bis auf eine Minimalentfernung von 100 m zum Messort Änderungen des Gebirgsspannungszustandes zeigen bzw. inwieweit die hydraulischen Parameter in den untersuchten Anhydritbereichen beeinflusst werden. Die Bewertung des Steinsalzabbaus in der Grube Bernburg war dabei kein Gegenstand der Untersuchungen, sondern die Abbauannäherung sollte die Änderung des Spannungszustandes, dessen Einfluss auf die Barrierenintegrität bereits als wesentlich identifiziert wurde, bewirken. Die daraus resultierenden gebirgsmechanischen und hydraulischen Reaktionen wurden als deutlicher erwartet, als sie sich in einem Endlager im Salz ohne Gewinnungsbergbau einstellen werden.

Zur Untersuchung der Problematik wurde der von einer Steinsalzstrecke aufgeschlossene Hauptanhydrit hinsichtlich der Kluftausbildungen charakterisiert. Dafür standen die Kerne aus den Untersuchungsbohrungen zur Verfügung und wurden Bohrlochkamerabefahrungen durchgeführt. Die Entwicklung des Spannungszustandes und der hydraulischen Parameter wurde in einzelnen Messkampagnen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt verfolgt. In der Steinsalzstrecke erfolgten darüber hinaus im gesamten Projektzeitraum Konvergenzmessungen.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte mittels der Streckenkonvergenzmessungen ein eindeutiger Abbaueinfluss nachgewiesen werden. Die Raten stiegen von 0,03 bis 0,06 ‰ pro Jahr zu Beginn der Messungen auf Maximalwerte von 0,17 ‰ pro Jahr während der Gewinnung des Abbaus 2111 und erreichten nach dem Ende der Abbautätigkeit wieder das

Ausgangsniveau von 0,03 bis 0,06 ‰ pro Jahr. Mit den Konvergenzmessungen in der Zufahrtstrecke zum Anhydritmessort ist damit deutlich ein Einfluss erhöhter Gebirgsspannungen nachgewiesen, der mit zusätzlichen Modellrechnungen belegt wurde.

Die Identifizierung von σ_{min} über den Abströmwiderstand war nur beim Steinsalz und in einzelnen ungeklüfteten Anhydritbereichen (siehe Abbildung 8.21.1 bis 8.21.3) nach der Hydrofrac-Risserzeugung erfolgreich. Vor den Tests existierte eine primäre Dichtheit. Die nach der Einstellung des Druckgleichgewichtes zur minimalen Gebirgsspannung auftretenden Fluidpermeationen lassen sich mit einer geringen Nachverpressung kompensieren, wobei der Betrag dieses Druckwertes von der Verpressrate beim Steinsalz kaum und im Anhydrit signifikant beeinflusst wird. Dieser Unterschied wird beim Steinsalz auf den großen Permeationsbereich entlang des gesamten Druckintervalls im Vergleich zum begrenzten Permeationsbereich im zur Verfügung stehenden Rissinventar zurückgeführt. Mittels der Spannungssondierungen konnte keine Veränderung der minimalen Druckeinspannung nachgewiesen werden.

In den geogen angelegten natürlichen Anhydritklüften (geschlossen bzw. mit Carnallit gefüllt), in denen keine absolute Druckkonstanz während des Dichtheitsnachweises vorhanden war, repräsentiert der Abströmwiderstand nach der Durchströmung im stationären Zustand nicht die minimale Druckeinspannung, sondern aus dem Quotient von Verpressrate und Abströmwiderstand ist ein hydraulischer Kennwert ableitbar.

Mit der Beziehung 8.4 lässt sich gemäß Abbildung 8.26 näherungsweise für die kurzzeitigen stationären Phasen der Injektion abschätzen, dass der Permeation eine integrale Permeabilität in der Größenordnung von 10^{-18} m² zuzuordnen ist. Der Außendurchmesser der Permeationsfront wird dabei entsprechend der SE-Messwerte mit einem Mittelwert von 1,5 m festgelegt. Der tatsächlich gemessene Streubereich zwischen 1 und 3,5 m beeinflusst infolge des Logarithmus in Formel 8.4 die Permeabilitätsgrößenordnung nicht. In der Abbildung 8.26 ist weder ein signifikanter Permeabilitätsunterschied zwischen dem Hydrofracriss und den geschlossenen bzw. mit Carnallit gefüllten Klüften festzustellen, noch ist eine zeitliche Veränderung zu verzeichnen. Die Größenordnung entspricht sehr gut den instationären Resultaten nach HORNER in Abbildung 8.11.

$$K = \frac{Q \cdot \mu}{\Delta p \cdot 2 \cdot \pi \cdot H} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \qquad (8.4)$$

mit K = integrale Permeabilität in der injizierten Gesteinsschicht

Q = konstante Injektionsrate im stationären Zustand

μ = dynamische Viskosität des injizierten Hydrauliköls mit 4 mPa·s

Δp = Abströmwiderstand im stationären Zustand

H = Höhe des Prüfintervalls mit 0,5 m

r_a = äußerer Radius der Injektionsfront (im Mittel 1,5 m)

r_i = Bohrlochradius (0,05 m)

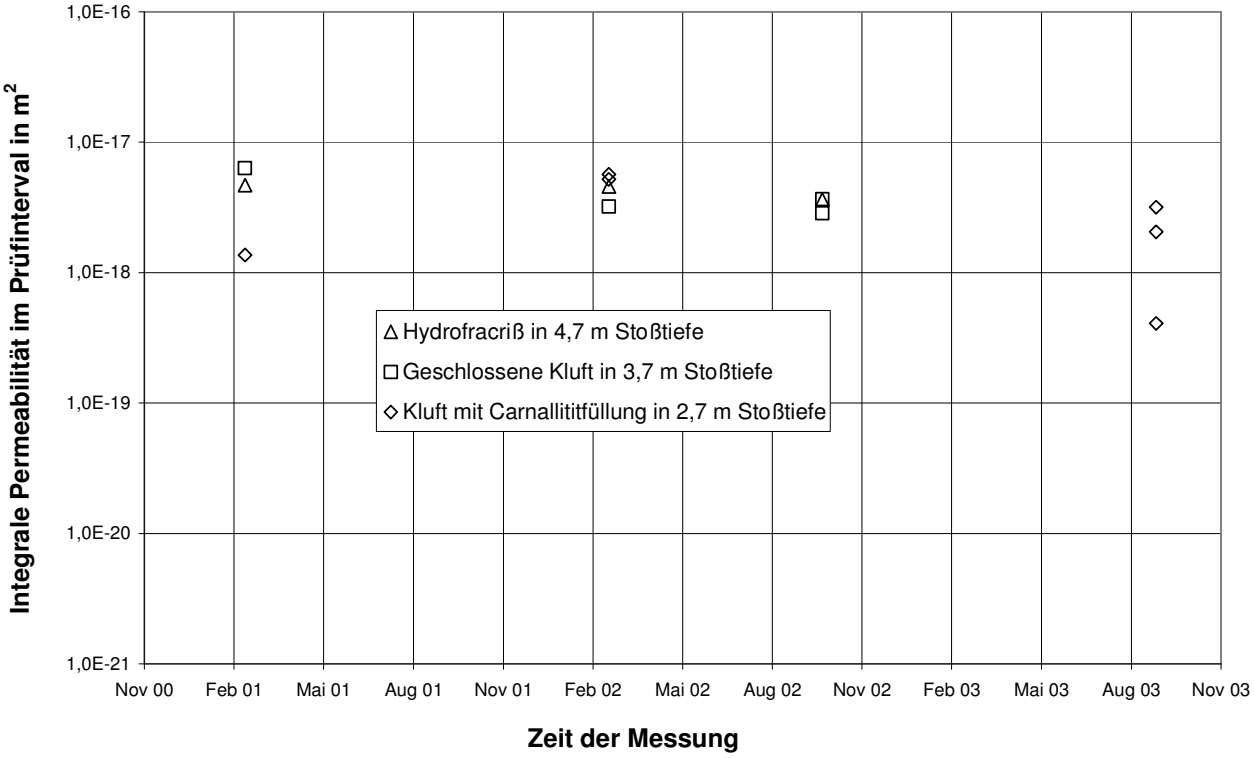


Abb. 8.26: Integrale Permeabilität im Anhydrit im Bohrlochintervall 0,5 m mit einem Hydrofracriss und mit einer geschlossenen bzw. mit Carnallit verheilten Kluft in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt

Die Annahme einer Permeation entlang des gesamten Prüfintervalls mit 0,5 m wurde aus Vergleichsgründen zur Abbildung 8.11 vorgenommen.

Ein Bezug des hydraulischen Flusses auf die Kluftöffnung bei radial symmetrischer Abströmung entsprechend der Auswertung der Würfelfracversuche (Formel 5.19 im Kapitel 5) würde zu Öffnungsweiten einer Einzelkluft von 1 bis 3 µm führen. Dieser Befund widerspricht, insbesondere für die carnallitgefüllte Kluft mit wesentlich größerer Öffnungsweite im Millimeterbereich, den Kern- und Bohrlochbefunden. Es besteht

offensichtlich ein gravierender Unterschied zwischen der ingenieurgeologisch feststellbaren und der hydraulisch tatsächlich aktiven Kluftöffnung. Im folgenden Kapitel wird dieser Sachverhalt analysiert.

Die (hier nicht detailliert dargestellten) Schallemissionsmessungen zeigten deutliche Unterschiede zwischen intakten und stark geklüfteten Anhydritpartien. Im intakten Anhydrit waren die Rissflächen beim Hydrofrac schärfer abgebildet, jedoch durch wesentlich weniger Ortungen belegt und mit geringerer Reichweite als im Steinsalz. Bei allen Versuchen mit eindeutigen Rissflächen entstand der Riss am Injektionsintervall und breitete sich um das Injektionsintervall herum aus. Diese Tatsache spricht für ein intaktes Gestein im Injektionsintervall vor der Risserzeugung und es ist in diesem Fall davon auszugehen, dass die Schallemissions-Ereignisse auf eine Bildung neuer Risse zurückzuführen waren. Andere Beobachtungen deuteten darauf hin, dass die Ereignisse nicht auf die Bildung neuer makroskopischer Risse im Anhydrit zurückzuführen waren, sondern eher auf ein Aufreißen von Materialbrücken in natürlichen Klüften. Diese Aussage beruht darauf, dass teilweise die eingepresste Flüssigkeit an einigen Stellen ohne SE-Aktivität abströmen konnte, d.h., dass die Klüfte teilweise schon durchgängig waren. Eine signifikante SE-Aktivität war nur bei den hohen Injektionsraten feststellbar, unter denen sich die Risse und Klüfte weiter ausdehnten. Bei den niedrigen Injektionsraten konnten nur wenige oder keine Schallemissionen festgestellt werden. Die SE-Ortungen lagen zumeist in Schwerpunkten weit außerhalb der Injektionsstelle. Diesen Schwerpunkten waren entsprechend der Kernbemusterung natürliche Klüfte zuzuordnen. Die Flüssigkeit musste demnach von der Injektionsstelle aus durch das undichte Gestein zu der Kluft penetriert sein und die in diesen Fällen beobachtete „wolkenartige“ Verteilung der Ortungen war auf Verästelungen der Klüfte zurückzuführen.

Zusammenfassend ist aus allen Untersuchungen (einschließlich der Ermittlung des 3D-Spannungstensors mittels Bohrlochschlitzen) die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die Annäherung der Abbaufront lediglich die Konvergenz im Steinsalz, nicht aber den Einspannungszustand und die hydraulisch relevante Kluftöffnung im anstehenden Anhydrit beeinflussen konnte. Vergleichbare Resultate einer geringen Sensitivität der hydraulisch signifikanten Kluftöffnung gegenüber dem wirkenden Spannungszustand wurden auch in ETH ZÜRICH (1992) und GUEGUEN, Y.; BOUTECA, M. (2004) gefunden. Für ein Endlager im Salzgestein bei wesentlich geringeren Abmessungen der Auffahrungen ist abzuleiten, dass keine signifikante Änderung der geogen vorhandenen Barrierenintegrität im Anhydrit zu besorgen und es deshalb ausreichend ist, diesen geogenen Zustand zu untersuchen. Das impliziert jedoch, über die Permeation der unmittelbaren Hohlraumkonturbereiche

hinauszugehen und der Durchlässigkeit von weit reichenden Klüften im Anhydrit verstärkte Aufmerksamkeit zu widmen.

8.4 Analyse der Gültigkeit des kubischen Fließgesetzes

Die Literatur bzgl. des kubischen Fließgesetzes (cubic law) ist sehr umfangreich. Es wurde untersucht, inwieweit die für planparallele Trennflächen bei einer Parallelströmung q_p:

$$q_p = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot a \cdot \frac{\Delta p}{L} \tag{8.5}$$

mit q_p = paralleler Volumenstrom
b = hydraulisch wirksame Öffnung
μ = dynamische Viskosität des Fluids
a = Länge der Trennfläche, entlang der ein Fluiddruck wirkt
Δp = Gradient des Fluiddruckabfalls über L vom Eintritt bis zum Austritt
L = Tiefe, über die eine Kluftströmung stattfindet

bzw. bei einer Radialströmung q_r:

$$q_r = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot 2\pi \cdot \frac{\Delta p}{\ln(\frac{r_a}{r_i})} \tag{8.6}$$

mit q_r = radialer Volumenstrom
b = hydraulisch wirksame Öffnung
μ = dynamische Viskosität des Fluids
Δp = Gradient des Fluiddruckabfalls vom Innen- bis zum Außenradius
r_i = Innenradius
r_a = Außenradius

geltenden Beziehungen auch auf natürliche Risse und Klüfte angewendet werden können. Dabei zeigte sich, dass in bestimmten Fällen bei makroskopisch ebenen Rissflächen und starker Durchtrennung, wie im Kapitel 5 in Auswertung der eigenen Laborversuche an gefracten Anhydritwürfeln festgestellt, die mittels des kubischen Fließgesetzes berechneten hydraulisch aktiven Rissöffnungsweiten gut mit den geometrischen Abmessungen

übereinstimmen. Eine Bestätigung für diese Übereinstimmung wurde z. B. in IWANO, M.; EINSTEIN, H. H. (1995) gefunden. Dort sind Durchströmungsversuche an zylindrischen Granodioritproben mit einem im Brasilianischen Zugversuch erzeugten Riss, einer natürlichen Kluft mit ebenen und gut anliegenden Oberflächen sowie einem Sägeschnitt beschrieben. Die vermessenen geometrischen Öffnungsweiten lagen im Mittel bei 627 µm (Zugriss), 262 µm (Kluft) und 101 µm (Sägeschnitt) und die mittels des kubischen Fließgesetzes im stationären Zustand berechneten hydraulisch aktiven Öffnungsweiten besaßen Mittelwerte von 495 µm (Zugriss), 239 µm (Kluft) und 78 µm (Sägeschnitt). Die aus den hydraulischen Parametern ermittelten Öffnungsweiten sind mit 84 ± 7 % systematisch niedriger als geometrisch ausgewiesen, die Größenordnung wird jedoch richtig wiedergegeben.
Wesentlich größere Abweichungen stellte jedoch GALE, J. E. (1987) an Granitproben mit natürlichen Klüften fest. Das Verteilungsmaximum der geometrischen Kluftöffnung lag bei etwa 1 mm und die hydraulisch aktive Kluftöffnung wurde mit 10 bis 20 µm bestimmt. Die Durchtrennung war mit einem Kluftflächenanteil von etwa 83 % nicht vollständig, was offensichtlich einen signifikanten Einfluss auf das hydraulische Verhalten besitzt.

Zur Erklärung dieser Abweichungen werden in der Literatur die Rauigkeit der Kluft- oder Rissflächen, der Kluftflächenanteil, die Tortuosität singulärer Fließkanäle in den Trennflächen oder die Bildung von strömungsbehindernden Gesteinsbruchstücken nach einer Scherung der Trennflächen (Mylonitisierung) genannt. Die beiden erstgenannten Einflüsse werden im Folgenden näher untersucht. Die Abströmung über gewundene singuläre Kanäle (channeling) wurde zwar im Labor bei den Würfelfracversuchen und mittels der SE-Messungen auch in situ beobachtet, ließ sich aber im vorliegenden Projekt für die Berücksichtigung in einem Fließgesetz nicht hinreichend erfassen. Für die Annahme einer Mylonitisierung besteht bei den nachgewiesenen geringen gebirgsmechanischen Beanspruchungen der Trennflächen kein Anlass.

Bei einer Berücksichtigung der Trennflächenrauigkeit zur Begründung geringerer Volumenströme als infolge der geometrischen Kluftöffnung zu erwarten, muss entsprechend der Literaturangaben (z.B. THÜRINGER, CH. (2002)) zunächst geprüft werden, ob in der Kluft eine turbulente oder laminare Strömung vorliegt. Die Berechnung der Reynoldszahl Re

$$\mathrm{Re} = \frac{\bar{v} \cdot 2b}{\nu}$$

$$\bar{v} = mittlere\ Strömungsgeschwindigkeit\ in\ \frac{m}{s} \qquad (8.7)$$

$$b = hydraulische\ Kluftöffnungsweite\ in\ m$$

$$\nu = kinematische\ Viskosität\ in\ \frac{m^2}{s}$$

führt bei der kinematischen Viskosität des verwendeten dünnflüssigen Hydrauliköls (Spindelöl) von $5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, der gemessenen Kluftöffnungsweite im Labor und in situ von < 10^{-2} mm und Strömungsgeschwindigkeiten von maximal $3 \cdot 10^{-3}$ m/s (maximal 100 ml/h bezogen auf eine Kluftöffnungsweite von etwa 10^{-5} m und eine Bezugsbreite von 1 m) zu einer Größenordnung im Promillebereich, so dass die Ausbildung lokaler turbulenter Strömungen nicht in Betracht gezogen werden muss. Bei Reynoldszahlen < 2300 wird die Strömung als laminar vorausgesetzt.

Wie in situ festgestellt, ist die relative Kluftrauigkeit (Verhältnis der Mikrorauigkeit der Kluftoberfläche zur hydraulischen Öffnungsweite) hoch und es muss weiterhin von einer nicht parallelen Strömung ausgegangen werden, so dass die sich aus dem kubischen Fließgesetz ergebende Kluftpermeabilität

$$K = \frac{b^2}{12}$$

$$b = hydraulische\ Kluftöffnung \qquad (8.8)$$

$$K = Kluftpermeabilität\ (Planparallele\ Platten)$$

$$relative\ Kluftrauigkeit \leq 0{,}032$$

abzumindern ist. Dazu kommen die Beziehungen nach Louis (8.9) und Lomize (8.10) zur Anwendung:

$$K = \frac{b^2}{12 \cdot \left[1 + 8{,}8 \cdot \left(\frac{mr}{2 \cdot b}\right)^{\frac{3}{2}}\right]}$$

$$(8.9)$$

$$mr = Mikrorauigkeit\ der\ Kluftoberfläche$$

$$b = hydraulische\ Kluftöffnung$$

$$K = Kluftpermeabilität\ nach\ Louis$$

$$0{,}032 < relative\ Kluftrauigkeit \leq 0{,}1$$

$$K = \frac{b^2}{12 \cdot \left[1 + 17 \cdot (\frac{mr}{2 \cdot b})^{\frac{3}{2}} \right]} \tag{8.10}$$

$mr = Mikrorauigkeit\ der\ Kluftoberfläche$
$b = hydraulische\ Kluftöffnung$
$K = Kluftpermeabilität\ nach\ Lomize$
$0{,}1 < relative\ Kluftrauigkeit \leq 1$

Die Beziehungen von Louis und Lomize wurden empirisch für stationäre Volumenströme an künstlichen Trennflächen mit verschiedenen Rauigkeiten aufgestellt und gelten für vollständige Zerlegungsgrade. Selbst bei einer Mikrorauigkeit der Kluftoberfläche in der Größenordnung der hydraulischen Kluftöffnung (relative Kluftrauigkeit = 1) würde sich bei Anwendung der Beziehung von Lomize nur eine Abminderung der Kluftpermeabilität glatter Trennflächen (planparalleles Modell) auf 14 % ergeben. Die Abminderung um etwa 2 Größenordnungen, wie in Auswertung der Versuche von GALE, J. E. (1987) notwendig wäre, lässt sich über die Kluftrauigkeit nicht begründen.

Unter diesem Gesichtspunkt gewinnt die Aussage in THÜRINGER, CH. (2002), dass sich bei einem Anteil der Materialbrücken, bezogen auf die Kluftfläche, von mehr als 30 % die Durchflussraten gegenüber dem kubischen Fließgesetz um 2 oder mehr Größenordungen verringern können, an Bedeutung. Im Einklang mit den eigenen Resultaten ist deshalb die Schlussfolgerung zu ziehen, dass aus der geometrischen Öffnungsweite von Klüften und Rissen im Anhydrit nur bei nahezu vollständiger Durchtrennung und geringer Rauigkeit die hydraulisch aktive Öffnungsweite bzw. die Kluftpermeabilität entsprechend des kubischen Fließgesetzes abgeleitet werden kann. Bei den In-situ-Messungen waren in allen Fällen, wie mit den Schallemissionsmessungen nachweisbar, noch zahlreiche Materialbrücken im Rissgebiet vorhanden, so dass die Kluftpermeabilität um Größenordnungen niedriger liegen kann. Wie auch in ETH ZÜRICH (1992) ausgeführt, ist deshalb das kubische Fließgesetz nicht allgemeingültig anwendbar. Die Messung der tatsächlichen Permeabilität in situ ist somit für eine Analyse der Barriereintegrität unverzichtbar und kann nicht durch ingenieurgeologische Kluftaufnahmen ersetzt werden. Diese sind aber notwendig für die Bestimmung der integralen Permeabilität für eine Anhydritschicht, das heißt, für die Übertragung der hydraulischen Parameter aus Einzelmessungen an den Klüften auf das Gestein auf Basis der Klufthäufigkeit (siehe Kapitel 5.2.2.3).

9. Entwicklung einer Messmethode und Auswertebeziehung zur Ermittlung der Porosität und Permeabilität aus Bohrlochmessungen in situ

9.1 Einleitung

Die Bewertung der geologischen Barrierenintegrität von weit reichenden Klüften im Anhydrit in Abhängigkeit von den hydraulisch-mechanischen Wechselwirkungen im Gebirge kann nur mit numerischen Modellrechnungen erfolgen. Bevor ein diesbezügliches, innerhalb des Vorhabens entwickeltes, Rechenprogramm dargelegt wird, soll in diesem Kapitel ein Auswerteverfahren zur Ermittlung der Porosität und Permeabilität als wichtigste Parameter für hydraulische Berechnungen vorgestellt werden. Mit dem Verfahren, welches gleichfalls im Projekt BARIAN (KAMLOT, P.; U. A. (2005)) entwickelt wurde, werden mittels einer Auswertung der instationären Druckabfallkurven nach einem Druckstoßtest unter Voraussetzung einer axialsymmetrischen Strömung der effektive Porenraum und die Permeabilität in der Permeationszone berechnet. Diese Parameter können in Abhängigkeit von der jeweiligen geologischen Ausbildung des Anhydrits am Untersuchungsort unterschiedlichen Abströmmächtigkeiten, die von der gesamten Höhe des Prüfintervalls über eine mineralisierte Kluft bis zu geschlossenen Klüften mit Öffnungsweiten in der Größenordung von µm reichen, zugeordnet werden. Die Mächtigkeit der Permeationsschicht lässt sich mit ingenieurgeologischen Methoden oder Schallemissionsmessungen festlegen.

Die Auswertemethode geht in der Belastbarkeit wesentlich über das im Kapitel 8.2 verwendete instationäre Verfahren nach HORNER hinaus, welches ursprünglich für die Ermittlung der Förderbedingungen in einer Flüssigkeitslagerstätte entwickelt wurde. Dabei ist die Kompressibilität des druckbeaufschlagten Systems unbekannt und wird als gering und druckunabhängig vorausgesetzt. Weitere Nachteile sind die unbekannte Porosität, dass sich nur in durchlässigen Partien die zeitlich begrenzten stationären Injektionsraten vor der Shut-In-Phase realisieren lassen und die Problematik, dass die Druckabfallkurven nur teilweise mit einer Logarithmusfunktion approximiert werden können (siehe Abbildung 8.10).

9.2 Messmethode und Auswertebeziehung

Für die Messungen kam die neu entwickelte Hydrofrac-Sonde für Bohrlochdurchmesser von 101 mm zur Anwendung. Die Sonde wurde zwar für hohe Drücke zum Aufreißen abgepackerter Bohrlochabschnitte konstruiert, lässt sich aber gleichfalls auch in niedrigen Druckbereichen einsetzen. Die Aufnehmerkränze für die Schallemissionsmessungen können, wenn keine Risslokalisierung stattfinden soll, demontiert werden. In

Voruntersuchungen in einem Stahlrohr wurde die Dichtheit der Sonde über Versuchszeiten bis zu mehreren Tagen nachgewiesen.
Die Permeabilitätsuntersuchungen wurden als Druckstoßtests durchgeführt. Dabei wird nach dem Dichtheitsnachweis im Bohrlochbereich der Fluiddruck schnell auf einen Wert unterhalb der minimalen Druckeinspannung erhöht und in der Shut-In-Phase der Druckabfall beobachtet. Als Mindestdauer wurde in der Regel der Zeitraum bis zur nächsten Arbeitsschicht am folgenden Tag eingehalten. In Einzelfällen betrug die Versuchsdauer auch mehrere Tage. Vor der stoßartigen Druckbeaufschlagung mit einem niedrigviskosen Hydrauliköl (Viskosität 4 mPa·s) wurde für die Packer eine Setzungszeit von etwa 1 Stunde eingehalten.
Die Auswertung basiert auf der Vorstellung, dass es im abgeschlossenen Druckintervall unter der Voraussetzung der technischen Dichtheit der Anlage bei gegebener Packerfunktion nur dann zu einem Druckabfall kommen kann, wenn sich das Fluid in den zugänglichen Poren (effektiver Porenraum) des druckbeaufschlagten Untersuchungsbereiches ausbreitet, also eine Permeation stattfindet. Zur Auswertung wird von der stationären axialsymmetrischen Strömung entlang des Prüfintervalls H gemäß Formel 8.4 ausgegangen:

$$Q = \frac{K}{\mu} \cdot 2\pi H \cdot \frac{\Delta p}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \tag{9.1}$$

mit Q = konstante Injektionsrate im stationären Zustand
K = integrale Permeabilität in der injizierten Gesteinsschicht
μ = dynamische Viskosität des injizierten Hydrauliköls mit 4 mPa·s
H = Höhe des Prüfintervalls mit 0,5 m
Δp = Abströmwiderstand im stationären Zustand
r_a = äußerer Radius der Injektionsfront, r_i = Bohrlochradius (0,05 m)

Es gelten die Randbedingungen $r = r_i \rightarrow p = p_i = \Delta p$ sowie $r = r_a \rightarrow p = 0$.

Die Gleichung 9.1, welche den axialsymmetrischen stationären Strom mit einer Volumenrate Q bei konstanter Druckdifferenz Δp zwischen r_i und r_a über H repräsentiert, wird im Folgenden für den instationären Druckabfall p(t) der Shut-In-Phase in Verbindung mit einer nachlassenden Injektionsrate Q(t) verwendet. Dabei gelten $r_a = r_i + r(t)$ und eine Permeation gleichfalls über H. Die Auflösung von Gleichung 9.1 nach dem Druck liefert

$$p(t) = \frac{Q(t)}{2\pi H} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \ln(1 + \frac{r(t)}{r_i}) \tag{9.2}$$

Die beim Druckabfall p(t) in den für das Fluid zugänglichen und zusammenhängenden Porenraum (ein Abströmen über die Packer wird nicht betrachtet) abströmende Fluidmenge V_ϕ füllt unter der Annahme einer vollständigen Sättigung zwischen r_i und r_a das Volumen

$$V_\phi = \pi \cdot (r_a^{\ 2} - r_i^2) \cdot H \cdot \phi \tag{9.3}$$

Die Gleichung 9.3 lässt sich umstellen nach

$$1 + \frac{r}{r_i} = \sqrt{1 + \frac{V_\phi}{\pi \cdot H \cdot \phi \cdot r_i^2}} \tag{9.4}$$

Die Parameter r und V_ϕ sind zeitabhängig und nach dem Einsetzen von 9.4 in 9.2 erhält man

$$p(t) = \frac{Q(t)}{2\pi H} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \ln(\sqrt{1 + \frac{V_\phi(t)}{\pi \cdot H \cdot \phi \cdot r_i^2}}) \tag{9.5}$$

Mit dem Druckabfall p(t) kommt es zu einem zeitabhängigen Volumenstrom Q(t) in den Porenraum $V_\phi(t)$. Das in die Poren strömende Fluidvolumen $V_\phi(t)$ entspricht dem Volumenverlust V (t) im Druckraum und der Volumenstrom Q(t) der Ableitung $\dot{V}(t)$. Es gelten

$$V_\phi(t) = V(t) = (p_0 - p(t)) \frac{V_0}{K_S} \tag{9.6}$$

$$Q(t) = \dot{V}(t) = -\dot{p}(t) \frac{V_0}{K_S} \tag{9.7}$$

Das Ausgangsvolumen V_0 im Druckraum zu Beginn der Shut-In-Phase mit p_0 umfasst auch das Hydrauliköl in den Druckleitungen und wird in Abhängigkeit von der Leitungslänge berücksichtigt. Die Systemsteifigkeit K_S entspricht dem Kehrwert der Systemkompressibilität und wird mit vorauslaufenden Druckbeaufschlagungen des abgepackerten Bohrlochintervalls mit einer hochgenauen Dosierpumpe (Abbildung 7.18) ermittelt. Diese messtechnische Bestimmung der Systemsteifigkeit aus der Messung des Druckanstiegs mit konstanter Injektionsrate im Druckbereich der Permeabilitätsmessung unterhalb der minimalen

Druckeinspannung erhöht die Zuverlässigkeit der Auswertemethode. Üblicherweise wird bei Permeabilitätsmessungen eine vom Equipment und Gestein abhängige Systemkompressibilität ohne Anpassung am konkreten Messort vorausgesetzt.

Durch Einsetzen von 9.6 und 9.7 in 9.5 (das negative Vorzeichen in 9.7 fällt weg, da der Druckabfall aus einem zunehmenden Volumenstrom in den Porenraum über H resultiert, der einem gleichwertigen abnehmenden Volumenstrom aus dem Druckintervall entspricht) und Umstellung nach $\dot{p}(t)$ erhält man die Modellfunktion

$$\dot{p}_{Modell}(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot H \cdot K_S}{V_0} \cdot \frac{K}{\mu} \cdot \frac{p(t)}{\ln\left[1 + (p_0 - p(t)) \cdot \frac{V_0}{\phi \cdot \pi \cdot H \cdot K_S \cdot r_i^2}\right]} \tag{9.8}$$

Die Ermittlung der Permeabilität K und Porosität ϕ erfolgt mittels numerischer Kurvenanpassungen (z.B. mit Table Curve) in folgenden Schritten:

- Suche einer (möglichst einfachen und differenzierbaren) Fitfunktion $p_{Fit}(t)$ für den gemessenen instationären Druckabfall p(t) mit einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 95 %
- Berechnung der Ableitung $\dot{p}_{Fit}(t)$
- Ersetzen von p(t) in der Modellfunktion durch $p_{Fit}(t)$
- Festlegung eines Suchintervalls für p_0 mit einer Abweichung von ± 20 % des gemessenen Startwertes der Duckabfallkurve. Die Freigabe von p_0 ist für die Kurvenanpassung der Modellfunktion notwendig, um einen möglichst guten Fit für die Gesamtkurve zu erhalten.
- Suche der Parameter K und ϕ mittels Anpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ an $\dot{p}_{Fit}(t)$ bis zu einem Korrelationskoeffizienten von mindestens 90 % in mehreren Durchläufen. Dabei muss ein funktionaler Zusammenhang K = f(ϕ) erfüllt sein, der aus Literaturrecherchen oder eigenen Untersuchungen abgeleitet wird. Soweit vorliegend, z. B. für Steinsalz aus POPP, T. (2002), wird K = f(ϕ) einer minimalen Druckeinspannung σ_{min} zugeordnet.

Für den Versuch müssen folgende Voraussetzungen gelten:

- Konstante Permeabilität K und Porosität ϕ während der Messung.

- Die Steifigkeit des druckbeaufschlagten Systems (Fluid, penetrierter Konturbereich und Equipment einschließlich aller Leitungen und der Packer) K_S kann mittels $\Delta p/\Delta V$-Schleifen im Druckbereich der Permeabilitätsmessung mit einer Dosierpumpe ermittelt werden.
- Das Drucksystem ist nach außen geschlossen.

Bei einer Abströmmächtigkeit, die geringer als die Höhe H des Prüfintervalls ist (z.B. Kluft), lassen sich die hydraulischen Parameter neu berechnen und werden sich entsprechend erhöhen. Die Konsequenzen werden im folgenden Kapitel an einem Beispiel exemplarisch diskutiert. Daraus ergibt sich jedoch ein ausschließlicher Bezug auf die Abströmhöhe in der Kluft, die hydraulischen Parameter sind nicht als integrale Werte für eine Gesteinsschicht zu verwenden.
Generell sollten bei der Angabe von Permeabilitäten die zugrundeliegenden Modellvorstellungen (räumliche oder ebene axialsymmetrische Fluidausbreitung) sowie die effektive Porosität mit angegeben werden.

9.3 Ermittlung hydraulischer Kennwerte im Anhydrit

Die Permeabilitätsmessungen im Anhydrit wurden am Messort „Liegendzufahrt Kippstelle 9b“ (Abbildung 8.12) gemäß der oben beschriebenen Methode mit dünnflüssigem Hydrauliköl mit einer dynamischen Viskosität von $4 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, vergleichbar zur Viskosität der oftmals im Salinar eingeschlossenen natürlichen gesättigten Salzlösungen, durchgeführt. Als Systemsteifigkeit (Kehrwert der Systemkompressibilität, Erläuterung siehe oben) konnte ein Wert von 1,7 GPa bestimmt werden. Ein ursprünglicher Laugengehalt in der Gesteinsmatrix vor den Versuchen wurde, wie auch im Steinsalz, ausgeschlossen.

In den Abbildungen 9.1 und 9.2 ist der Druckverlauf in der Bohrung F2 in einer Stoßteufe von 2,7 m (Bohrlochteufe 6,9 m) dargestellt. Die carnallitgefüllte Kluft ist in Abbildung 8.24 zu erkennen. Es stand nicht fest, ob die Permeation entlang des gesamten Druckintervalls oder nur in der Kluft eintritt. Bei der Kurvenanpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ an die Funktion $\dot{p}_{Fit}(t)$ wurde deshalb neben der Höhe des Abströmintervalls von 0,5 m in einem zweiten Auswerteschritt auch eine Höhe von 1 mm festgelegt. In den Abbildungen sind die Ergebnisse der beiden Parameteridentifikationen zu sehen.

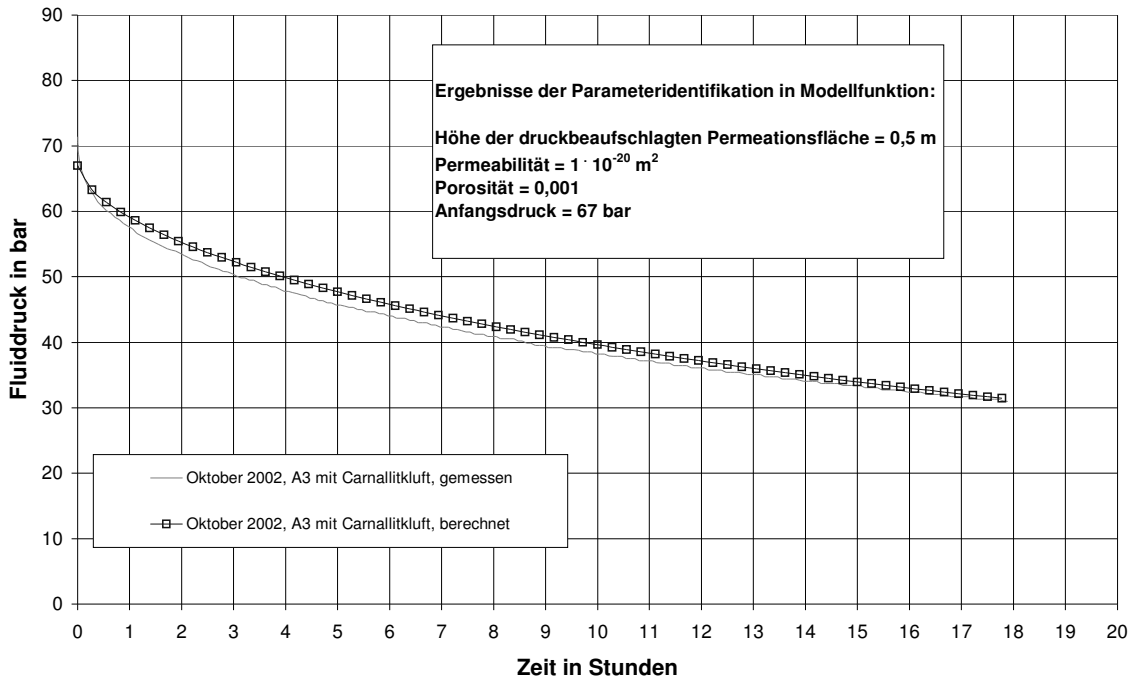


Abb. 9.1: Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 0,5 m

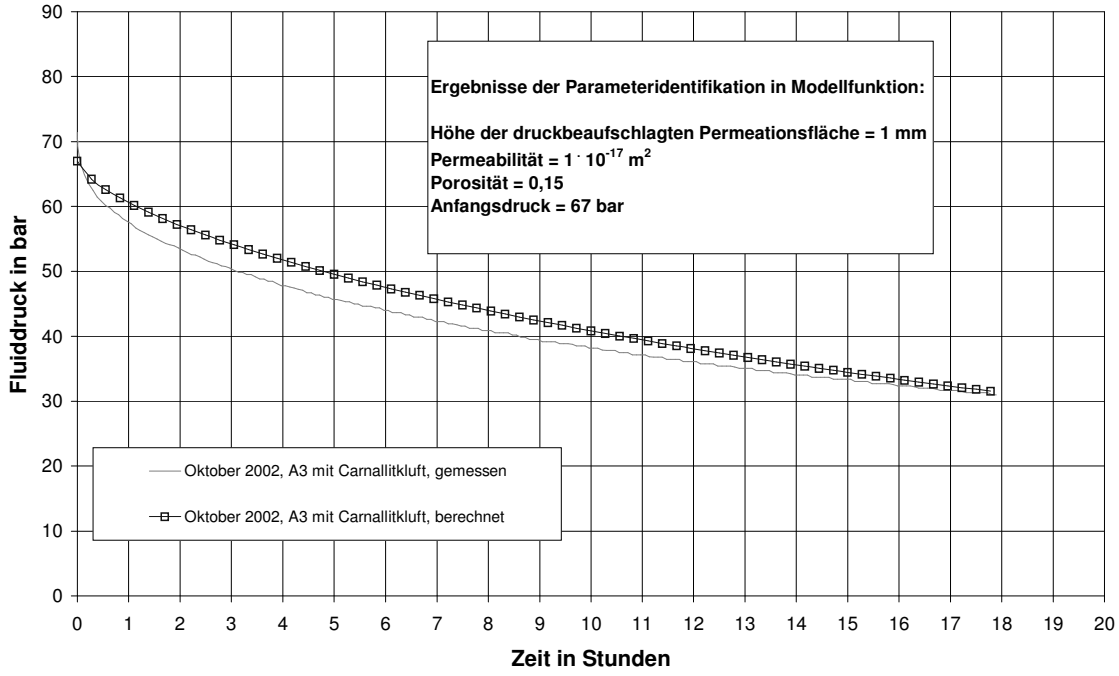


Abb. 9.2: Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 1 mm

Die Kurvenanpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ an die Funktion $\dot{p}_{Fit}(t)$ unter der Annahme, dass das Fluid entlang der gesamten Höhe des Druckintervalls von 0,5 m in den Anhydrit penetrieren kann, liefert eine Permeabilität von $1 \cdot 10^{-20}$ m² bei einer effektiven

Porosität von 1 ‰. Die Vorgabe der Permeation nur über die carnallitgefüllte Einzelkluft mit einer Stärke von 1 mm ergibt eine Permeabilität von $1 \cdot 10^{-17}$ m² bei einer effektiven Porosität von 15 %. In den Abbildungen 9.1 und 9.2 ist in beiden Fällen die gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen Druckabfallkurve p (t) und der mittels numerischer Integration aus (9.8) abgeleiteten Funktion p_{Modell} (t) dargestellt.

Die beiden Auswertungen zeigen die Bedeutung der Höhe des Permeationsintervalls. Diese ist zunächst nicht bekannt und muss mit weiteren Untersuchungen (Kluftkartierung, Schallemissionsanalyse) belegt werden. Die Mess- und Auswertemethode ermöglicht es, für hydraulische Ausbreitungsrechnungen in einem Endlager sowohl integrale Parameter für die einzelnen Gesteinsschichten zu bestimmen und eine Darcy-Strömung zu berechnen, als auch die Permeation vorwiegend auf weit reichende diskrete Klüfte zu beziehen. Die Entwicklung entsprechender Rechenmodelle und der Nachweis der Übereinstimmung mit Labor- und In-situ-Befunden wird im folgenden Kapitel dargelegt.

10. Modellierung der Fluidströmung im Porenraum der Gesteinsmatrix und in Klüften

10.1 Einleitung

Die Zielstellung in diesem Kapitel besteht darin, mit hydraulisch-mechanisch gekoppelten Modellrechnungen die im Laborversuch an den Gesteinswürfeln und in situ untersuchten stationären und instationären Permeationsprozesse zu simulieren und die physikalischen Wechselwirkungen besser zu verstehen. Dieses Verständnis ist wesentlich für eine Bewertung und Prognose derartiger Prozesse in einem Endlager.
In einem ersten Schritt wird geprüft, ob sich die mit dem neu entwickelten Auswerteprogramm aus instationären Druckabfallkurven nach einem Druckstoßtest bestimmten Porositäten und Permeabilitäten mit Modellrechnungen bestätigen lassen. In einem zweiten Schritt wird ein gleichfalls neu entwickeltes Rechenprogramm zur Modellierung von Kluftströmungen getestet. Dazu werden unterschiedliche Fluidrandbedingungen (konstanter Innendruck bzw. konstante Injektionsrate) in gefracten Anhydritwürfeln vorgegeben und dabei die Abhängigkeiten von der Normalspannung quer zur Rissfläche untersucht. In einem dritten Schritt wird das Rechenprogramm auf eine Untertagesituation angewendet und überprüft, ob als Basis für eine Analyse weit reichender Fluidströmungen die in einer Anhydritkluft realisierte Fluidpermeation in größeren Stoßteufen nachvollzogen werden kann.

10.2 Überprüfung des Modells einer instationären Permeation in einem Bohrloch in situ entlang des gesamten Druckintervalls

Im Kapitel 9.2 wurde eine Methode vorgestellt, bei der aus dem Druckabfall in der Shut-In-Phase nach einem Druckstoßtest unter Verwendung einer Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ die Permeabilität K und die Porosität ϕ ermittelt werden können. Die Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ gilt für den instationären Fluss in den zusammenhängenden Porenraum um ein Bohrloch, wobei eine konstante Permeabilität und Porosität während der Messung und ein nach außen abgeschlossenes Drucksystem vorausgesetzt werden. Die Steifigkeit des druckbeaufschlagten Systems K_S (Fluid, penetrierter Konturbereich und Equipment einschließlich aller Leitungen und der Packer) konnte mittels $\Delta p/\Delta V$-Schleifen im Druckbereich der Permeabilitätsmessung mit einem Betrag von 1,7 GPa ermittelt werden. Die Viskosität des verwendeten dünnflüssigen Öls (vergleichbar einer hochkonzentrierten Salzlösung) betrug 4 mPa·s. Bei der Methode wird vorausgesetzt, dass die Druckdifferenz Δp aus p(t) entsprechend der Systemsteifigkeit K_S einem Fluidvolumen ΔV aus $V_\phi(t)$

entspricht, welches in den zusammenhängenden Porenraum entlang des Druckintervalls abströmen kann.

Zur grundsätzlichen Überprüfung dieses Prozesses und der Auswertemethode wurde (zunächst im Steinsalz) in dem in Abbildung 10.1 dargestellten mechanisch/hydraulisch gekoppelten Rechenmodell eines druckbeaufschlagten Bohrloches mit dem Programm FLAC, Version 3.4 (ITASCA (1998)) der gefittete Druckverlauf p_{Fit} (t) an der Kontur des Druckintervalls als Randbedingung vorgegeben und das in der Versuchszeit eintretende Flüssigkeitsvolumen berechnet. Das axialsymmetrische Rechenmodell besitzt einen Radius von 0,2 m und eine Höhe von 1 m. Die Bohrlochkontur musste sehr fein mit einer Elementbreite von 0,2 mm vernetzt werden. Der Bohrlochradius beträgt 50,5 mm und die Druckintervallhöhe 0,5 m.

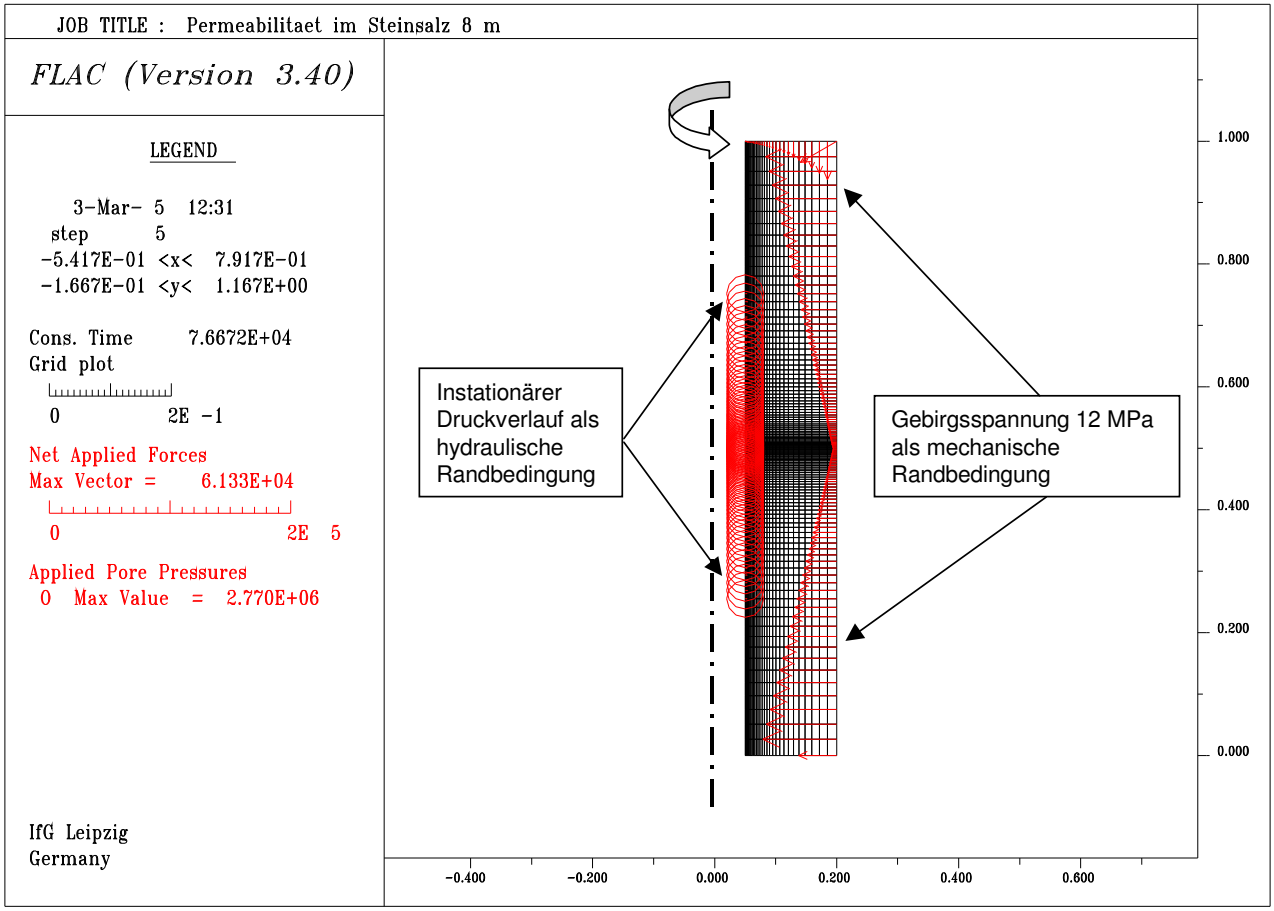


Abb. 10.1: Rechenmodell eines druckbeaufschlagten Bohrloches Ø 101 mm

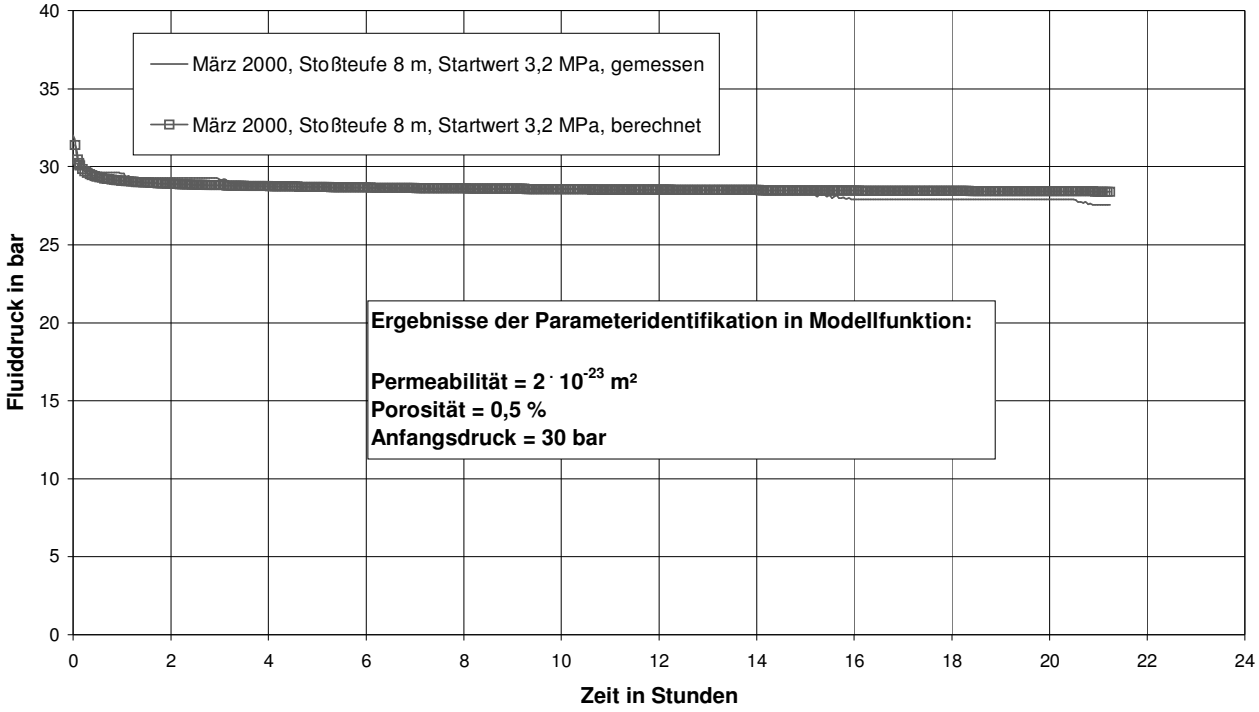


Abb. 10.2: Vergleich der Modellfunktion mit der gemessenen Druckabfallkurve im Steinsalz im März 2000 (Stoßteufe 8 m)

Die Stoffeigenschaften des Steinsalzes wurden mit einem Kompressionsmodul von 17 GPa, einem Schermodul von 10 GPa und einer Dichte von 2.200 kg/m³ festgelegt. Der mittlere Gebirgsspannungszustand betrug 12 MPa. Das Modell bestand aus 3.600 Elementen.

Mit dem Rechenmodell wurde der Druckverlauf eines Versuches im Bohrloch F7 vom März 2000 in einer Stoßteufe von 8 m nachvollzogen. Entsprechend Abbildung 10.2 führt die Anpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ zu einer Permeabilität von $2 \cdot 10^{-23}$ m² bei einer Porosität von 5 ‰.

In Auswertung der Fitfunktion (10.1) fiel der Bohrlochinnendruck in 76.450 s um 2,39 bar. Der Korrelationskoeffizient berechnete sich mit 1,0.

$$p_{Fit}(t) = a - b \cdot \sqrt{\frac{t}{t^*}}$$

$$a = 30{,}09 \text{ bar} \qquad (10.1)$$
$$b = 8{,}65 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$$
$$t^* = 1 \text{ s}$$
$$t \text{ in s}$$

Der Kompressionsmodul des Fluids betrug 2 GPa und die Dichte 1.300 kg/m³. Die Ausgangsporosität wurde mit 5 ‰ bei einer Sättigung des Porenraumes von Null vorgegeben. Mit (10.2) lässt sich aus dem Druckabfall Δp von 0,239 MPa ein in die Matrix penetrierendes Volumen ΔV mit 0,46 cm^3 berechnen.

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{K_S} \cdot V_0$$

$$\Delta p = 0{,}239 \text{ MPa} \qquad (10.2)$$
$$K_S = 1700 \text{ MPa}$$
$$V_0 = 3250 \text{ cm}^3$$

Dieses Flüssigkeitsvolumen ist so gering, dass eine Permeation nur in Bohrlochkonturteufen von einigen Millimetern und keine Umströmung der Packer eintreten kann.

Mit einer programmierten Suchroutine in FLAC wurden in wiederholten Rechnungen im Permeationsbereich die Permeabilitäten schrittweise erhöht und jeweils die nach 76.450 s (21,2 Stunden) eintretenden Fluidmengen berechnet. Der Druckverlauf blieb dabei unverändert. Bei einer Permeabilität von $4 \cdot 10^{-23}$ m² ergab sich schließlich die im In-situ-Versuch berechnete Menge von 0,46 cm^3. Damit ist der mit der Modellfunktion $\dot{p}_{Modell}(t)$ gefundene Betrag von $2 \cdot 10^{-23}$ m² bestätigt.

Die Modellrechnungen wurden exemplarisch für unterschiedliche Permeabilitätsversuche im Steinsalz und Anhydrit bei Voraussetzung der Abströmung entlang des gesamten Druckintervalls und sowie in singulären Klüften wiederholt und bestätigten in allen Fällen die gefundenen Werte. Damit ist die Anwendbarkeit der neu entwickelten Auswertemethode für Permeabilitätsmessungen nachgewiesen.

10.3 Berechnung einer stationären parallelen Kluftströmung im Laborversuch

10.3.1 Simulation unterschiedlicher hydraulischer Randbedingungen am Bohrloch

Die Berechnung stationärer Strömungsverhältnisse in einem Anhydritriss nach dem Hydrofrac erfolgte in Bezug auf die in KAMLOT, P.; U. A. (1999) durchgeführten Laborversuche an Gesteinswürfeln (Kapitel 5). In Abbildung 10.3 ist ein Anhydritwürfel mit den Kantenlängen von 10 cm dargestellt. Der Bohrungsradius beträgt 8 mm und das Druckintervall zwischen den Packern der Minifracsonde im Würfelinnern ist 40 mm hoch. In einem echten Triaxialgerät wurde der Würfel allseitig mit 15 MPa belastet.

Für die Modellierung der Kluftströmung wurde ein speziell von der Firma ITASCA Consultants im Auftrag des IfG entwickeltes Rechenprogramm auf Basis der im Programmsystem FLAC verwendeten Programmiersprache FISH verwendet. Das Rechenprogramm ist in TE KAMP, L.; KONIETZKY, H. (1996) beschreiben und wurde in KONIETZKY, H.; TE KAMP, L.; KAMLOT, P. (1999) veröffentlicht. Bei der gekoppelten Berechnung einer Fluidströmung in einer Kluft bestimmen die wirkenden Spannungen und Steifigkeiten die Kluftöffnung und damit die Kluftpermeabilität. Im vorliegenden Fall wird ausschließlich auf Einzelklüfte im Anhydrit, wie sie sich entsprechend Abbildung 10.3 typischerweise ausbildeten, Bezug genommen. Die grundlegende Idee bestand darin, die für die hydraulische Rechnung gemäß Formel 10.3 wesentliche Kluftöffnungsweite b in jedem Rechenschritt in Abhängigkeit vom Kluftwasserdruck und der wirkenden Normalspannung zur Kluft zu berechnen.

$$q = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot a \cdot \frac{p_i}{L} \qquad (10.3)$$

q = Volumenstrom in der Kluft
b = Kluftöffnung
μ = dynamische Viskosität
a = Kluftbreite
p_i = Bohrlochinnendruck
L = Klufttiefe in Richtung des Druckgradienten

Bei dieser Berechnung besitzt die Kluftsteifigkeit eine signifikante Bedeutung, wie in den nachfolgenden Untersuchungen noch belegt wird.

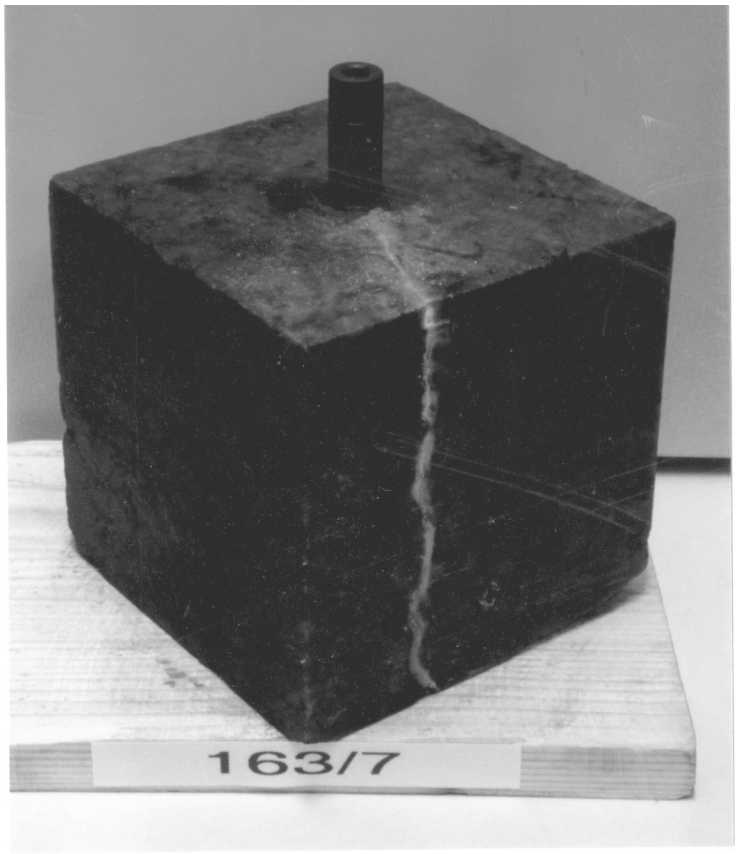


Abb. 10.3: Gefracter Anhydritwürfel mit Längsriss entlang der Bohrung

Der Fluiddruck p_i wirkt als Innendruck in der fluidgefüllten Kluft und damit der Normalspannung (in Abbildung 10.3 in horizontaler Wirkrichtung) entgegen. Es stellt sich über L ein Gradient von der Bohrlochkontur bis zur Würfelaußenfläche ein. Da ein höherer Fluiddruck die Kluft weiter öffnet, ist ein geringfügiger Abfall der Kluftöffnung entlang L gegeben. Die aktuelle Kluftporosität ergibt sich im Rechengang aus der relativen Änderung der Kluftöffnungsweite, bezogen auf die Ausgangsporosität. Die Ausgangswerte für die Kluftporositäten werden gemäß den Laborbefunden vorgegeben.

Die FISH-Routine besteht aus fünf Programmteilen mit folgenden Aufgaben:

- Kluft.fkt: Definition der Klüfte mit den benötigten Variablen und Feldern.
- Kluft.def: Initialisierung der Ausgangskluftparameter
- Kluft.his: Festlegung spezifischer Parameter für History-Funktionen und die Berechnung von Flüssigkeitsvolumina
- Kluft.kpl: Anpassung der Kluftparameter während der Berechnung
- Kluft.shw: Ausgabe der Kluftparameter

In Abbildung 10.4 ist das verwendete Rechenmodell als Horizontalschnitt durch den Anhydritwürfel dargestellt (Blick von oben auf den Würfel). Es wurde nur der halbe Würfel mit der Einzelkluft parallel zur Bohrung vernetzt. Die roten Pfeile kennzeichnen die mechanischen Randbedingungen von 15 MPa und die roten Kreise die hydraulischen Druckrandbedingungen an der Kluft als Bohrlochinnendruck oder Injektionsrate.

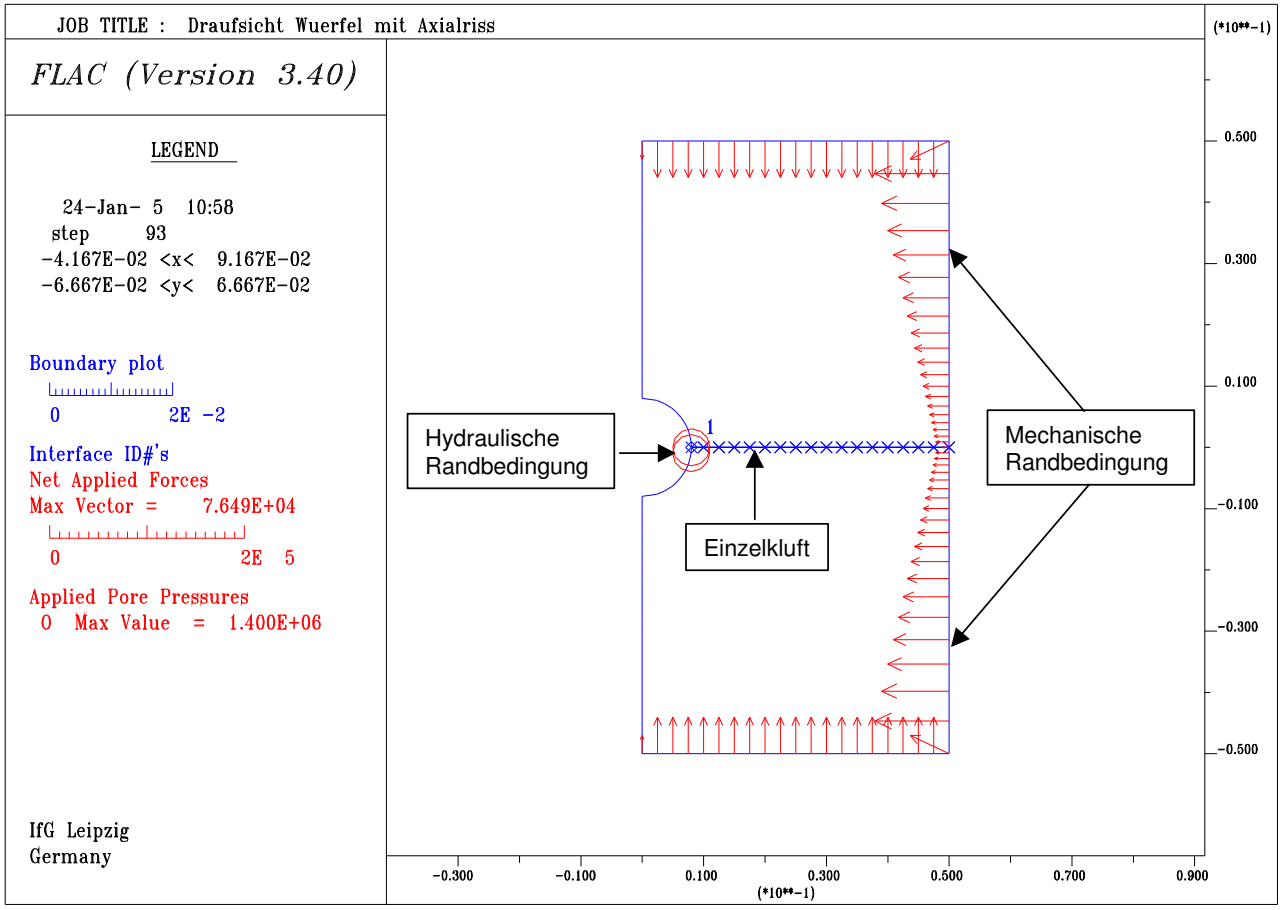


Abb. 10.4: Rechenmodell für die Kluftströmungsrechnungen (Horizontalschnitt durch einen Anhydritwürfel

Der Kompressionsmodul des Anhydrits lag bei 50 GPa, der Schermodul bei 23 GPa und die Dichte bei 2.900 kg/m³. Der Kompressionsmodul des Druckfluids wurde mit 2 GPa bei einer Dichte von 1.300 kg/m³ festgelegt. Die dynamische Viskosität betrug 6,8 mPa·s. Als Ausgangswert für die Kluftweite b wurde ein Wert von 7 µm bei einer Kluftporosität von 100 % vorgegeben. Da die stationären Verhältnisse nach dem Hydrofrac mit Nachverpressung untersucht wurden, betrug die Sättigung in der Kluft 100 %.

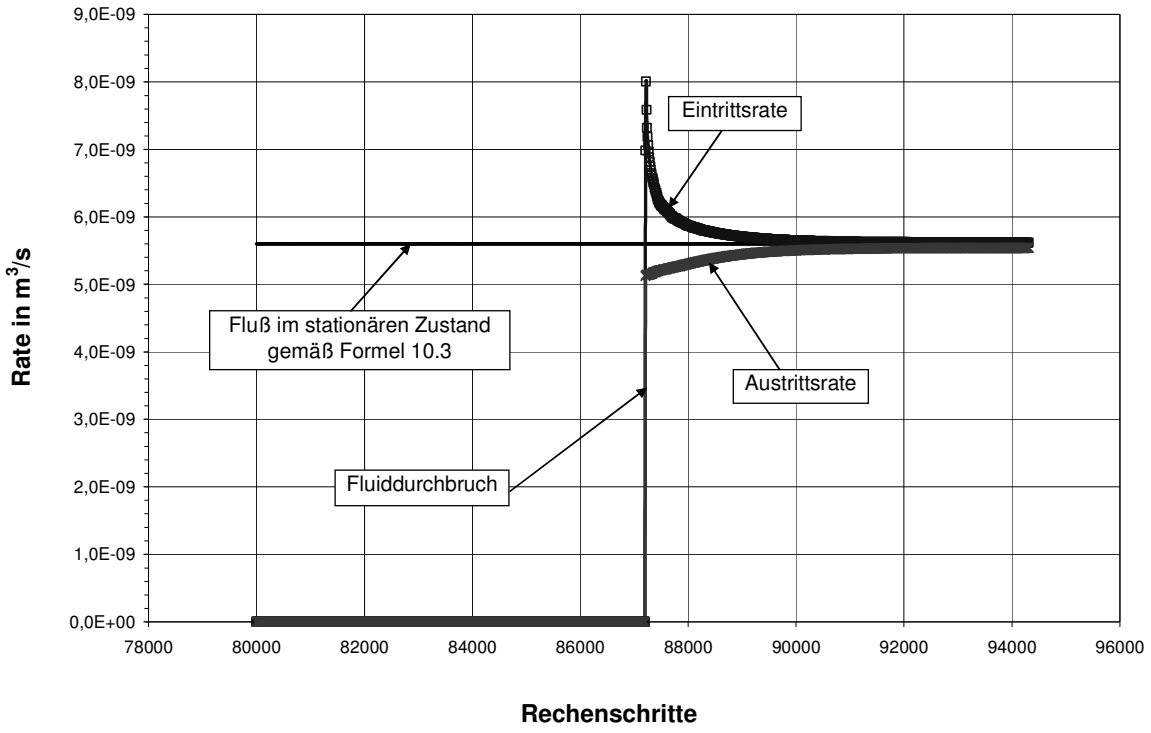


Abb. 10.5: Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bei einem Innendruck an der Kluft von 5 MPa

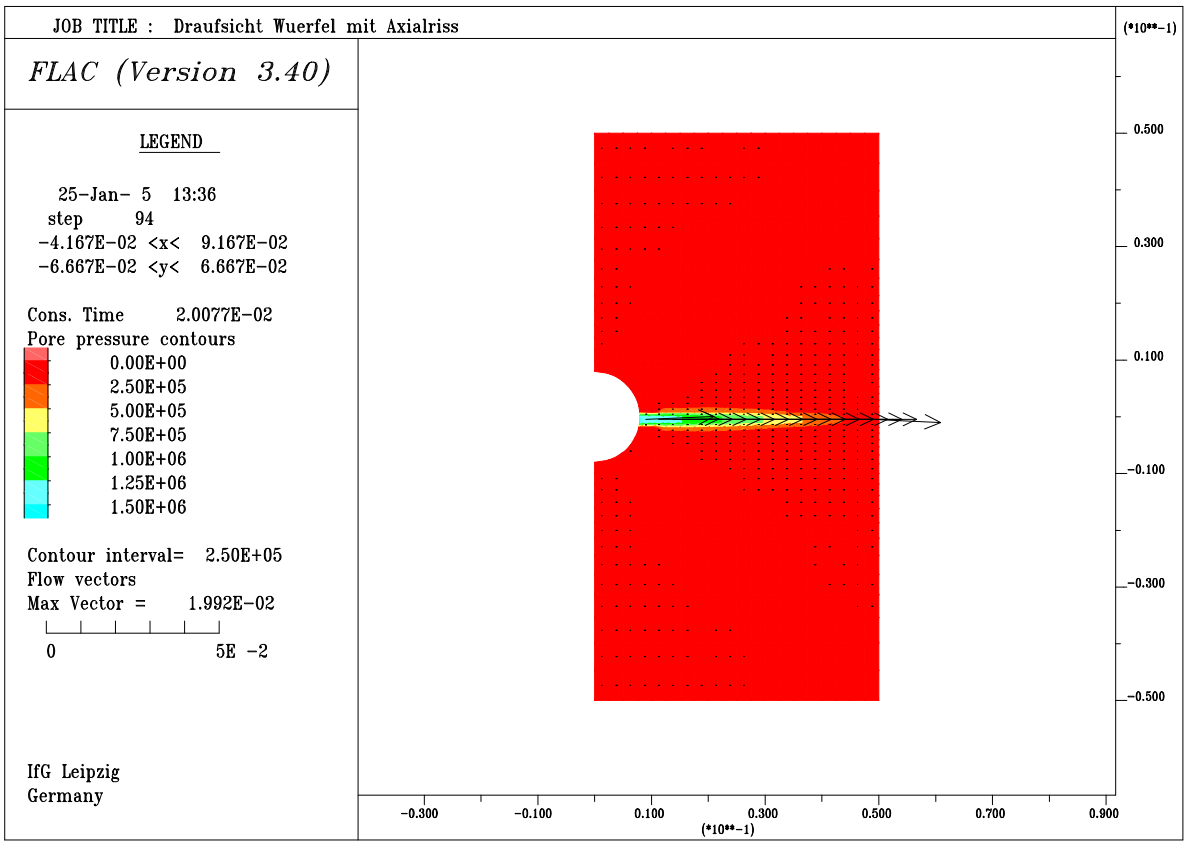


Abb. 10.6: Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einem Innendruck an der Kluft von 1,5 MPa

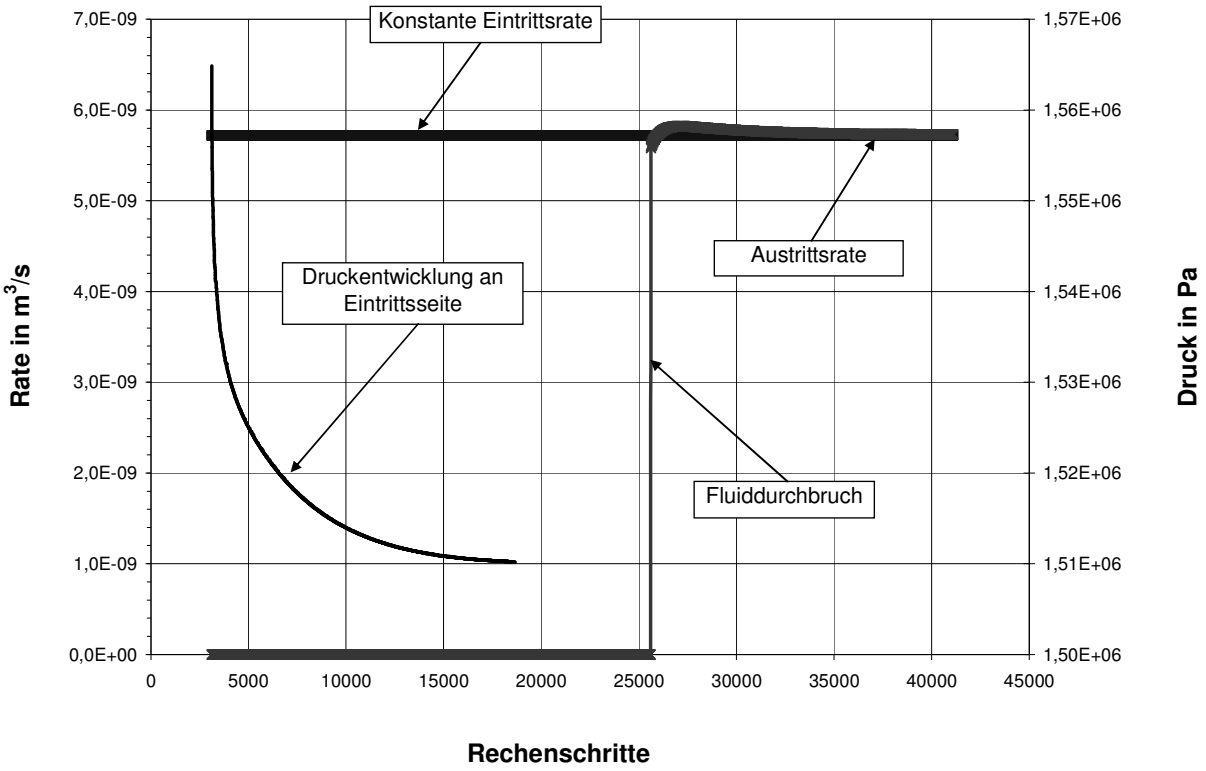


Abb. 10.7: Volumenbilanzen bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}64 \cdot 10^{-9}$ m³/s

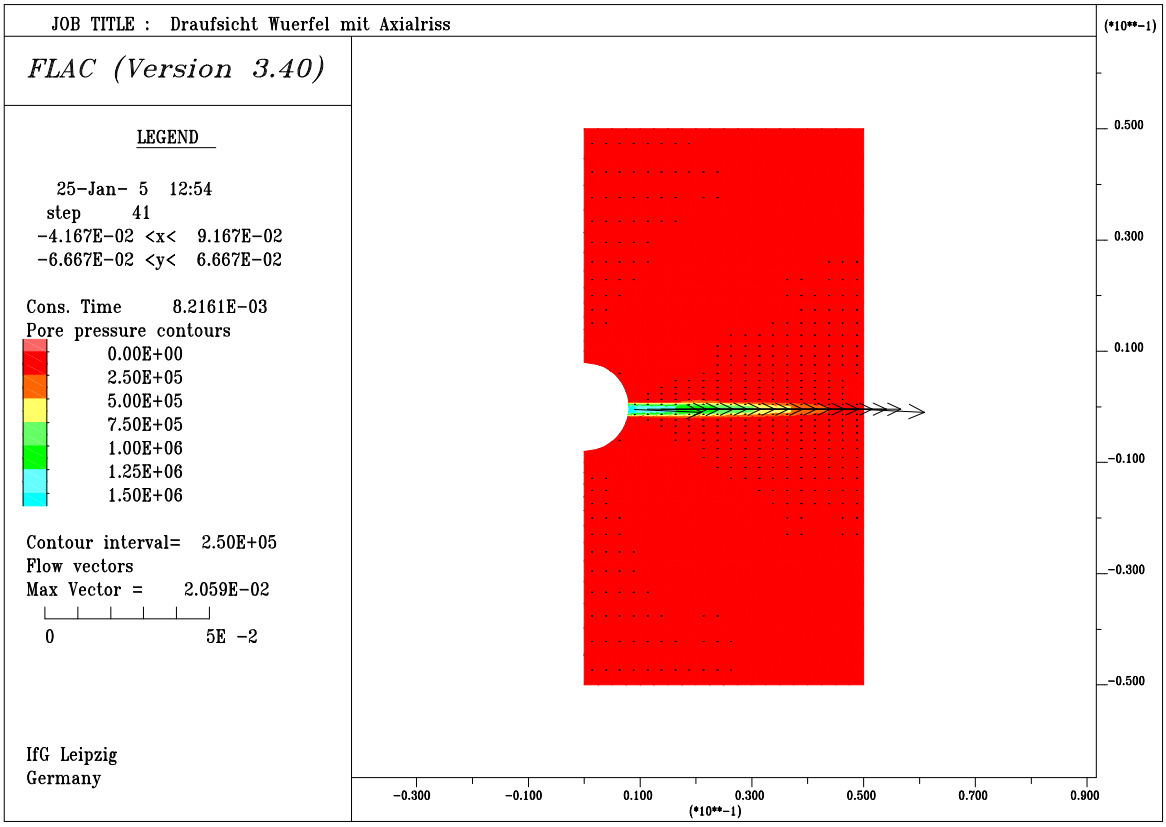


Abb. 10.8: Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}64 \cdot 10^{-9}$ m³/s

In den Abbildungen 10.5 und 10.6 sind zunächst die Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bis zur Einstellung des stationären Zustandes und das Bild der stationären Porendruckverteilung mit den Fließvektoren dargestellt. Der stationäre Gleichgewichtszustand entspricht der Beziehung (10.3) bei einer Kluftbreite von 40 mm (senkrecht zur Modellebene) und einer Klufttiefe entlang L von 42 mm mit einem Wert von $5{,}60 \cdot 10^{-9}$ m³/s (0,48 l/d). An der Kluft wirkt ein konstanter Bohrlochinnendruck von 1,5 MPa.
In der inversen Modellierung (Abbildungen 10.7 und 10.8) führt die nahezu gleiche Zutrittsrate an der Kluft von $5{,}64 \cdot 10^{-9}$ m³/s (0,49 l/d) im stationären Zustand zu einem Bohrlochinnendruck an der Kluft von 1,51 MPa. In beiden Fällen betrug die mittlere Kluftöffnung nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes 6,84 µm.

Mit diesen Rechnungen ist die Anwendbarkeit des Programms für unterschiedliche Flüssigkeitsrandbedingungen bei stationären Zuständen einer Kluftströmung belegt. Die Übereinstimmung mit der analytischen Lösung (kubisches Fließgesetz) liegt vor. Über diesen Zusammenhang hinausgehend sollen im nächsten Abschnitt auch die Interaktionen der Poreninnendrücke mit der Kluftöffnung in Abhängigkeit von der Kluftsteifigkeit untersucht werden.

10.3.2 Abhängigkeit der stationären parallelen Kluftströmung von der normal zur Kluft wirkenden Spannung

Die Interpretation von Zuflussmengenmessungen in geklüfteten Gesteinen ist in vielen Fällen problematisch und hat in der internationalen Literatur die Aufmerksamkeit in Richtung des Gebirgsspannungseinflusses auf die Kluftöffnungsweiten bzw. die Deformierbarkeit der Klüfte gelenkt. Eine ausführliche Diskussion ist in BAWDEN, W. F.; ET AL (1980) enthalten. Dort wird ausgeführt, dass in den meisten geklüfteten Gesteinen die Leitfähigkeit der Diskontinuitäten als sekundäre Permeabilität die primäre Leitfähigkeit des Gesteins um mehrere Größenordnungen übersteigt. Die Fluidzuführung kann dabei auf wenige singuläre Klüfte beschränkt sein. Es wird abgeleitet, dass turbulente Strömungen bei den meisten hydrogeologischen Problemstellungen keine Rolle spielen, die Kluftrauigkeit jedoch eine nicht parallele Strömung verursacht. Da in Laborversuchen zyklische Lastschleifen der Spannungen normal zu den Klüften eine hohe und zunehmende Normalsteifigkeit zeigten, wird geschlussfolgert, dass die Deformation natürlicher Klüfte in dieser Richtung geringer als erwartet sein könnte. Mit steigender Normalspannung entstehen auf den rauen Kluftoberflächen zunehmende Gesteinskontakte und erhöhen die Steifigkeit. Die Rissöffnung bzw. Kluftdeformierbarkeit in Abhängigkeit von den wirkenden Spannungen

(Gebirgsspannung normal zur Kluft und Fluidinnendruck) sollte in mechanisch/hydraulisch gekoppelten Modellrechnungen simuliert werden können.

Diesen Empfehlungen wird gefolgt und zur Untersuchung des Einflusses der Normalspannung zur Kluft und in Weiterführung der Modellrechnungen aus dem letzten Kapitel wurde das in Abbildung 10.4 dargestellte Rechenmodell verwendet und ein in KAMLOT, P.; U. A. (1999) beschriebener Versuch an einem Anhydritwürfel nachgerechnet. Im Druckintervall des Würfels wurde dazu nach dem Hydrofrac und der Rissausbreitung (siehe Abbildung 10.3) ein konstanter Volumenstrom von 20 ml/h eingestellt und die Normalspannung zur Kluft σ_n schrittweise von 5 MPa auf 8, 12, 15 und 20 MPa angehoben. Der sich jeweils neu einstellende stationäre Abströmwiderstand ist in Abbildung 10.9 dargestellt.

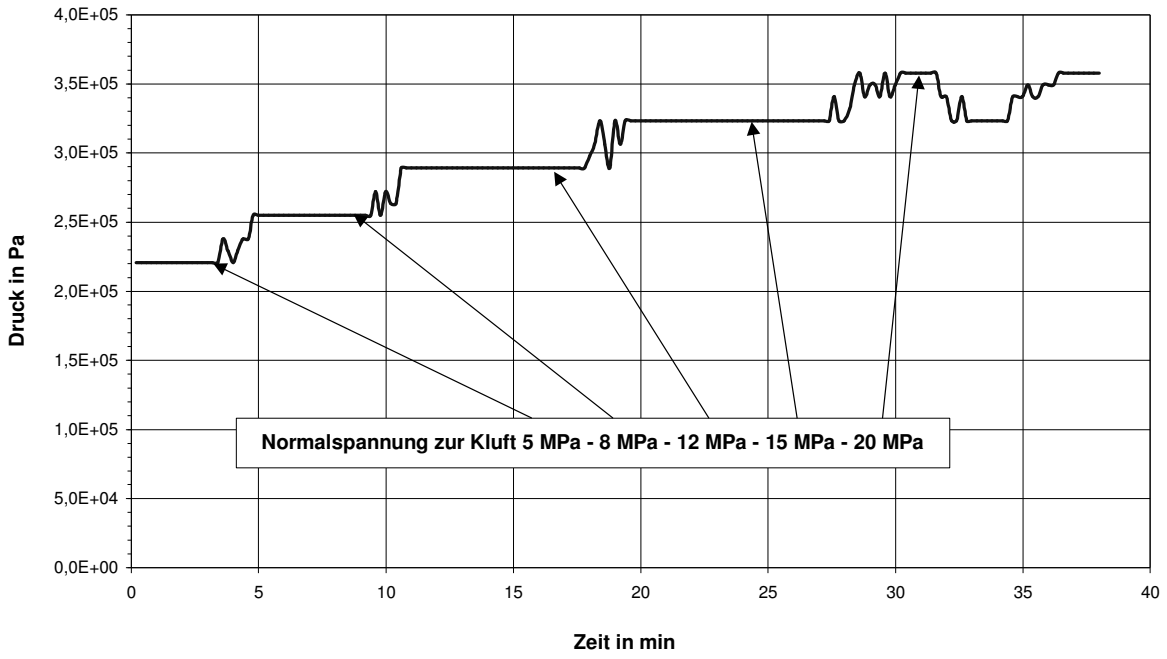


Abb. 10.9: Abströmwiderstand in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung (Laborversuch)

Es ist zu sehen, dass dieser von einem Ausgangswert 0,22 MPa unter σ_n = 5 MPa bis auf 0,36 MPa unter σ_n = 20 MPa ansteigt. Die beiden anderen Randspannungen am Würfel wurden mit 15 MPa konstant gehalten. Mit einer Kluftbreite a von 40 mm, einer Klufttiefe L von 42 mm und einer unveränderten dynamischen Viskosität von 6,8 mPa·s ergibt sich aus Formel (10.3), dass bei einem Bohrlochinnendruck von 0,22 MPa und einer konstanten Rate von 20 ml/h die Rissöffnung im Ausgangszustand etwa 13 µm und im Endzustand etwa 11 µm betragen muss. Diese Verringerung der Kluftöffnung ist sehr klein und nur mit einer

hohen Kluftsteifigkeit zu begründen. Zur möglichst realistischen Modellierung wurde gemäß FLAC (1998) die äquivalente Steifigkeit k_{Modell} in normaler Richtung zur Kluft wie folgt berechnet:

$$k_{Modell} = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}}$$

$$K = Kompressions\,\mathrm{mod}\,ul \qquad (10.4)$$
$$G = Scher\,\mathrm{mod}\,ul$$
$$\Delta z_{\min} = \min imale\ Elementbreite\ an\ der\ Kluft$$

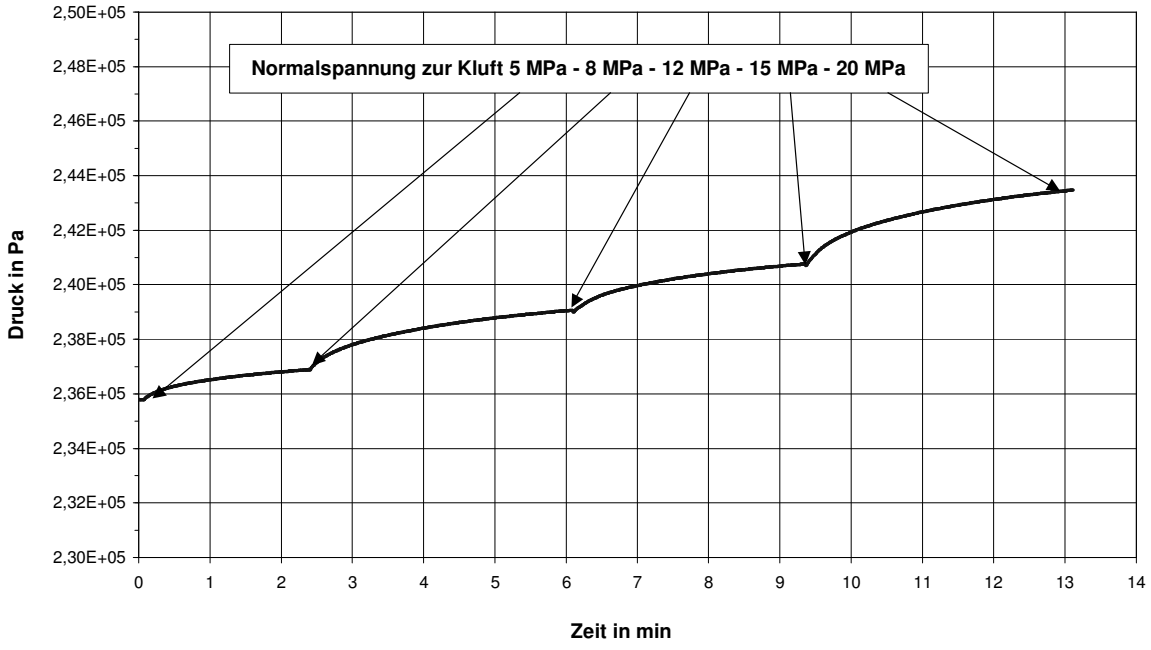


Abb. 10.10: Berechnung des Abströmwiderstandes in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung

Bei einem Kompressionsmodul des Anhydrits von 50 GPa, einem Schermodul von 23 GPa und einer minimalen Elementbreite an der Kluft von etwa 1 mm ergibt sich eine äquivalente Steifigkeit von $8 \cdot 10^7$ MPa/m. Mit diesem Betrag konnte die gemessene Erhöhung näherungsweise nachvollzogen werden (siehe Abbildung 10.10). Bei kleineren Steifigkeiten (diese sind an das Rechenmodell mit den verwendeten Elementgrößen gebunden) war der berechnete Einfluss der Normalspannungserhöhung auf die Verringerung der Kluftöffnung und damit auf die Erhöhung des Abströmwiderstandes wesentlich stärker und stimmte nicht mit den Laborversuchen überein. Der Kompressionsmodul des Druckfluids wurde

unverändert mit 2 GPa bei einer Dichte von 1.300 kg/m³ festgelegt und die dynamische Viskosität betrug 6,8 mPa·s. Die Kluftporosität wurde mit 100 % bei einer vollständigen Sättigung in der Kluft vorgegeben.

Die relativ geringen Änderungen des Abströmwiderstandes und damit der hydraulischen Parameter in der Kluft bei vergleichsweise starken Änderungen der Normalspannung zur Kluft erklären, warum am Messort „Liegendzufahrt Kippstelle 9b“ keine Änderungen der hydraulischen Parameter bei der Näherung der Abbaufront beobachtet wurden. Die Gebirgsspannungsänderungen waren noch wesentlich kleiner.

10.4 Berechnung von Fluidströmungen in einer geschlossenen Anhydritkluft

Das Rechenmodell einer untertägigen Untersuchungsstrecke mit einer Breite von 9 m und Höhe von 4 m (Ausnutzung der Symmetrie) und einem horizontalen Bohrloch in einer Stoßentfernung von etwa 5 m ist in Abbildung 10.11 dargestellt.

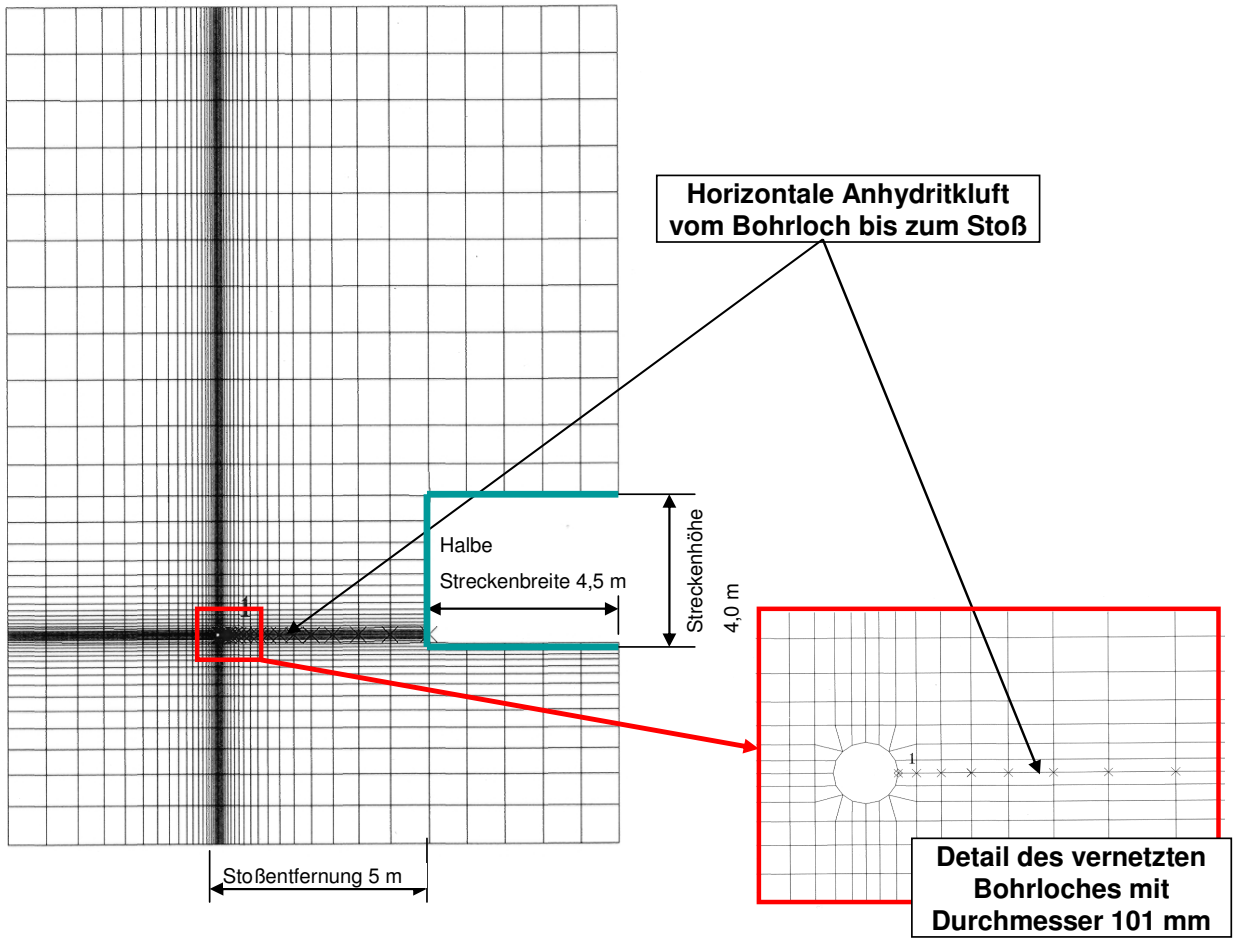


Abb. 10.11: Vertikaler Modellschnitt quer zur Messstrecke und zum Untersuchungsbohrloch im Anhydrit mit angeschlossener horizontaler Kluft

Der Vertikalschnitt quer zur Strecke und zum Bohrloch (Durchmesser 101 mm) schneidet eine näherungsweise horizontale geschlossene Kluft, die im Sohlenkantenbereich der Strecke austritt. Die Kluft wird vom Bohrloch angeschlossen und entlang des separierten Druckintervalls mit einem konstanten Fluiddruck von 10 MPa belastet. Mit begleitenden Schallemissionsortungen wurde nachgewiesen, dass die Ereignisse auf eine Bohrlochentfernung bis 2 m beschränkt blieben. Mit den vorliegenden, anhand der Laborversuche bestätigten, Modellparametern soll überprüft werden, ob eine solche in der Untersuchungszeit am Messort in Bernburg räumlich begrenzte Fluidausbreitung nachvollzogen werden kann.

Die Materialparameter für den Hauptanhydrit Bernburg wurden aus KAMLOT, P.; U. A. (1995) abgeleitet. Die beiden vertikalen Modellränder sind horizontal fixiert und die Modellunterkante wird in vertikaler Richtung festgehalten. Die Modellauflast ergibt sich aus den Spannungsbedingungen am Messort in der alten Hauptförderstrecke und wurde mit 14 MPa festgelegt. Unter diesen Randbedingungen lässt sich im Bohrlochbereich in einer Stoßteufe von 5 m eine Minimalspannung von 9 bis 10 MPa berechnen. Solche Beträge sind im Bohrlochteufenbereich von 5,5 m bis 7 m messtechnisch mittels Hydrofrac belegt. Die Kluftöffnung zu Beginn der Rechnung wurde mit 7 µm festgelegt.

Die Abbildung 10.12 zeigt die Porendruckverteilung entlang der Kluft nach 1 Tag bei einem Bohrlochinnendruck von 10 MPa. Die Fluidfront entwickelt sich nur sehr langsam und hat eine Bohrlochentfernung von etwa 2 m erreicht. Dieser Befund stimmt sehr gut mit den Schallemissionsmessungen überein. Auch nach sechs Monaten hat sich im Rechenmodell noch keine stationäre Strömung in der Kluft mit gleich großen Eintritts- und Austrittsraten eingestellt. Teilweise erfolgte eine geringe Fluidpermeation in den Porenraum der Anhydritmatrix.

Mit diesem Rechenergebnis ist es plausibel, dass sich am untertägigen Messort kein Fluidaustritt am Stoß zeigte. Das Hydrauliköl war mit Fluoreszin versetzt und im mehrtägigen Abstand wurde der Streckenstoß mit einer UV-Lampe nach Ölspuren abgesucht, die sich jedoch nicht zeigten. Daraus ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die geringe Kluftpermeabilität (Kluftöffnung) und die Einspannung im Untersuchungsbereich offensichtlich keine schnelleren und betragsmäßig größeren Fluidbewegungen zulässt. Bei der Permeation einer Salzlösung wäre ein Austritt am Streckenstoß vermutlich gar nicht sichtbar. Die Lösung würde im Wetterstrom verdunsten.

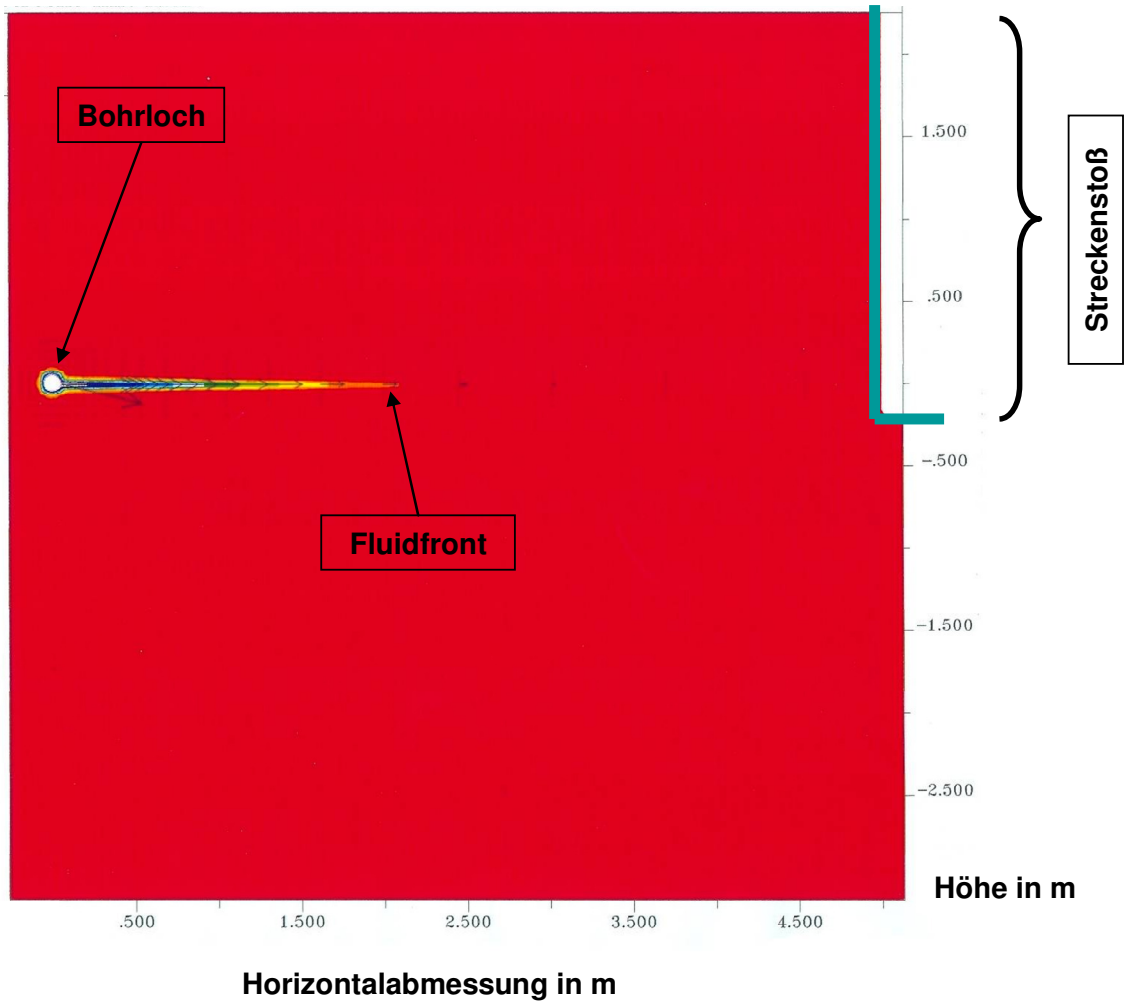


Abb. 10.12: Porendruckverteilung in einer horizontalen Anhydritkluft nach einem Tag bei 10 MPa Fluidinnendruck im abgepackerten Bohrlochintervall (Ausschnitt aus Abb. 10.11)

11. Gesamtauswertung und Interpretation

Der Umfang der folgenden Kapitel hängt vom jeweiligen Gegenstand ab. So bietet sich z.B. bzgl. der Stratigraphie, des Gefüges und der Tektonik eine ausführliche und strukturierte Gegenüberstellung der Resultate an, während bzgl. der Gesteins- und Festigkeitsparameter eine Datenübersicht ausreicht. Das Ziel besteht in einer durch eine Vielzahl von Labor- und In-situ-Untersuchungen sowie Modellrechnungen gut begründeten und zusammengeführten Interpretation der Detailaussagen im Hinblick auf das Anhydritszenario. Nur auf der Basis des angestrebten Gesamtverständnisses der wesentlichen und übertragbaren Prozesse ist eine Bewertung der Integrität der geologischen Barriere möglich, die dann im Detail standortbezogen durchzuführen ist. Die dafür notwendigen Methoden und Modelle wurden entwickelt.

11.1 Stratigraphie, Gefüge und tektonische Ausbildung des A3 und T3

Für den **Hauptanhydrit A3** existiert eine für das geologische Untersuchungsgebiet vom Süd- bis zum Nordharz typische feinstratigraphische Unterteilung, die im Kapitel 4.2.1 dargestellt ist. Überwiegend ist das Makrogefüge gleichmäßig aufgebaut und die Schichten sind kompakt ausgebildet. Im Südharz sind geringe Mächtigkeitsschwankungen um einen Mittelwert von 30 m erkennbar. Lediglich am Südrand der Verbreitungsgrenze des Zechstein 3 südlich der Südharz-Kaliabbaureviere sind Mächtigkeiten von über 40 m entwickelt. Im Nordharz-Kalirevier sind größere Schwankungen, insbesondere in den oberen Zonen des Hauptanhydrits, nachweisbar.

Die generellen Lagerungsverhältnisse des Hauptanhydrits werden im Südharz-Kaligebiet sowie in den Muldenbereichen des Saale-Unstrut- und Nordharz-Kaligebietes durch eine flach-wellige Lagerung (verbunden mit Aufsattelungen, Verwerfungen und disharmonischen Verformungen), an langgestreckten Sätteln wie Roßlebener-, Teutschenthaler-, Bernburger- und Staßfurter Sattel durch eine nahezu gleichmäßige, sattelförmige Lagerung mit Verwerfungen (teilweise auch Doppellagerung) sowie im Raum des Allertalgrabens durch eine intensiv unregelmäßig bis kulissenförmig verfaltete Lagerung charakterisiert.

Bei den Hauptanhydritanschwellungen lassen sich Anhydritbuckel und Anhydritarme von Anhydritklippen unterscheiden: Anhydritbuckel und Anhydritarme sind durch eine Anschwellung der Zone epsilon charakterisiert, die teilweise auch mit einer Zunahme der Mächtigkeit der Anhydritschale und der Schwarzen Tonlage verbunden ist. Bei bauchigen Anschwellungen sind oft fingerartig verzweigte Formen zu beobachten, die sich meist diskordant in das Leinesteinsalz erstrecken. Anhydritklippen (es gibt Klein- und Großklippen) bestehen in der Regel gleichfalls aus der Zone epsilon. Die Klippen sind teils symmetrisch,

teils auch asymmetrisch aufgebaut und weisen ein unterschiedliches Einfallen an den Flanken auf. Großklippen erreichen Längen von mehreren hundert Metern in horizontaler Richtung. Die vertikale Ausdehnung über der normalen Oberkante kann bis 50 m betragen und sich stratigraphisch bis zu den Anhydritmitteln des Anhydritmittelsalzes erstrecken. Anhydritklippen sind wahrscheinlich als frühsekundäre (diagenetische) Bildungen während der Ablagerungszeit des Leinesteinsalzes durch eine Entwässerung im Zusammenhang mit der Umbildung des primär sedimentierten Gipses zu Anhydrit entstanden. Eine dritte Form von Anschwellungen, die Anhydritwälle, hingegen sind, wie aus dem Zechstein Thüringens, der Lausitz und Mecklenburgs seit langem bekannt und im Subherzyn vermutet bzw. nachgewiesen, als primär-sedimentäre Mächtigkeitsanschwellungen des Hauptanhydrits zu deuten. Die Wallbildung könnte an Untiefen des Abscheidungsbeckens oder/und abweichende Salinitätsverhältnisse der Beckenlösung gebunden sein. An der Mächtigkeitsanschwellung sind hauptsächlich die oberen Zonen gamma bis epsilon beteiligt. In der gesamten Zone treten mit unterschiedlicher Intensität und Häufung Poren und Kavernen auf, die fast immer mit gelbbräunlichem bis farblosem Steinsalz gefüllt sind.

In den Dünnschliffuntersuchungen wurde in Pöthen ein "gewachsenes" Gefüge ohne Hinweise auf tektonische Beanspruchungen nachgewiesen. Auch in Bernburg wurden im Dünnschliff keine Kluftfüllungen und Risse, die auf solche Beanspruchungen hinweisen, gefunden. Dieser Befund ist jedoch an die Kernauswahl gebunden, da es beim Überbohren von Klüften oft zu einem Kernzerfall kommt. Die gefundenen Strukturelemente sind sedimentär bis frühdiagenetisch zu erklären. Generell ist im Hauptanhydrit die Variabilität der Zusammensetzung sehr gering. Hervorzuheben ist in Bernburg eine Reaktionsanhydritstruktur, die stark von halitgefüllten Poren durchsetzt ist. Einzelne Texturbereiche sind durch tonig-bituminöse Schmitzen (*Suturen*) voneinander getrennt. Das gehäufte Auftreten von Reaktionsanhydrit lässt eine salinarsubrosive Beeinflussung vermuten. Geomechanisch ist vom Bernburger Anhydrit eine größere Verformbarkeit und geringere Festigkeit relativ zum Pöthener Anhydrit zu erwarten. Eine ausgeprägte Schichtung wurde im Hauptanhydrit nicht gefunden. Innerhalb der Profile sind nur graduelle Unterschiede wahrscheinlich. Allein die Abweichungen in den Texturen dürften geomechanisch nicht relevant sein. Inhomogenitäten stellen lediglich die Poren und bituminösen Schmitzen dar. Mit *Suturen* werden Spuren der Auflösung des Sedimentgesteins in der frühen Diagenese bezeichnet. Bei einer Umkristallisation und Gefüge-Verdichtung wird die unlösliche bituminöse Substanz in Suturen angereichert. Diese sind von besonderem Interesse, da sie ausgeprägte mechanische Inhomogenitätsflächen darstellen. Im Profil Pöthen fehlen tonig-bituminöse Schmitzen weitgehend. Hier liegt eine enge und innige Verwachsung mit dolomitischem Karbonat vor. Da es sich bei beiden Mineralen um relativ feste Gesteinsbildner handelt, sind keine

Inhomogenitäten im Gefüge zu erwarten. Lediglich bei höherer Belastung werden die reliktisch erhaltenen Schichtungsfugen im Dolomit zum Tragen kommen, und zwar umso mehr, je höher der zusammenhängende Karbonatanteil ist.

Zur tektonischen Ausbildung lassen sich folgende generelle Aussagen ableiten:

- Der Hauptanhydrit ist in allen Aufschlüssen durchweg geklüftet. Die Anzahl der Klüfte ist abhängig von der regionalen tektonischen Position, besonderen Lagerungsverhältnissen sowie der Materialbeschaffenheit. In zentralen Teilen des Anhydrits, insbesondere bei durchschnittlicher Mächtigkeit, ist eine Verminderung der Bruchintensität und im Bereich von Anhydritklippen eine Erhöhung zu erwarten.
- Der Hauptanhydrit besitzt, bedingt durch seine stoffliche Zusammensetzung, ein typisches Trennflächeninventar. Die im Hauptanhydrit nachgewiesenen Kluftrichtungen stimmen mit den Kluftrichtungen in den liegenden und hangenden Schichtengliedern gut überein. Die Hauptkluftrichtungen verlaufen nahezu parallel zu den im Deckgebirge nachgewiesenen Hauptstörungen.
- Die tektonisch angelegten Anhydritklüfte sind meist geschlossen oder mit sekundären Mineralisationen (Carnallit, Halit) gefüllt. Bei geöffneten Klüften betragen die Öffnungsweiten am Stoß der untertägigen Auffahrungen nur etwa 1 Millimeter und in Teufen > 800 m werden überhaupt keine offenen Klüfte mehr beobachtet (SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986, 1987)). Mit Bohrlochkamerabefahrungen lässt sich feststellen, dass am Hohlraumstoß geöffnete Klüfte im Gebirge außerhalb der Entspannungszone der Hohlräume wieder zusammengedrückt sind.
- Von Bedeutung im Sinne der Aufgabenstellung ist die begründete Aussage, dass der Anhydrit in nahezu ungestörter Ausbildung und entsprechender Ablagerung im Wesentlichen hydraulisch dicht und mechanisch durch eine höhere Bruchfestigkeit gekennzeichnet ist. Mit der Zunahme der Intensität der Klüftung werden beide Werte gleichlaufend negativ beeinflusst, wobei die Abnahme der hydraulischen Dichtheit zusätzlich durch die Teufenlage charakterisiert wird. So ist mit der Abnahme der Teufe gleichzeitig eine Zunahme des offenen Kluftvolumens feststellbar (SCHWANDT, A. 1991).

Die ingenieurgeologischen Untersuchungen nach SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986, 1987) führen zu folgende Einschätzungen:

- Der durchschnittlich 35 m mächtige Hauptanhydrit ist ein gegenüber hangenden und liegenden Schichten kompetentes Gestein. Er ist deutlich geklüftet, wobei die Klüfte stets steil bis seiger einfallen (75 bis 90°) und sich im Streichen meist 2 bis 3 Kluftscharen

zuordnen lassen. Darunter gibt es eine Hauptkluftschar, die in der Regel durch mehrere Kluftparameter belegt wird (nicht nur durch die Abstände, sondern auch durch Kluftlängen und -weiten). Die Klüfte folgen entweder alten und saxonisch wiederbelebten tektonischen Linien oder neuen saxonischen Beanspruchungsrichtungen.

- Ein Zusammenhang der dominierenden Streichrichtungen mit dem großtektonischen Schollenbau ist deutlich. Im Hauptanhydrit des westlichen Südharz-Kalireviers überwiegen ± N-S-gerichtete und herzyne Bruchstrukturen. Untergeordnet treten erzgebirgische Klüfte auf. Der Einfluss der rheinischen Bruchlinien (Ohmgebirgs-Grabenzone im östlichen Randbereich des Leinegrabens) und der eggischen Richtung (Störungen im Paläozoikum des Mittelharzes) nimmt nach Süden und Osten in Richtung Thüringer Becken und östliches Harzvorland ab. Folglich erreichen analog zum regionaltektonischen Bauplan herzyne Klüfte ausgeprägte Dominanz. Erzgebirgische Klüfte bleiben untergeordnet. Im Gegensatz hierzu treten trotz herzyn gerichteter Sattelstrukturen in der Subherzynen Senke bevorzugt erzgebirgische Klüfte auf. Offensichtlich war ein Durchpausen/Wiederbeleben der alten angelegten subsalinaren Linien durch das extrem mächtige Staßfurtsteinsalz (300 - 500 m) im Zuge der saxonischen Tektogenese nicht möglich, so dass während der erzgebirgisch gerichteten Pressung (jungmesozoisch-alttertiär) und den dadurch ausgelösten Aufsattelungen eigenständige Hauptklüfte entstanden. Der Zerrungscharakter dieser Klüfte wird durch häufige Verheilungen unterstrichen.
- Gibt es unverheilte Klüfte im Hauptanhydrit, so sind sie meist weniger als 2 mm weit. Bis zu 35 % aller Klüfte können in Einzelaufschlüssen mineralisiert sein, oft mit beträchtlichen Verheilungsweiten (Nordharz, westliches Südharzgebiet). Unabhängig von tektonischen und Lagerungsverhältnissen wurden trotz Abbau- und Gebirgsdruckwirkungen ab ca. 800 m Teufe keine offenen Klüfte im Hauptanhydrit beobachtet. Eine Teufenabhängigkeit von Kluftabständen und -längen ist dagegen nicht nachweisbar.

Der **Graue Salzton T3** schließt den Zechsteinzyklus 2 mit dem Deckanhydrit ab, leitet den 3. Zyklus ein und liegt in der zeitlichen Bildungsfolge unmittelbar vor dem Hauptanhydrit A3. Auch für den Grauen Salzton existiert eine typische feinstratigraphische Unterteilung, die im Kapitel 4.3.1 dargestellt ist. Es werden ein liegender tonig-anhydritischer, ein mittlerer tonig-sandiger und ein hangender tonig-magnesitischer Teil voneinander getrennt. Diese Haupteinheiten lassen sich auch in Gebieten mit beträchtlichen Mächtigkeitsschwankungen finden. Der Graue Salzton ist überwiegend mit Mächtigkeiten unter 10 m ausgebildet. Nur im nordwestlichen und südwestlichen Teil des Südharz-Kaligebietes weist er Mächtigkeiten von über 20 m auf.

An den Dünnschliffpräparaten wurde beobachtet, dass die sedimentären Gefüge außerordentlich gut erhalten sind (Pöthen) bzw. eine primär frühdiagenetische Anlage (Bernburg) vorhanden ist. In Bernburg liegt auf Grund des gefundenen Reaktionsanhydrits in häufig durchgehenden schichtparallelen Klüften weiterhin eine tektonische bzw. salinar subrosive Beeinflussung nahe.
Ungewohnt und nur in Bernburg zu beobachten war eine Bröckelstruktur in den reinen Tonlagen, von denen eine Verwitterung ausging. Eine Salinarsubrosion ist der Oberkreide bzw. dem frühen Tertiär zuzuordnen. Anzeichen einer rezenten Subrosion wurden nicht gefunden.
Bezüglich der Feinstratigraphie besitzt der Rotbraune Salzton die geringste Festigkeit. In Pöthen ist der Halit das wichtigste Zementationsmaterial, welches die Festigkeit dominierend beeinflusst. In Bernburg ist eine geringere Festigkeit zu erwarten, da die intensive Zementation hier fehlt. Der Anhydrit kann keinen Zement, sondern nur diskrete Lagen oder Knoten bilden.
Im Südharz spielen quellfähige montmorrilonitische Minerale eine relativ große Rolle. Hier ist bei Feuchtigkeitskontakt eine Quellung zu erwarten, die auf Grund des Rekristallisationsgrades in Bernburg nur eine untergeordnete Bedeutung besitzt.
Die Klüfte und Risse im Salzton lassen sich nur schwer einem Beanspruchungsplan zuordnen. Es finden sich viele Trockenriss-Strukturen bis hin zu intensiven Zerstückelungen. Diese sind meist synsedimentär gefüllt und nicht tektonisch verursacht. Bezüglich der hydrogeologischen Relevanz kann aus der Klüftigkeit allein, wie beim Anhydrit, noch kein Gefährdungsszenario abgeleitet werden.
Im Grauen Salzton liegt, im Gegensatz zum Hauptanhydrit, meist eine ausgeprägte Schichtung vor.

Generell wird die Schichtenfolge des T3 als ein stark zur Bruchtektonik neigender Horizont bezeichnet, der bereits bei geringen gebirgsmechanischen Beanspruchungen durch Aktivierung der Klüfte sowie Bildung von Rissen reagiert. Es sind Harnische sowie geschlossene und mineralgefüllte Klüfte feststellbar. Die auftretenden Klüfte streichen parallel zu den jeweils im Deckgebirge nachgewiesenen Hauptstreichrichtungen von Bruchstörungen. Dabei ist im Südharz die NW-SE- und im Nordharz die NNW-SSE-Richtung vorherrschend. Eine weitere Hauptstreichrichtung verläuft senkrecht dazu. Die Intensität der Klüftung ist von der petrographischen Ausbildung abhängig, wobei im anhydritischen und magnesitischen Bereich die Klüftigkeit intensiver ist und im den tonig-sandigen Bereichen mehr Risse als Klüfte sichtbar sind. Die Kluftfüllungen bestehen überwiegend aus Carnallit, Sylvin und Steinsalz. Im Südharz-Kaligebiet sind weiterhin anhydritische Kluftfüllungen bekannt, die sich besonders auf den Tonanhydrit konzentrieren. Für die Spaltenfüllungen ist die parallel-fasrige Struktur typisch, die bei allen Mineralfüllungen beobachtet wird. Ausnahmen sind überwiegend auf den magnesitischen Teil des Grauen Salztons beschränkt.

Hier sind feinkörnige Strukturen nachweisbar. Aussagen über Ausbildung und Anzahl offener Klüfte liegen nicht vor, generell wird die Kluftintensität aber geringer als im Hauptanhydrit eingeschätzt.

In ingenieurgeologischer Hinsicht besitzt der Graue Salzton grundsätzlich ein von lokalen Strukturen unabhängiges, regionales Kluftsystem, das unabhängig von der lithologischen Gliederung angelegt ist. Bei SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986) findet sich die Aussage, dass der T3 eine "wenig geregelte Klüftung mit nur halbsteilem Einfallen und geringen Kluftabständen" aufweist. Dabei gehen einzelne Richtungsmaxima der Kluftrichtungen ineinander über und belegen eine in nahezu allen Richtungsquadranten auftretende Zerteilung. Die Ausbißlänge lag im Mittel unter 0,5 m. Alle Klüfte waren bei Öffnungsweiten von 0,5 bis 12,5 mm durch Anhydrit, Steinsalz oder Carnallit verheilt.

Aus der Erkenntnis, dass im geologischen Untersuchungsgebiet gravierende teufenabhängige Unterschiede im stratigraphischen und tektonischen Erscheinungsbild auftraten, wurden für die gebirgsmechanischen Untersuchungen Messorte in möglichst unterschiedlichen Teufen und mit unterschiedlichen geologischen Lagerungsformen gewählt sowie unter Berücksichtigung der für ein mehrjähriges FuE-Programm notwendigen Zugänglichkeit zu den Aufschlüssen und der infrastrukturellen und bergbausicherheitlichen Randbedingungen ein Ort im Bergwerk Volkenroda-Pöthen in 1000 m Teufe in einem ruhig gelagerten Anhydritbereich und ein Ort im Bergwerk Bernburg in 500 m Teufe in einer Wallstruktur festgelegt. In den beiden Bergwerken wurde jeweils eine Messkammer im Hauptanhydrit aufgefahren und der Graue Salzton über Bohrungen von benachbarten Strecken aus erschlossen.

11.2 Ergebnisse der Laborversuche am Hauptanhydrit und Grauen Salzton

In den gesteinsmechanischen Untersuchungen konnten die grundsätzlichen vergleichenden Schlussfolgerungen aus den Dünnschliffuntersuchungen bestätigt werden. Jedoch war bei der dargelegten geologisch-tektonischen Ausbildung keine ausgeprägte Homogenität und Isotropie der Prüfkörper, sondern eine Streuung der Kennzahlen infolge der vorhandenen natürlichen Klüfte, Mikrorisse und Schwankungen in der Materialzusammensetzung zu erwarten. Die Prüfkörper wurden aus Bohrkernen aus den Messkammern im Anhydrit bzw. aus Streckenbohrungen in den Salzton hergestellt. Die gefundenen Resultate für die Dichten, elastischen Parameter, uniaxialen und triaxialen Druckfestigkeiten, Spaltzugfestigkeiten, Bruchverformungen, Restfestigkeiten auf den Kluftflächen sowie

Aussagen zu den Kriech- und Permeabilitätsuntersuchungen sind im Kapitel 5.1 bereits in zusammengefasster und vergleichender Form dargestellt. Es wurden ermittelt:

- Mittlere Dichten für den Anhydrit von 2,92 g/cm^3 und für den Salzton von 2,57 g/cm^3,
- Mittlere E-Moduln für den Anhydrit von etwa 60 GPa ($\nu \approx 0{,}25$) und für den Salzton von etwa 20 GPa ($\nu \approx 0{,}15$),
- Uniaxiale Druckfestigkeiten für den Anhydrit von 63 MPa (Bernburg) bis 78 MPa (Pöthen) und für den Salzton von 48 MPa (Bernburg) bis 32 MPa (Pöthen),
- Spaltzugfestigkeiten für den Anhydrit von 7,6 MPa und für den Salzton von 2,8 MPa (Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage < 1,5 MPa),
- Lineare triaxiale Festigkeitsbeziehungen für den Anhydrit mit Kohäsionen von etwa 17 MPa und Reibungswinkeln von etwa 44 Grad und für den Salzton mit Kohäsionen von etwa 9 MPa (Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage ≈ 4 MPa) und Reibungswinkeln von etwa 37 Grad,
- Bruchdeformationen des Anhydrits in Abhängigkeit vom Manteldruck von 0,2 bis 0,5 %,
- Nichtlineare Restfestigkeiten auf den Klüften in Abhängigkeit vom Manteldruck (für $\sigma_3 = 0$ mit Kohäsionen 0/0/0 bzw. Reibungswinkeln 60/55/53 Grad sowie für $\sigma_3 = 20$ MPa* mit Kohäsionen 16/9/13 MPa bzw. Reibungswinkeln 42/42/25 Grad jeweils für A3/anhydrit. und magnesit. Zone des T3/Rotbrauner Salzton und Sandflaserlage des T3),
- Überwiegend kein feststellbares Kriechverhalten bei bergbaurelevanten Differenzspannungen bzw. Temperaturen beim Anhydrit und den anhydritischen und magnesitischen Lagen des Grauen Salztons sowie eher elasto-plastisches Materialverhalten beim Rotbraunen Salzton und der Sandflaserlage,
- Gaspermeabilitäten ohne nachweisbare Abhängigkeit von der minimalen Druckeinspannung im intakten Anhydrit von etwa 10^{-24} m² und von 10^{-23} m² bis 10^{-17} m² im geklüfteten Anhydrit sowie von 10^{-23} m² bis 10^{-17} m² im Salzton in Abhängigkeit von der Konsolidierungsdauer.

*Eine minimale Druckeinspannung von 20 MPa ist ein Beispielwert, der repräsentativ für eine Endlagerteufe > 800 m ist.

Generell sind der Anhydrit und Graue Salzton im Vergleich zum Wirtsgestein Steinsalz wesentlich fester und steifer und werden deshalb bei Hohlraumauffahrungen im Salz die Gebirgsspannungen auf sich ziehen. Ein Erreichen der Festigkeitsgrenze des intakten Gesteins ist nicht zu besorgen, während in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad und Einspannungszustand die gegenüber der Gesteinsfestigkeit verringerten Gebirgsfestigkeiten in geklüfteten Bereichen überschritten werden können. Dies ist jedoch, wie die

Modellrechnungen zum Staßfurter Sattel zeigten, an eine Abminderung der Festigkeitsparameter infolge starker Klüftigkeit gebunden.
Während bei minimalen Druckeinspannungen von σ_3 = 20 MPa das Steinsalz eine Kurzzeitfestigkeit von etwa 88 MPa und ein Langzeitfestigkeit von etwa 44 MPa aufweist, zeigten die Laborversuche Kluftfestigkeiten des Anhydrits von 156 MPa und der anhydritischen und magnesitischen Zonen des Grauen Salztons von 130 MPa. Lediglich die weniger festen Bereiche des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage liegen mit Kluftfestigkeiten von etwa 83 MPa zwischen den Lang- und Kurzzeitfestigkeiten des Steinsalzes. Die entsprechenden Kohäsionen und Reibungswinkel für σ_3 = 20 MPa sind oben angegeben.
Zum Vergleich: Der E-Modul des Steinsalzes beträgt etwa 25 GPa ($\nu \approx 0{,}25$), die uniaxiale Kurzzeit-Druckfestigkeit 25 bis 30 MPa und die Langzeitfestigkeit etwa 50 % der Kurzzeitfestigkeit.

Bezüglich der Permeabilität gegenüber Stickstoff lässt sich schlussfolgern, dass kompakter Anhydrit als gasdicht einzustufen ist. Dies gilt für $p_{Gas} < \sigma_3$, wobei der Gasdruck aber auch die minimale Druckeinspannung σ_3 bis zum Betrag der Zugfestigkeit überschreiten konnte. Geklüfteter Anhydrit und Salzton sind bei vergleichbaren Belastungsbedingungen gasdurchlässiger, wobei jedoch ein ausreichender Kluftflächenanteil in den durchgehenden Klüften gegeben sein muss. Die Permeabilitäten liegen in der Größenordnung bis 10^{-17} m².

Da für einen belastbaren Integritätsnachweis zuverlässig der Gebirgsspannungszustand im Anhydrit und den benachbarten Gebirgsschichten ermittelt werden muss, wurde ein erheblicher Aufwand in die Entwicklung von Messausrüstungen und Verfahren sowie in die Ableitung von Spannungs- und Dichtheitskriterien investiert.
Die Resultate der Würfelfracversuche am Steinsalz, Salzton und Anhydrit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Beim Aufriss im Steinsalz bildet sich keine scharf begrenzte Rissfläche, verbunden mit einem deutlichen Innendruckabfall, aus, sondern es kommt zu einer verstärkten Permeation entlang der Korngrenzen in einer räumlichen Zone und bei konstanter Injektionsrate wird der Innendruckanstieg im Rissgebiet geringer. Die Rissflächen (penetrierte Gefügebereiche) richten sich überwiegend entsprechend der Spannungsgeometrie am Würfel aus. Die Rissfläche wird von der maximalen und mittleren Hauptspannungsrichtung vorgegeben. Mit einer Erhöhung der Normalspannung zur Rissfläche konnte das Rissgebiet nicht verdichtet und der Abströmwiderstand entlang der Rissfläche nicht erhöht werden. Nach dem Hydrofrac fiel der Bohrlochinnendruck sehr schnell ab und das Fracfluid trat an der

Würfelaußenseite aus. Trotz des deutlichen Hydrofracs waren im Permeationsgebiet noch zahlreiche Materialbrücken vorhanden und die Prüfwürfel blieben nach dem Ausbau intakt.
Bei der Spannungssondierung im Steinsalz muss bzgl. der Injektionsrate ein Kompromiss zwischen der Überschätzung der Aufreißfestigkeit bei zu hohen Raten sowie der nur bei höheren Raten eindeutigen Rissausrichtung nach der Spannungsgeometrie gefunden werden. Mit Injektionsraten, die Drucksteigerungsraten von 20 bis 50 MPa/h entsprechen, konnte die Rissentstehung eindeutig der Minimalspannung zugeordnet werden. Dies war bei axialen und normalen Rissen der Fall. Eine Zuordnung der Aufreißspannung zur elastischen Tangentialspannung am Bohrloch war nicht möglich. Die Zugfestigkeit beträgt etwa 2 MPa.

Der Riss im Salzton zeigte sich in der Druckkurve mit einem schlagartigen Druckabfall. Als Gesteinsfestigkeit wurde ein Wert von etwa 7 MPa ausgewiesen, der analog zum Steinsalz bei hohen Drucksteigerungsraten vergrößert ist. Ein mehr oder weniger konstanter Abströmwiderstand nach dem Riss konnte auch im Salzton nicht ermittelt werden und es kam zu einem vollständigen Bohrlochinnendruckabfall. Es existierte eine Schar von geöffneten Rissen, die den Würfel axial und normal durchtrennten. Die Ursache für die unterschiedlichen Richtungen war in der inhomogenen Gefügeausbildung zu suchen. Die Hauptrisse orientierten sich jedoch entsprechend der Spannungsgeometrie. Eine Korrelation zur elastischen Tangentialspannung am Bohrloch war gleichfalls nicht erkennbar.

Beim Anhydrit wurden Injektionsraten (Spindelöl mit Fluoreszin) von 20 - 50 ml/h gewählt, die zu Innendruckraten von etwa 400 MPa/h führten. Bei allen Versuchen stellten sich die Risse entsprechend der Spannungsgeometrie ein. Besonders auffällig waren der schlagartige Druckabfall nach dem Aufriss und die Ausbildung einer scharf begrenzten Rissfläche. Diese Rissfläche kann sich in Einzelfällen auch verzweigen und ist meist nur an einer Seite der Bohrung ausgebildet. Der Zerlegungsgrad in der Rissfläche war unvollständig und der Würfel blieb nach dem Ausbau intakt. Die Aufreißspannung war eindeutig der Minimalspannung zuzuordnen, wobei für den Anhydrit eine Zugfestigkeit von 1 - 5 MPa anzusetzen ist. Eine Interpretation der Aufreißspannung gemäß der elastischen Tangentialspannungsverteilung am Bohrloch war nicht anwendbar. Nach dem Abschalten der Pumpe stellte sich auch im Anhydrit kein Ruhedruck entsprechend der Minimalspannung ein.

Mit konstanten Injektionsraten konnten im Anhydritwürfel nach dem Riss stationäre Strömungsverhältnisse über die geringe Distanz von der Bohrung bis zur Außenseite realisiert und die Risstransmissibilitäten (bzw. -permeabilitäten) ermittelt werden. In den Versuchen wurde festgestellt, dass die Risspermeabilität, wenn auch nur gering, von der

Spannung normal zum Riss abhing. Es sollte untersucht werden, ob dies auch in situ in Abhängigkeit von sich ändernden Gebirgsspannungen der Fall ist.

Für die späteren In-situ-Spannungssondierungen wurden aus den Laborversuchen folgende Schlussfolgerungen abgeleitet:

- Die Sondierungsbohrungen aus den Untersuchungsorten müssen nicht parallel zu einer Hauptspannungsrichtung verlaufen. Mit der Bohrlochrichtung kann keinesfalls die Risslage vorbestimmt werden (z.B. beabsichtigte normale oder axiale Risslage).
- Der Riss wird sich immer am lokalen Spannungsfeld orientieren und kann demzufolge auch schräg zur Bohrlochachse verlaufen. Im unmittelbaren Hohlraumkonturbereich ist immer ein Riss parallel zur Kontur zu erwarten. Die Minimalspannungsrichtung entspricht der Flächennormale.
- Bezüglich der untersuchten Salinargesteine einschließlich des Hauptanhydrits und Grauen Salztons zeigte sich eindeutig, dass mit der Hydrofrac-Spannungssondierung nur eine Aussage zur minimalen Hauptspannung abgeleitet werden konnte. Eine Anwendung der elastischen Auswertebeziehung zur Bestimmung der maximalen Hauptspannung aus dem Aufreiß- und Ruhedruck war auf Grund der Relaxation der Tangentialspannung bzw. der Tangentialspannungsabsenkung infolge einer Fluidpermeation in den Mikrorissen an der Bohrlochkontur (beide Prozesse finden vor dem eigentlichen Hydrofrac statt) nicht möglich. Die der theoretischen Auswertung zugrunde liegende axiale Risslage konnte ohnehin nicht sicher gewährleistet werden.
- Wenn die Spannungssondierung mit einer elektrischen Pumpe mit Volumenstromregelung durchgeführt wird, sollte die Innendruckrate bis zum Aufriss in einem Bereich von 20 bis 50 MPa/h liegen. Der Aufreißdruck repräsentiert dann die Summe aus bekannter Zugfestigkeit des Gesteins und Minimalspannung. Neben dem Ruhedruck steht somit ein zweiter Messwert zur Identifikation der Minimalspannung zur Verfügung, welcher zur Überprüfung des Ruhedruckes genutzt werden sollte. In den meisten Gesteinen wird die Ruhedruckeinstellung überlagert von einer Fluidpermeation und es ist keine absolute Druckkonstanz zu erreichen.
- Der Aufriss im Anhydrit und Salzton zeigt sich mit einem deutlichen Druckabfall, während im Salzgestein der Wendepunkt der Druckkurve zum geringeren Anstieg hin die verstärkte Fluidpermeation an der Bohrlochkontur anzeigt.
- Die Mikrorisse im Anhydrit oder in den penetrierten Bereichen im Salzgestein besitzen sehr geringe Öffnungsweiten, so dass eine Rissortung mit Bohrlochkamera oder Abdruckpacker als sehr schwierig erscheint. Außerdem kann nur die Bohrlochkontur visualisiert werden. Als eher erfolgversprechend wurde für die In-situ-Versuche eine

Risslokalisierung mittels der Schallemissionsanalyse konzipiert und messtechnisch entwickelt.

11.3 Analyse des historischen Bergbaus am Staßfurter Sattel hinsichtlich des Integritätsverlustes im Hauptanhydrit

Die oben dargelegten Untersuchungsergebnisse zum gesteinsmechanischen Verhalten und zur Dichtheit lassen den Integritätsverlust der geologischen Barriere über den Hauptanhydrit als unwahrscheinlich bzw. das Hauptanhydritszenario als ungerechtfertigt erscheinen: Der Anhydrit besitzt eine hohe Festigkeit, die auch bei Spannungsumlagerungen (-erhöhungen) infolge des Steinsalzkriechens nur zu Bruchteilen ausgenutzt wird. Es sind weder Plastifizierungs- noch Kriechprozesse nachweisbar. Die existierenden Klüfte sind in der Regel mit sekundären Mineralen verwachsen und nur in seltenen Fällen an den Hohlraumkonturen in geringer Teufe des Bergwerkes geöffnet. Im eingespannten Gebirge außerhalb des Hohlraumeinflusses und Teufen > 800 m wurden keine geöffneten Klüfte mehr festgestellt. Auch in geklüfteten Bereichen waren in Laborversuchen hohe Festigkeiten und relativ geringe Permeabilitäten feststellbar. Selbst nach einem Hydrofrac im Prüfkörper lagen die Permeabilitäten gegenüber Stickstoff noch in der Größenordnung von 10^{-19} m². Es lässt sich deshalb die Schlussfolgerung ziehen, dass der Hauptanhydrit im eingespannten Gebirge ohne Hohlraumeinfluss primär dicht ist und die geologische Barrierefunktion nicht beeinträchtigt.

Bei einer umfassenden Problemdiskussion müssen jedoch die in der Vergangenheit des Kali- und Steinsalzbergbaus trotzdem verursachten Integritätsverluste berücksichtigt werden. Aus einer Analyse der Ursachen und notwendigen Randbedingungen lassen sich Rückschlüsse hinsichtlich der zukünftigen Vermeidung ziehen. Die Feststellungen im Abschnitt 2, dass ein Lösungszutritt nur eintreten kann, wenn

- die Kluftöffnung und der Kluftflächenanteil in der Kluft infolge der Entspannung oder durch Festigkeitsüberschreitung ausreichend groß sind, um einen zusammenhängenden Fließweg zu schaffen,
- der Fließweg ein Lösungsreservoir erschließt und
- die hydraulische Druckdifferenz und die integrale Permeabilität ausreichend groß sind, um einen merklichen Zutritt auszulösen,

wurden am Beispiel des historischen Kali- und Steinsalzbergbaus an der Südwestflanke des Staßfurter Sattels bewertet. Insgesamt ließen sich aus den Untersuchungen zum Staßfurter Sattel folgende Schlussfolgerungen bzgl. des Anhydritszenarios ziehen:

- Die Klüftigkeit innerhalb des T3/A3 wechselte lokal stark. Bereiche geringer und starker Klüftung lagen oft eng beieinander und Zonen ohne visuell feststellbare Klüfte waren trotzdem über Mikrorisse durchlässig. Die Kluftsysteme standen untereinander in Verbindung und bei der Abdämmung einer Kluft verstärkten sich die Zuflüsse über eine andere.
- Die Abdichtungsversuche einer Kluft oder die Ausmauerung eines besonders klüftigen Teils der T3/A3 - Schichten konnte deshalb nur einen kurzzeitigen Erfolg bringen. Die kraftschlüssige Anbindung der „Großen Mauer“ am Rotbraunen Salzton war auf Grund des gebrächen Charakters dieser Schicht ohnehin fraglich.
- Auffahrungen in den klüftigen Schichten führen grundsätzlich zu einer Auflockerung und weiteren Kluftöffnung. Diese konnten nicht nur keinen Erfolg bringen, sondern waren auch gebirgsmechanisch schädlich.
- Die jahrelangen Wasserhebungsmaßnahmen verursachten einen Wasserkreislauf, der noch vorhandene Kluftfüllungen löste und die Durchlässigkeit der Gebirgsschichten weiter vergrößerte. Am Rand der Markscheidepfeiler führte diese Tätigkeit bei aufgeschlossenen T3/A3 - Schichten zur Vergrößerung der Durchlässigkeit zwischen abgesoffenen und noch trockenen Gruben.
- Die Ursachen für die primären Wasserzuflüsse lagen bei der unzureichenden Standsicherheit der Pfeiler und Schweben im Carnallititflöz, der Annäherung des Abbaus an den Salzspiegel und der langen Standzeit ohne Versatz. Die Brüche setzten sich im Hangenden fort und erstreckten sich danach auf den nicht mehr allseitig eingespannten Hauptanhydrit.
- Wenn dann in diesen Bereichen auch die Leinesteinsalzüberdeckung fehlt, kann es zu verstärkten Wasserzuflüssen aus dem Deckgebirge und zu Tagesbrüchen kommen. Das hangende Leinesteinsalz besitzt eine entscheidende Trag- und Dichtfunktion und kann bei ausreichender Mächtigkeit auch intensiv gebaute kleinere Abbaufelder bruchfrei vor übertägigen Wasserzuflüssen schützen.
- Infolge der Hohlraumwirkung kam es zu Kluftöffnungen im Anhydrit und Salzton von wenigen Millimetern. Entscheidend für den Integritätsverlust des Markscheidepfeilers zwischen Achenbach und Hammacher-Agathe waren Absenkungen der minimalen Druckeinspannung bis in das Hangende des Pfeilers hinein mit einhergehenden Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften. Gleichzeitige Lösungsprozesse des Carnallits in den Klüften sind nicht auszuschließen. Die ersten Zuflüsse traten in Hammacher-Agathe

auf der 360 m Sohle ein. Die Laugen standen zu dieser Zeit seit einem Jahr in Achenbach bei etwa 300 m Teufe. Der Flüssigkeitsdruck betrug damit 0,7 bis 0,8 MPa. Die berechneten minimalen Druckeinspannungen im Hangenden der Großkammern und des Markscheidepfeilers (in größeren zusammenhängenden Bereichen kleiner als 0,7 MPa) waren geringer und entsprechend der Bedingung $p_{Fluid} > \sigma_{min}$ muss mit einem Integritätsverlust gerechnet werden. Eine zusätzliche Zugfestigkeit war angesichts des hohen Zerlegungsgrades und bei den stattfindenden Lösungsprozessen der Kluftmineralisationen auszuschließen.

- Die durch die Auffahrung der Großkammern verursachten Kluftöffnungen veränderten sich in der jahrzehntelangen Standzeit nur unwesentlich und wurden infolge der hydrostatischen Lösungsdrücke nicht wieder verringert.
- Wenn in ein Salzbergwerk Tageswässer zutreten und entlang des Zutrittspfades fortwährende Lösungsprozesse die Durchlässigkeit erhöhen, werden die Grubenbaue nach den Staßfurter Erfahrungen absaufen. Abdichtmaßnahmen hatten in keinem Fall einen längerfristigen Erfolg. Die kontrollierte Flutung über Bohrungen mit einer Eintrittsstelle und Aufsättigungsstrecken außerhalb von bewohnten Gebieten ist dann die einzig sinnvolle und zumindest die Schäden an der Tagesoberfläche begrenzende Maßnahme.

Solche langjährigen Zutritte ungesättigter Salzlösungen mit einhergehenden Auflösungsprozessen sind in einem Endlager für radioaktive Abfälle undenkbar (siehe Kapitel 2: Abgrenzung der Aufgabenstellung). Die geschilderten historischen Ereignisse waren an einen Salzsattel mit starker tektonische Strukturierung und abgeminderter Gebirgsfestigkeit (geogen geringes Isolationspotential), große Hohlraumabmessungen für Gewinnungszwecke, lange versatzfreie Standzeiten und die unmittelbare Nähe der Abbaue zum grundwasserführenden Deck- und Nebengebirge ohne Schutzschichten gebunden. Die Barriereninteg rität in benachbarten Bergwerken war bereits überschritten und im Absaufen begriffen. Dies sind alles Ausschlusskriterien für den Standort eines Endlagers.

Trotzdem bleibt das Fazit, dass allein die Entspannungswirkung der Abbauhohlräume offensichtlich den geogenen Zustand (Öffnungsweite, Durchlässigkeit) in den Anhydritklüften verändert hat. In den folgenden Arbeitspaketen wurde deshalb in untertägigen Messeinsätzen diese Entspannungswirkung ermittelt und untersucht, unter welchen Bedingungen (Spannungszuständen) es im Anhydrit zu einer Rissbildung bzw. Öffnung natürlicher Klüfte kommt, wie diese Wegsamkeiten ausgebildet sind (Reichweite, Öffnungsweite, Kluftflächenanteil) und welche hydraulischen Konsequenzen abgeleitet werden müssen.

11.4 In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung des Spannungszustandes an den Messorten und der Deformationen bei der Messkammerauffahrung sowie Weiterentwicklung der Messverfahren

Das Untersuchungsziel bestand darin, an den Aufschlüssen

- Hauptanhydritkammer Pöthen in 1013 m Teufe,
- Salztonstreckenaufschluss Pöthen in 1013 m Teufe,
- Hauptanhydritkammer Bernburg in 510 m Teufe,
- Salztonstreckenaufschluss Bernburg in 410 m Teufe.

die sekundären, d.h. die sich um die untertägigen Hohlräume ausbildenden, Spannungs- und Verschiebungsfelder zu erfassen und mittels der im Labor ermittelten Grenzwerte zu bewerten. Weiterhin war beabsichtigt, die Gebirgsspannungsrichtungen außerhalb der Entlastungswirkung durch die Hohlräume mit den tektonischen Vorzugsrichtungen (Kluftrichtungen) zu vergleichen.
Neben den Spannungsmessungen mit dem Bohrlochschlitzverfahren und Hydrofrac erfolgten in den Messkammern auch Hohlraumkonvergenzmessungen, wobei infolge der Vorinstrumentierung in der Anhydritmesskammer in Bernburg auch deren Deformationen bei der Auffahrung aufgezeichnet werden konnten.
Die Messkammer Pöthen wurde in einem horizontal gelagerten und tektonisch ungestörten Anhydritbereich und die Messkammer Bernburg in einer Wallstruktur mit überdurchschnittlicher Mächtigkeit aufgefahren. Die Messorte im Salzton wurden über schon bestehende Strecken mit Bohrungen aufgeschlossen und befinden sich in beiden Gruben in steil stehenden Faltenstrukturen.

Zur Ermittlung der Hydrofrac-Risslagen im Anhydrit wurden in Pöthen zunächst Abdruckpacker entwickelt, die jedoch auf Grund des sehr dichten Anhydritgefüges und der kaum erkennbaren Rissspur wieder verworfen werden mussten. Erfolgreicher war ein Überbohren der Bohrlöcher mit einer Kernkrone. Die Kernbohrungen wurden so gesetzt, dass die Fracbohrlöcher außermittig verliefen und damit eine Kernorientierung möglich war. Bei allen Fracrissen außerhalb des Messkammereinflusses zeigte sich eine Ausrichtung in Richtung Nord-Süd bei steiler Risslage. Daraus ergibt sich, dass die sondierten minimalen Gebirgsspannungen horizontal in Richtung Ost-West wirken. Dieser Befund stimmte sehr gut mit den Ergebnissen der Bohrlochschlitzmessungen überein: Die Maximalspannung entspricht betragsmäßig dem Teufendruck und wirkt nahezu senkrecht. Die Minimalspannung liegt im Betrag an der Untergrenze des Streubereiches der Hydrofracresultate. Die nahezu horizontale Ausrichtung

der Minimalspannung nach ENE-WSW korreliert sowohl mit den Hydrofracrisslagen, als auch mit dem steilherzynen Kluftbefund des Hauptanhydritaufschlusses. Der Seitendruckkoeffizient $\lambda = \sigma_3/\sigma_1$ liegt mit 0,56 in dem Erwartungsbereich für ein Festgestein. Die beiden voneinander unabhängigen Spannungsmessverfahren haben damit einen Befund zum rezenten lokalen Spannungsfeld geliefert, der auch mit den in den Kluftlagen abgebildeten tektonischen Vorzugsrichtungen übereinstimmt.
Die nach der Auffahrung der Kammer eingebauten Extensometer zeigten über einen Zeitraum von über zwei Jahren nur sehr geringe Dehnungen im Bereich der Messgenauigkeit. Eine Konturauflockerung bzw. Kammerkonvergenz war nicht zu erkennen.

Im Ergebnis der Minimalspannungssondierungen am Salztonstreckenaufschluss Pöthen lässt sich feststellen, dass der Spannungsaufbau im Hartsalz und Leinesteinsalz nahezu identisch ist und auch kaum Unterschiede zum festen und überwiegend elastisch reagierenden Hauptanhydrit sowie zum Anhydritischen Grauen Salzton und zur Magnesitbank zeigt. In den Zonen des Grauen Salztons mit einer mittleren Festigkeit (Braune Sandflaserlage) haben offensichtlich Streckenkonturbereiche bis in etwa 9 m Konturtiefe mit Entfestigungserscheinungen reagiert, die dazu führten, dass der Spannungsaufbau bis zum konstanten Niveau flacher verläuft. Deutlich unterschiedlich stellt sich der Spannungsaufbau in der Zone mit der geringsten Festigkeit, dem Rotbrauen Salzton dar. Hier konnte nur an einem Messpunkt in 12,5 m Stoßteufe die Gebirgsspannung zuverlässig ermittelt werden. An den anderen Messpunkten war infolge von Entfestigungen im Konturbereich eine signifikante Spannungsreduzierung und verringerte Dichtheit des Untersuchungsabschnittes festzustellen.

Da infolge der Aufzeichnung der Hohlraumkonvergenzen der Anhydritkammer in Pöthen bekannt war, dass der Anhydrit nach der Auffahrung kaum noch nachweisbare gebirgsmechanische Reaktionen (Konvergenzen, Spannungsumlagerungen) zeigt und auf Grund seiner kompakten Ausbildung und des hohen E-Moduls den elastischen Spannungs- und Deformationszustand im Wesentlichen beibehält, wurde in Bernburg der Untersuchungsschwerpunkt bei der messtechnischen Überwachung des Auffahrungsprozesses gesehen.
Die vor der Auffahrung in der Wallstruktur gemessenen minimalen Hauptspannungen besaßen den gleichen Betrag wie in Pöthen, obwohl die Teufe in Bernburg nur halb so groß ist. Eine Erklärung für die Höhe der Spannungen konnte mittels numerischer Modellrechnungen gegeben werden: Es wurde die achtjährige Standzeit der Auffahrungen des Wartungsplatzes mit einem Kriechansatz nachgebildet und infolge der Spannungsumlagerungen auf den steifen Hauptanhydrit insbesondere im zukünftigen Auffahrungsbereich für die Messkammer an der Schichtgrenze eine deutliche Spannungserhöhung berechnet. Die

Spannungserhöhung in der Nähe von steifen Gebirgsschichten infolge der Kriechprozesse im Steinsalz ist ein typischer und in Salzbergwerken häufig beobachteter Prozess.
Die Lage der Hydrofracrisse wurde im Anhydrit Bernburg mit Schallemissions(SE)messungen bestimmt. Alle Risse zeigten eine halbsteile Lage mit Streichrichtung Nord-Süd und einem Einfallen unter etwa 50 - 80 Grad nach Ost. Damit liegen die Risse tangential zur Oberfläche der Anhydritwallstruktur an der nordwestlichen Begrenzung der Steinsalzeinmuldung. Auch der aus den Bohrlochschlitzmessungen abgeleitete räumliche Hauptnormalspannungstensor zeigt eine Orientierung an der Schichtgrenze zwischen Anhydrit und Steinsalz. Die mittlere und maximale Hauptspannung spannen eine Ebene auf, die etwa den Hydrofracrissen entspricht. Die Maximalspannung ist um 75 % größer als der Teufendruck und wirkt nahezu seiger. Die Minimalspannung stimmt betragsmäßig mit der Untergrenze der Hydrofracmessungen überein. Ihre horizontale Wirkrichtung WSW-ENE korreliert mit der beim Hydrofrac auftretenden Wirkrichtung. Der Seitendruckkoeffizient $\lambda = \sigma_3/\sigma_1$ beträgt 0,67. Gleichfalls ist, wie schon in Pöthen, eine Übereinstimmung mit der vorherrschenden Kluftlage in der Anhydritkammer festzustellen. Mit beiden Spannungsmessverfahren lässt sich auch an diesem Messort ein übereinstimmender Spannungstensor finden, der ebenfalls mit den tektonischen Beanspruchungsrichtungen korreliert.

Auf Grund der günstigen Auffahrungssituation bestand in Bernburg die Möglichkeit, die Deformationen bei der Auffahrung der Anhydritkammer mittels Stangenextensometern von benachbarten Strecken aus zu messen. Danach wurden in einem zweiten Schritt weitere Extensometer in der aufgefahrenen Kammer installiert und die Konturauflockerungen nach der Auffahrung aufgezeichnet. Da sich bei den Messungen in Pöthen gezeigt hatte, dass eine manuelle diskontinuierliche Ablesung zu stark streuenden Resultaten führt, wurde eine kontinuierliche elektrische Messung vorgenommen. Die Auffahrung erfolgte mittels Sprengen in vier Abschlägen. Abgesehen von Konturauflockerungen infolge der Sprengwirkung streuten bei der Auffahrung alle Messwerte um die Genauigkeitsgrenze der Wegaufnehmer von 0,01 mm. Da die begleitenden numerischen Modellrechnungen Entspannungsverschiebungen von 0,5 bis 1,6 mm erwarten ließen, wurde diese nicht nachweisbare Entspannung mit der ungenügenden Eignung der Stangenextensometer für solche geringen Messgrößen begründet. Auch bei der folgenden kontinuierlichen Hohlraumkonvergenzmessung in der Anhydritkammer in einem Zeitraum von über 3,5 Jahren waren die Konturauflockerungen mit Raten von 0,01 bis 0,02 mm/a für bergbauliche Bedingungen praktisch unbedeutend. Auffallend war aber bei der gewählten hohen Auflösung ein jahreszeitlicher Gang einer scheinbaren Konvergenz im Winter und Divergenz im Sommer, der mit einem Einfluss der wechselnden relativen Luftfeuchtigkeit im Bergwerk auf die Glasfaserstangen der Extensometer erklärt wurde. Ein zu berücksichtigendes

Kriechverhalten ließ sich aus dieser geringen Größenordnung nicht ableiten. In den 3,5 Jahren konnte praktisch keine Hohlraumkonvergenz im Anhydrit festgestellt werden.
Die Wallstruktur ist demzufolge in der gebirgsmechanischen Reaktion als massiv und kompakt mit einem sehr steifen elastischen Spannungs/Deformationsverhalten zu betrachten. Weder bei der Auffahrung, noch in einem mehrjährigen Messzeitraum danach konnten mit den verwendeten Messmitteln Entspannungs- oder Kriechdeformationen nachgewiesen werden. Visuell waren an der Kammerfirste nach einigen Jahren geringfügige Abschalungen erkennbar, die im Rahmen der üblichen bergbaulichen Kontrollmaßnahmen beraubt wurden. Weiterhin fiel eine Feuchtstelle an der Kammerortsbrust auf, wo aus einer vertikalen und steilherzyn streichenden Doppelkluft bis zur Gegenwart tropfenweise Salzlösung austritt.

Die Spannungssondierungen am Salztonstreckenaufschluss Bernburg waren auf Grund der Aufschlusssituation nur im begrenzten Umfang möglich. Grundsätzlich konnten die gleichen Spannungswechselwirkungen zwischen festen Partien und Bereichen mit Festigkeitsüberschreitungen festgestellt werden.

Die Festigkeitsgrenze des Hauptanhydrits wird bei den Auffahrungen bei weitem nicht erreicht und im Konturbereich ist bereits in geringen Tiefen der Aufbau der Gebirgsspannung nachweisbar. Ein vergleichbarer Befund liegt für die magnesitischen und anhydritischen Partien des Grauen Salztons vor. Im Rotbraunen Salzton und der Sandflaserlage ist im Konturbereich von Strecken und Kammern jedoch mit Entfestigungen zu rechnen, die spezielle bergbauliche Ausbaumaßnahmen erfordern. In größeren Konturtiefen konnten auch hier die ungestörten Gebirgsspannungen nachgewiesen werden.

Ein weiterer Bearbeitungsschwerpunkt lag bei der Weiterentwicklung des Equipments für Spannungsmessungen. Im Kapitel 7 sind die Konstruktion und der Bau einer neuen Hydrofracsonde mit integrierter SE-Rissortung sowie der Nachweis der Anwendbarkeit dargestellt. Gleichfalls wird im Kapitel 7 mit praktischen Anwendungsbeispielen gezeigt, dass mit einer neuen Auswertebeziehung für Bohrlochschlitzmessungen unter Berücksichtigung der Spannungsrelaxation an der Bohrlochkontur auch im Steinsalz die Hauptnormalspannungstensoren ermittelt werden können.

11.5 Ausgewählte In-situ-Untersuchungen im Hauptanhydrit und benachbarten Steinsalz zur Fluiddruckbelastbarkeit und Rissbildung

Es wurde untersucht, unter welchen Bedingungen eine Rissbildung einsetzt, wie sich der Riss ausbildet bzw. fortpflanzt und welche hydraulischen Parameter zuzuordnen sind. Da der

wirkende Gebirgsspannungszustand eine entscheidende Randbedingung für die Gebirgsintegrität darstellt, erfolgten die In-situ-Untersuchungen im Bergwerk Bernburg zunächst in einem abbaufreien Bereich und danach in einem Abbaubereich mit sich ändernden Gebirgsspannungen.

In einem abbaufreien Bereich wurde zur Detektion der Rissausbreitung im Anhydrit die Oberflächenradarmessung als Elektromagnetisches Reflexionsverfahren (EMR) eingesetzt. Die Anwendbarkeit ohne zusätzliche Bohrungen oder sonstige aufwendige messtechnische Vorbereitungsarbeiten ist relativ einfach, wobei die Sende- und Empfangsantenne lediglich an der Streckenstoßkontur auf Profillinien entlang geführt und die ausgesendeten elektromagnetischen Impulse nach der Reflexion wieder empfangen werden müssen. Da aus den Laborversuchen an den Anhydritwürfeln bekannt war, dass mit Reflektorstärken $< 10^{-2}$ mm gerechnet werden musste, wurde in Vorversuchen zunächst festgelegt, als Injektionsflüssigkeit eine konzentrierte Salzlösung zu verwenden. Diese versprach auch bei geringer Reflektorstärke in den Anhydritklüften ein hohes Reflexionsvermögen. Trotz intensiver Voruntersuchungen, hoher Datenqualität und guter Reproduzierbarkeit der Radargramme war es jedoch nicht möglich, die laugeerfüllten Fracrisse im Anhydrit zu detektieren. Auch bei der hohen Salinität war die Reflektormächtigkeit oder -erstreckung offensichtlich zu gering, um mit dem verwendeten Verfahren erkannt zu werden.
Zur Überprüfung und sicheren Klärung, ob es überhaupt zur Rissbildung parallel zum Stoß gekommen ist, wurden in einem Folgeversuch parallel zur Laugenverpressung Schallemissionsmessungen eingesetzt und die verpressten Fluidmengen gemessen. Dazu wurde die neu entwickelte Hydrofracsonde mit kombinierter Schallemissions-Rissortung eingesetzt. Mit einer begleitenden Messung mit Wegaufnehmern war die infolge Hydrofrac initiierte Öffnung eines stoßparallel liegenden Risses in einer Bohrlochtiefe von 1,9 m tatsächlich nachweisbar. Die Rissöffnung in einer radialen Entfernung vom Bohrloch von 0,5 m betrug 7 bis 8 µm und konnte nur an einem von 6 radial angeordneten Wegaufnehmern nachgewiesen werden. In diesem Bereich lag auch das Maximum der Schallemissionsereignisse. Alle anderen SE-Ereignisse waren diffus im Gebirge verteilt und zeigten, dass offensichtlich bei der Rissausbreitung das Gefüge nicht vollständig durchtrennt wird und noch zahlreiche Materialbrücken vorhanden sind. Diese Beobachtung stimmt mit den Würfelfracversuchen überein und erklärt den Misserfolg der Oberflächenradarmessung: Ein nicht zusammenhängendes Rissgebiet im Anhydrit mit Öffnungsweiten unter 10^{-2} mm ist offensichtlich nur sehr schwer zu detektieren.
Die bei einer Vielzahl von Hydrofracversuchen mittels der SE-Ortung angezeigte Ausbreitung der Rissgebiete war auf Entfernungen von etwa 2 bis 3 m von der Bohrlochkontur beschränkt. Eine signifikante Rissfortpflanzung war nur bei einer

Verpressung mit der Handpumpe (etwa 6 l/h) mit einer Geschwindigkeit bis 600 mm/min festzustellen. Unter Verwendung der elektrischen Dosierpumpe bei konstanten Injektionsraten von einigen hundert ml/h bis zu 0,5 l/h kam es zu Rissausbreitungsgeschwindigkeiten von 10 bis 50 mm/min. In der Schließphase bzw. bei sehr geringen Injektionsraten konnte keine Rissfortpflanzung mehr festgestellt werden. Die Ereignisse lagen dann im schon bekannten Rissgebiet und zeigten die Schädigung von noch existierenden Materialbrücken an. Ein Austritt des Fluids am Streckenstoß bei einer Entfernung bis zum Injektionsort im Bohrloch von 4 bis 7 m war nicht nachzuweisen. Als Fluid wurde dabei ein dünnflüssiges, mit Fluoreszin versetztes Spindelöl verwendet. Die Suche nach der Austrittsstelle am Stoß mittels einer UV-Lampe blieb erfolglos.
Mit einer grafischen Auswertebeziehung für instationäre Permeabilitätsmessungen im kompakten Anhydrit sowie in Partien mit geschlossenen und mit Sekundärmineralien gefüllten Klüften konnten Werte von 10^{-17} m² in 2 m bis 4 m Bohrlochteufe bis 10^{-19} m² im Bohrlochtiefsten (ca. 10 m) als Obergrenze bzw. von 10^{-19} m² in 2 m bis 4 m Bohrlochteufe bis 10^{-21} m² im Bohrlochtiefsten als Untergrenze ermittelt werden. Die Abhängigkeit von der Bohrlochteufe und damit der Einspannung war auf Grund der Würfelfracversuche zu erwarten. Der Streubereich der Permeabilitätswerte ergab sich aus den Messungen vor bzw. nach dem Hydrofrac, war aber auch stark von der geologischen Ausbildung des Anhydrits beeinflusst. Es war keine grundsätzlich höhere Permeabilität der geklüfteten und mit Carnallit verwachsenen Untersuchungsbereiche im Vergleich zum homogenen Anhydrit zu erkennen. Die tektonisch vorgeprägten Anhydritbereiche erhalten offensichtlich infolge der Kluftfüllung ihre ursprüngliche Gebirgsdichtheit zurück.

An einem Messort in den Steinsalzgewinnungsbereichen in Bernburg wurde untersucht, ob sich mit der Annäherung der 35 m hohen und 20 m breiten Abbaukammern bis auf eine Minimalentfernung von 100 m Änderungen des Gebirgsspannungszustandes zeigen bzw. inwieweit die hydraulischen Parameter in den untersuchten Anhydritbereichen beeinflusst werden. Die Bewertung des Steinsalzabbaus in der Grube Bernburg war dabei kein Gegenstand der Untersuchungen, sondern die Abbauannäherung sollte lediglich die Änderung des Spannungszustandes, dessen Einfluss auf die Barrierenintegrität bereits als wesentlich identifiziert wurde, bewirken. Die daraus resultierenden gebirgsmechanischen und hydraulischen Reaktionen wurden als deutlicher erwartet, als sie sich in einem Endlager im Salz ohne Gewinnungsbergbau einstellen werden.
In begleitenden Streckenkonvergenzmessungen konnte ein eindeutiger Abbaueinfluss nachgewiesen werden. Die Raten stiegen von 0,03 bis 0,06 ‰ pro Jahr zu Beginn der Messungen auf Maximalwerte von 0,17 ‰ pro Jahr während der Gewinnung des Abbaus 2111 und erreichten nach dem Ende der Abbautätigkeit wieder das Ausgangsniveau als

repräsentativen Wert für eine Steinsalzstrecke in dieser Teufe. Die Entwicklung des Spannungszustandes und der hydraulischen Parameter wurde in einzelnen Messkampagnen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt verfolgt. Mittels der Spannungssondierungen konnte bzgl. der Abbauannäherung keine Veränderung der Beträge oder Richtungen der minimalen Druckeinspannung nachgewiesen werden. Die stationären Permeabilitätsmessungen in den geogen angelegten natürlichen Anhydritklüften (geschlossen bzw. mit Carnallit gefüllt) zeigten eine integrale Permeabilität in der Größenordnung von 10^{-18} m². Der Außendurchmesser der Permeationsfront wurde dabei entsprechend der SE-Messwerte mit einem Mittelwert von 1,5 m gefunden. Es war weder ein signifikanter Permeabilitätsunterschied zwischen dem Hydrofracriss und den geschlossenen bzw. mit Carnallit gefüllten Klüften festzustellen, noch war eine zeitliche Veränderung mit der Abbauannäherung zu verzeichnen. Im Ergebnis steht fest, dass die Abströmwiderstände zwar die Fluidströmung in den natürlichen rauen Klüften mit unterschiedlichen Öffnungsweiten, Zerlegungsgraden und Mineralfüllungen repräsentieren, aber nicht die minimale Druckeinspannung. Lediglich die senkrecht zur Kluft wirkende Normalspannung wird ihre mittlere Öffnungsweite beeinflussen. Dieser Einfluss existiert aber nur neben den anderen genannten Einwirkungen und eine belastbar nachweisbare Änderung mit dem sich nähernden Gewinnungsbergbau konnte auch diesbezüglich nicht gefunden werden.
Die Annahme einer Permeation entlang des gesamten Prüfintervalls bei der stationären Permeabilitätsauswertung stellte eine Hypothese dar, die mittels der SE-Messungen begründet wurde. Die Zurückführung der Permeation auf eine singuläre Kluft bei radial symmetrischer Abströmung hätte zu Öffnungsweiten von 1 bis 3 µm geführt. Dieser Befund widerspricht, insbesondere für die carnallitgefüllte Kluft mit wesentlich größerer Öffnungsweite im Millimeterbereich, den Kern- und Bohrlochbefunden. Es besteht offensichtlich ein gravierender Unterschied zwischen der ingenieurgeologisch feststellbaren und der hydraulisch tatsächlich aktiven Kluftöffnung.

Die Schallemissionsmessungen am Messort zeigten deutliche Unterschiede zwischen intakten und stark geklüfteten Anhydritpartien. Im intakten Anhydrit waren die Rissflächen beim Hydrofrac schärfer abgebildet, jedoch durch wesentlich weniger Ortungen belegt und mit geringerer Reichweite als im Steinsalz. Bei allen Versuchen mit eindeutigen Rissflächen entstand der Riss am Injektionsintervall und breitete sich um das Injektionsintervall herum aus. Diese Tatsache spricht für ein intaktes Gestein im Injektionsintervall vor der Risserzeugung und es ist in diesem Fall davon auszugehen, dass die Schallemissions-Ereignisse auf eine Bildung neuer Risse zurückzuführen waren. Andere Beobachtungen deuteten darauf hin, dass die Ereignisse nicht durch die Bildung neuer makroskopischer Risse im Anhydrit generiert wurden, sondern eher durch ein Aufreißen von Materialbrücken

in natürlichen Klüften. Diese Aussage beruht darauf, dass teilweise die eingepresste Flüssigkeit an einigen Stellen ohne SE-Aktivität abströmen konnte, d.h., dass die Klüfte teilweise schon durchgängig waren. Eine signifikante SE-Aktivität war nur bei den hohen Injektionsraten feststellbar, unter denen sich die Risse und Klüfte weiter ausdehnten. Bei den niedrigen Injektionsraten konnten nur wenige oder keine Schallemissionen festgestellt werden. Die SE-Ortungen lagen zumeist in Schwerpunkten weit außerhalb der Injektionsstelle. Diesen Schwerpunkten waren entsprechend der Kernbemusterung natürliche Klüfte zuzuordnen. Die Flüssigkeit musste demnach von der Injektionsstelle aus durch das undichte Gestein zu der Kluft penetriert sein und die in diesen Fällen beobachtete „wolkenartige“ Verteilung der Ortungen war auf Verästelungen der Klüfte zurückzuführen.

Zusammenfassend war die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die Annäherung der Abbaufront lediglich die Konvergenz im Steinsalz, nicht aber den Einspannungszustand und die hydraulisch relevante Kluftöffnung im anstehenden Anhydrit beeinflussen konnte. Vergleichbare Resultate einer geringen Sensitivität der hydraulisch signifikanten Kluftöffnung gegenüber dem wirkenden Spannungszustand wurden auch in ETH ZÜRICH (1992) und GUEGUEN, Y.; BOUTECA, M. (2004) gefunden. Für ein Endlager im Salzgestein bei wesentlich geringeren Abmessungen der Auffahrungen ist abzuleiten, dass keine signifikante Änderung der geogen vorhandenen Barriereninteg rität im Anhydrit zu besorgen und es deshalb ausreichend ist, diesen geogenen Zustand zu untersuchen. Das impliziert jedoch, über die Permeation der unmittelbaren Hohlraumkonturbereiche hinauszugehen und der Durchlässigkeit von weit reichenden Klüften im Anhydrit verstärkte Aufmerksamkeit zu widmen.

Aus der Anwendung des kubischen Fließgesetzes auf Labor- und In-situ-Versuche wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass aus der geometrischen Öffnungsweite von Klüften und Rissen im Anhydrit nur bei nahezu vollständiger Durchtrennung und geringer Rauigkeit die hydraulisch aktive Öffnungsweite bzw. die Kluftpermeabilität aus dem Modell der planparallelen Platten abgeleitet werden kann. Bei den In-situ-Messungen waren in allen Fällen, wie mit den Schallemissionsmessungen nachweisbar, noch zahlreiche Materialbrücken im Rissgebiet vorhanden, so dass die Kluftpermeabilität um Größenordnungen niedriger liegen kann. Das kubische Fließgesetz ist deshalb nicht allgemeingültig anwendbar und die In-situ-Permeabilitätsmessungen sind für eine Analyse der Barriereintegrität unverzichtbar.

11.6 Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Porositäts- und Permeabilitätsbestimmung und Überprüfung der In-situ- und Labortests mit gekoppelten Modellrechnungen

Im Kapitel 9 wurde ein neuartiges Verfahren zur Ermittlung der Permeabilität und Porosität auf der Basis von Kurvenanpassungen an die instationären Druckabfallkurven nach Druckstoßtests vorgestellt. Nach dem Dichtheitsnachweis im Bohrlochbereich wird der Fluiddruck stoßartig auf einen Wert unterhalb der minimalen Druckeinspannung erhöht und in der Shut-In-Phase der Druckabfall beobachtet. Die Auswertung basiert auf der Vorstellung, dass es im abgeschlossenen Druckintervall unter der Voraussetzung der technischen Dichtheit der Anlage bei gegebener Packerfunktion nur dann zu einem Druckabfall kommen kann, wenn eine axialsymmetrische Strömung des Fluids in die zugänglichen Poren (effektiver Porenraum) des druckbeaufschlagten Konturbereiches gegeben ist, also eine Permeation stattfindet. Das Permeationsvolumen in den Poren der Bohrlochkontur wird als homogen verteilt vorausgesetzt und dem der Druckabfallkurve zugrunde liegenden Abströmvolumen aus der Druckkammer der Sonde gleichgesetzt. Mittels der mit einer Dosierpumpe gefundenen $\Delta p/\Delta V$-Anstiege vor den Druckstoßtests kann die Systemkompressibilität sehr genau bestimmt und damit aus dem Druckabfall das Abströmvolumen berechnet werden. Die Permeabilität lässt sich als Resultat einer Parameteridentifikation bei der Kurvenanpassung einer Modellfunktion finden, die auf dem axialsymmetrischen Volumenstrom beim instationären Druckabfall in der Shut-In-Phase basiert.
Die exemplarischen Auswertungen im Kapitel 9 zeigten die Bedeutung der geometrischen Abmessungen des Permeationsintervalls. Die hydraulischen Parameter können integral den Gesteinsschichten oder singulären Rissen und Klüften zugeordnet werden.

Die Zielstellung der hydraulisch-mechanisch gekoppelten Modellrechnungen bestand darin, die im Laborversuch an den Gesteinswürfeln und in situ untersuchten stationären und instationären Permeationsprozesse zu simulieren und die physikalischen Wechselwirkungen besser zu verstehen. Dieses Verständnis ist wesentlich für eine Bewertung und Prognose derartiger Prozesse in einem Endlager. In einem ersten Schritt wurde geprüft, ob sich die mit dem neu entwickelten Auswerteprogramm aus instationären Druckabfallkurven nach einem Druckstoßtest bestimmten Porositäten und Permeabilitäten mit Modellrechnungen bestätigen lassen. In einem zweiten Schritt wurde ein gleichfalls neu entwickeltes Rechenprogramm zur Modellierung von Kluftströmungen getestet. Dazu erfolgte die Vorgabe unterschiedlicher Fluidrandbedingungen (konstanter Innendruck bzw. konstante Injektionsrate) in gefracten Anhydritwürfeln und es wurde der Einfluss der Normalspannung

normal zu Rissfläche auf den Abströmwiderstand im Rissgebiet untersucht. Der Gegenstand in einem dritten Schritt bestand in der Anwendung des Rechenprogramms auf eine Untertagesituation und die Überprüfung, ob als Basis für eine Analyse weit reichender Fluidströmungen die in einer Anhydritkluft realisierte Fluidpermeation in größeren Stoßteufen nachvollzogen werden kann.

Die Anwendbarkeit der neu entwickelten Auswertemethode für die Permeabilitätsmessungen in situ wurde bestätigt. Mit einer feinen (engmaschigen) Vernetzung der Bohrlochkontur bis zu Elementgrößen von 0,2 mm konnten unter Vorgabe der gemessenen Druckabfallkurven die Permeabilitäten der Parameteridentifikation zugeordnet werden.
Weiterhin gelang es, auch die Strömungsprozesse in einer Einzelkluft in gefracten Anhydritwürfeln unter Vorgabe unterschiedlicher Fluidrandbedingungen (konstanter Innendruck bzw. konstante Injektionsrate) sowie die Abhängigkeit des Abströmwiderstandes im Rissgebiet von der Normalspannung nachzuvollziehen. Die relativ geringen Änderungen des Abströmwiderstandes und damit der hydraulischen Parameter in der Kluft bei vergleichsweise starken Änderungen der Normalspannung zur Kluft erklären, warum am untertägigen Messort in Bernburg keine Änderungen der hydraulischen Parameter nachweisbar waren. Die Gebirgsspannungsänderungen bei der Näherung der Abbaufront waren dabei noch kleiner.
Die Modellierung der Fluidströmung in einer untertägigen horizontalen Kluft entsprechend des In-situ-Versuches führte zu dem Ergebnis, dass sich die Fluidfront in einer natürlichen Kluft nur sehr langsam ausbreitet und sich auch nach 6 Monaten im Rechenmodell noch keine stationäre Strömung in der Kluft mit gleich großen Ein- und Austrittsraten eingestellt hat. Mit diesem Rechenergebnis war es plausibel, dass sich untertage tatsächlich kein Fluidaustritt am Stoß zeigte, obwohl das Hydrauliköl mit Fluoreszin versetzt war und der Streckenstoß mit einer UV-Lampe abgesucht wurde. Insbesondere die geringe Kluftpermeabilität und die Einspannung im Untersuchungsbereich ließen offensichtlich keinen schnelleren und betragsmäßig größeren Transport zu.

12. Schlussfolgerungen für das Anhydritszenario

Zusammenfassend kann aus den vorgelegten Untersuchungsergebnissen zur Barrierewirkung des Hauptanhydrits die Schlussfolgerung gezogen werden, dass auch in diesem geklüfteten Gestein eine hohe Dichtheit nachweisbar war. Der ungeklüftete und kompakte Anhydrit besaß zum Steinsalz vergleichbare Permeabilitäten. In den geschlossenen bzw. mit Sekundärmineralisationen gefüllten Klüften war die gemessene integrale Gebirgspermeabilität mit 10^{-19} m² ± 2 Größenordnungen begrenzt. Die wenigen geöffneten Klüfte mit Öffnungsweiten im Millimeterbereich waren auf die Konturbereiche beschränkt und außerhalb des Entlastungsbereiches der Hohlräume wieder zusammengedrückt. Die Kluftpermeabilität hing stark vom Zerlegungsgrad ab und war um Größenordnungen niedriger, als auf Grund der geometrischen Rissöffnung unter Anwendung des kubischen Fließgesetzes zu erwarten. Großräumige Änderungen der Gebirgsspannungen infolge des Gewinnungsbergbaus bewirkten keine Änderung dieser primären Dichtheit und Festigkeitsüberschreitungen konnten ausgeschlossen werden.

Infolge der Entspannungswirkung ist aber grundsätzlich ein hydraulischer Gradient für Strömungsprozesse im Salzgebirge eingeschlossener salinarer Lösungen in Richtung der bergmännischen Hohlräume gegeben. Mit einer geologischen und geophysikalischen Vorerkundung sollte deshalb ein Aufschluss der Anhydritschichten vermieden werden, d.h. der primäre Gebirgseinspannungszustand erhalten bleiben. Wenn das nicht gelingt, steht aber deswegen nicht die generelle Wirksamkeit der geologischen Barriere in Frage. Mit Zutritten hochmineralisierter intrasalinarer Lösungen ist beim Steinsalzbergbau immer zu rechnen und in den meisten Fällen sind die Zutritte auf Grund ihrer geringen Mengen für den Betriebsablauf unproblematisch. Die Wegsamkeiten im Anhydrit sind in einem solchen Fall auf singuläre Klüfte bzw. Kluftscharen begrenzt und in der Betriebsphase kann mit technischen Maßnahmen der Zementation der Zufluss gestoppt bzw. mittels Abdämmung die hydraulische Verbindung zu den Abfällen unterbunden werden. Eine Entstehung von Wegsamkeiten bis zur Biosphäre und der Zufluss von Wässern sind in einem Endlager bei dem im Vergleich zum Gewinnungsbergbau geringen Auffahrungsgrad unwahrscheinlich.

In der Nachbetriebsphase im dann versetzten Bergwerk mit sich ausgleichenden Gebirgsspannungen (Verringerung der Spannungsdifferenzen) geht der hydraulische Gradient für eine Fluidströmung in Richtung der Einlagerungshohlräume zunehmend verloren. Wird in einer Störfallanalyse trotzdem ein Zutritt salinarer Lösungen zu den Einlagerungshohlräumen unterstellt, würden sich zunächst die noch zugänglichen Porenvolumina füllen und es käme zu einem Fluiddruckaufbau. Danach wäre die

Hohlraumkonvergenz so gering, dass eine Verpressung von wesentlichen kontaminierten Lösungsmengen in die Biosphäre, die das Schutzziel überschreiten könnte, sehr unwahrscheinlich ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für eine Permeation bis in weit vom Einlagerungsort entfernte Gebirgsbereiche ein hydraulischer Überdruck über der minimalen Druckeinspannung notwendig ist. Der Überdruck entsteht bei der Auspressung der Lösung aus dem Bergwerk infolge Konvergenz gegen die Deckgebirgsschichten. Da aber vorher im Zutrittspfad eine hydraulisch ausreichende Durchlässigkeit hypothetisch vorausgesetzt wurde, kann sich kein signifikanter Überdruck aufbauen. Es ist nur eine sehr langsame Permeation in das Wirtsgestein mit der Hohlraumkonvergenz möglich. Im Rahmen von Szenarienrechnungen ist zu belegen, dass die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins und weiterer Isolationsbereiche gegenüber den Grundwasserleitern ausreichend groß ist, die ausgepresste Lösung, deren vorheriger Zutritt in einer Störfallanalyse lediglich theoretisch betrachtet wurde, aufzunehmen. Der Nachweis, dass in der Normalentwicklung des Endlagers die Isolationswirkung der geologischen Barriere einen Lösungszutritt von vornherein verhindern kann, besitzt Vorrang vor einer Störfallanalyse.

Im Übrigen stellt die Ausbildung von singulären Transportpfaden im Anhydrit ein hypothetisches Szenario unter ungünstigen Umständen dar, während bei den Endlagerkonzepten im kristallinen Gebirge Transportwege über Klüfte zum Normalfall gehören. Dieser Vorteil der radioaktiven Endlagerung im Salinar sollte deshalb im Vergleich mit den anderen Endlagerkonzepten hervorgehoben und das Isolationspotential des Endlagers im Salinar hinsichtlich des Anhydritszenarios nicht relativiert werden. Das Anhydritszenario sollte nicht a priori in einer Langzeitsicherheitsanalyse vorausgesetzt, sondern stattdessen geprüft werden, ob die Bedingungen für einen Lösungszutritt über den Anhydrit am konkreten Standort mit seinen spezifischen Randbedingungen und Einwirkungen überhaupt gegeben sind. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zu den notwendigen Verfahren und Kriterien.

Literaturverzeichnis

AHOLA, M. P.; MOHANTY, S.; MAKURAT, A. (1996): Coupled mechanical shear and hydraulic flow behavior of natural rock joints, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 79, Elsevier Science B.V.

AKEND (2002): Site Selection Procedure for Repository Sites, Recommendations of the AkEnd – Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites, W&S Druck GmbH, Dezember 2002

ARBEITSKREIS 3.3 DER DGGT (2009): Dreiaxiale Druckversuche an kreiszylindrischen Gesteinsprobekörpern – Kompressionsversuche, Neufassung der Empfehlung Nr. 2 des Arbeitskreises „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., z. Zt. in Überarbeitung

BAUMERT, B. (1928): Über Laugen- und Wasserzuflüsse im deutschen Kalibergbau, Dissertation Technische Hochschule Aachen, Druck Gebr. Gerstenberg, Hildesheim 1928

BAWDEN, W. F.; ET AL (1980): Influence of Fracture Deformation on Secondary Permeability-A Numerical Approach, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 265 to 279, Pergamon Press Ltd, Great Britain, 1980

BEHR, E.-M. (1960): Geologische Beobachtungen am Hauptanhydrit des Staßfurt-Egelner-Sattels im Bereich des Kaliwerkes Staßfurt Schacht VI/VII, Freiberger Forschungsheft C 90, Seite 88 bis 105, Berlin

BOCK, H.; KAMLOT, P.; MANTHEI, G. (2003): Stress and stress change measurements by hydraulic fracturing and borehole slotting in anhydrite roof strata of a rock salt mine, 5th International FMGM Symposium, Workshop on instrumentation and in-situ testing in repositories for radio-active waste, Oslo, 15th September, 2003

BOYCE, G. M.; ET AL (1984): Laboratory hydraulic fracturing stress measurements in salt, US Symposium on Rock Mechanics, Evanston Ill, June 25-27. 1984, New York

BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K. (1993): Geohydraulik, Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart

ETH ZÜRICH (1992): Modelling of Energy Production from Hot Dry Rock Systems, Final Report April 1992, Projekt 359

FESTSCHRIFT (1952): 100 Jahre Staßfurter Salzbergbau, Kreuz Verlag Halle

FESTSCHRIFT ZUM SALZLANDFEST STAßFURT (1992): 140 Jahre Salzbergbau 1852 – 1992, Staßfurter Bergmannsverein e.V., Staßfurt

FLAC, ITASCA (2005), Version 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota

FLEISCHER, S. (1960): Die stratigraphische, fazielle und tektonische Ausbildung des Hauptanhydrits auf dem Berlepsch-Maybach-Schacht in Staßfurt, Freiberger Forschungsheft C 90, Seite 52 bis 87, Berlin

FULDA, D. (1992): Staßfurt – die Wiege des Kalibergbaus, Vortrag anlässlich des 140jährigen Jubiläums der Staßfurter Kali- und Steinsalzindustrie, 04.07.1992, Staßfurt

FULDA, E. (1929): Über "Anhydrit-Klippen", Kali, Seite 120 bis 133, Halle

HÄFNER, F.; U.A. (1985): Geohydrodynamische Erkundung von Erdöl-, Erdgas- und Grundwasserlagerstätten, WTI des Zentralen Geologischen Instituts Berlin, Jahrgang 26/1985

GALE, J. E. (1987): Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, Proc. 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Tucson

GUEGUEN, Y.; BOUTECA, M. (2004): Mechanics of Fluid-Saturated Rocks, International Geophysics Series, Volume 89, ELSEVIER

HAIMSON, B.C. (1974): A simple method for estimating in situ stresses at great depth, ASTM Special Technical Publications Philadelphia

HAUSKE, K.-H.; FULDA, D. (1990): Kali, Das bunte, bittere Salz, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

HEIMLICH, K. (1959): Zum Karbonatgehalt des Hauptanhydrits (Zechstein 3) im nördlichen Harzvorland und Unstrutgebiet, Z. angew. Geol. 5, 10, Seite 442 bis 445, Berlin

HEMMANN, M. (1972): Ausbildung und Genese des Leinesteinsalzes und des Hauptanhydrits (Zechstein 3) im Ostteil des Subherzynen Beckens, Ber. deutsche Ges. geol. Wiss. Bereich Miner. Lagerstättenf. 16, 3, Seite 307 bis 411, Berlin

HERGET, G. (1988): Stresses in rock, Balkema Rotterdam

HESSMANN, W.; SCHWANDT, A. (1961): Zur Bruchtektonik im Salinar und Deckgebirge, Z. geol. Wiss., 9, 3, Seite 283 bis 292, Berlin

ITASCA (1998): FLAC - Fast Langrangian Analysis of Continua, Version 3.4, User's Manual, Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis - Minnesota

IWANO, M.; EINSTEIN, H. H. (1995): Laboratory experiments on geometric and hydromechanical characteristics of three different fractures in granodiorite, Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics

JUNG, W. (1958): Zur Feinstratigraphie der Werraanhydrite (Zechstein 1) im Bereich der Sangerhäuser und Mansfelder Mulde, Beih. Geologie, 24, Berlin

JUNG, W. (1960): Zur Feingliederung des Basalanhydrits (Z2) und des Hauptanhydrits (Z3) im SE-Harzvorland, Geologie 9, 5, Seite 526 bis 555, Berlin

JUNG, W.; KNITZSCHKE, G. (1961): Kombiniert feinstratigraphisch-geochemische Untersuchungen des Basalanhydrits (Z 2) und des Hauptanhydrits (Z 3) im SE-Harzvorland, Geologie, 10, 3, Seite 288 bis 301, Berlin

KAMLOT, P.; SCHWANDT, A. (1991): Zusammenfassung und Beurteilung des derzeitigen Wissensstandes über das geotechnische Verhalten von Anhydrit und Salzton (Arbeitspaket A), BMFT-Abschlußbericht 02 E 8241 mit Beiträgen von A. Schwandt, Oktober 1991

KAMLOT, P.; U. A. (1995): Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton (ANTON), BMBF-Abschlußbericht 02 E 8241 in 3 Bänden mit Beiträgen von R. Langbein und G. Manthei, August 1995

KAMLOT, P.; U. A. (1999): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON), BMBF-Abschlußbericht 02 E 8755 mit Beiträgen von G. Manthei, J. Philipp und T. Fechner, August 1999

KAMLOT, P.; U. A. (2002): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN), BMWi-Abschlußbericht 02 E 9158 mit Beiträgen von G. Manthei und H. Bock, August 2002

KAMLOT, P.; U. A. (2005): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN II), BMWA-Abschlußbericht 02 E 9582 mit Beiträgen von G. Manthei und H. Bock, März 2005

KAMLOT, P.; HARTKORN, P.; SCHREINER, W. (1994): Ergebnisse und neue Modellvorstellungen zur Interpretation von In-situ-Spannungs- und Deformationsmessungen im Salinargestein, Vortrag zum 11. Nationalen Felsmechanik Symposium, Aachen

KAMLOT, P.; MENZEL, W.; SCHREINER, W. (2000): Evaluation of load-bearing behaviour of mining pillars in salt mines in results from stress monitoring and geomechanical model calculations, 8th World Salt Symposium, The Hague, Mai 2000

KAMLOT, P.; BÖHNEL, H.; BOCK, H. (2002): Untersuchung gesteinsmechanischer Eigenschaften von Sylvinit, Teilbericht zum BMBF-Vorhaben 02 C 0820 „Zeitliche Veränderungen der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften“, Dezember 2002

KAMLOT, P.; U. A. (2006): Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachtanlage Asse in der Betriebsphase, Verfahrensunterlage für die Schließung des Bergwerkes Asse, Oktober 2006, zugänglich unter www.helmholtz-muenchen.de/asse/asse-home/

KEHLE, R.O. (1964): Determination of tectonic stresses trough analysis of hydraulic well fracturing, Journal of geophysical research 1964, vol. 69

KIERSTEN, P. (1983): Das Hydrofrac-Verhalten von Steinsalz in Abhängigkeit von der Probeneinspannung, der Druckrate, der Flüssigkeitsviskosität und der Standdauer.
Dissertation TU Clausthal

KONIETZKY, H.; TE KAMP, L.; KAMLOT, P. (1999): A simple procedure to model flow trough fractures and double porosity and it's practical application, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Proceedings of the international FLAC symposium on numerical modeling in geomechanics, Minneapolis, Minnesota, September 1999

KOSMAHL, W. (1956): Die Petrographie des Hauptanhydrits auf der NE-Flanke des Staßfurt-Egelner Sattels, Unveröffentlichte Dipl.-Arbeit, Geol-Paläont. Institut der Humboldt-Univ. Berlin

Krzywicki, E. (1949): Die Geologie des Kali und Steinsalzbergwerkes Bartensleben/Allertal, Unveröff. Archiv GD Halle, Berlin

LANGBEIN, R. (1961): Zu Petrographie des Hauptanhydrits (Z 3) im Südharz, Chemie der Erde 21, Seite 248 bis 264, Jena

LANGBEIN, R. (1963): Geochemische Untersuchungen an Salztonen des Zechsteins im Südharz-Kalirevier, Chemie der Erde, 23, Seite 1 bis 70, Jena

LANGBEIN, R. (1965): Zur Petrochemie des Hauptanhydrit-Plattendolomit-Übergangsprofils, Geologie 14, Seite 47 bis 57, Berlin

LANGBEIN, R. (1968): Zur Petrologie des Anhydrits, Chemie der Erde, 27, Seite 1 bis 38, Jena

LÖFFLER, J. (1962): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der DDR, Teil III Sachsen Anhalt, Freiberger Forschungsheft C 97/III, Berlin

LOTZE, F. (1957): Steinsalz und Kalisalze, Verl. Gebr. Bornträger, Berlin

MANTHEI, G. (2005): Ein Beitrag zur Bestimmung der Quellmechanismen von hochfrequenter akustischer Emission im Steinsalz, Dissertation Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg

MANTHEI, G.; EISENBLÄTTER, J.; KAMLOT, P.; HEUSERMANN, S. (1998): Acoustic emission measurements during hydraulic fracturing tests in a salt mine using a special borehole probe, 14th International Acoustic Emission Symposium & 5th Acoustic Emission World Meeting, Big Island, Hawaii, August 1998

MANTHEI, G.; EISENBLÄTTER, J.; KAMLOT, P. (2003): Stress measurements in salt mines using a special hydraulic fracturing borehole tool, GTMM-Symposium Geotechnical Measurements and Modelling, Karlsruhe, September 2003

MINKLEY, W.; WÜSTE, U. (1979): Nichtlineare Festigkeitskriterien für Gesteine und Gesteinstrennflächen, Neue Bergbautechnik, 9. Jg., Heft 6, Seite 310 bis 314

MOSLER, H. (1966): Der Stoffbestand und Fossilinhalt des Grauen Salztons im südlichen Bereich der DDR, Freiberger Forschungsheft C 201, Seite 94 bis 121, Leipzig

MÖNIG, J. (2007): Methods for Assessing the Performance and Safety Relevance of Geotechnical Barrier Systems in a Repository in Rock Salt, Presentation International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations, Braunschweig, 2007

PAUL, A.; GARTUNG, E. (1991): Empfehlung Nr. 15 des Arbeitskreises 19, Versuchstechnik Fels der DGEG: Verschiebungsmessungen längs der Bohrlochachse (Extensometermessungen), Bautechnik 68, Heft 2, 41 – 48

POPP, T. (2002): Transporteigenschaften von Steinsalz - Modellierung der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung, Meyniana 54, Seite 113 bis 129, Kiel 2002

PRECH, H. (1882): Über Vorkommen und Verarbeitung von Salzton aus dem Staßfurter Lager, Chemiker Z., 6, 197 bis 198.

RICHTER, G. (1934): Hauptanhydrit und Salzfaltung, Kali, 28, Seite 93 bis 95, 105 bis 107, 122 bis 124, Halle

RICHTER-BERNBURG, G. (1987): Zechstein-Anhydrite, Fazies und Genese, Geol. Jb., 85, Seite 3 bis 82, Hannover

SACHS, L. (1969): Statistische Auswertemethoden, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York

SALZER, K. (1995): Untersuchungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern für umweltgefährdende Abfälle in Salzformationen, BMBF Abschlußbericht, IfG Leipzig

SAUPE, H. (1961): Theoretische Grundlagen für die Beherrschung der Strömungsvorgänge flüssiger und gasförmiger Phasen in erdöl- und erdgasführenden Gesteinen, Freiberger Forschungsheft C 105, Akademie-Verlag Berlin, Januar 1961

SCHLÜTER, K. (1986): Das Hydrofrac-Verhalten von Salzgesteinen in Abhängigkeit von der Salzart, Einspannung und Druckerhöhungsrate, Dissertation TU Clausthal

SCHULZE, G.; GREULICH, CH.; SEYFERT, H. (1961): Untersuchungen am Grauen Salzton im Spaltendiapir des oberen Allertales, Geologische Forschung und Erkundung, Halle

SCHWANDT, A. (1991): Zum Hauptanhydritszenario am Beispiel der NE-Flanke des Staßfurter Sattels, Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GSF-Bericht, München

SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1986): Zur Methodik untertägiger Kluftmessungen am Beispiel anhydritischer Gesteine, Zeitschrift für angewandte Geologie, Band 32, Heft 9, 1986

SCHWERTER, R.; STÄUBERT, A. (1987): Zur Klüftung von Anhydritgesteinen im Kalibergbau, Neue Bergbautechnik, 17. Jahrgang, Heft 9, September 1987

SEIDEL, G. (1960): Zur Gliederung des Hauptanhydrits im Thüringer Becken, Z. angew. Geologie, 9, Seite 383 bis 385, Berlin

SEIFERT, G.; U.A. (1992): Expertise zum Bergschadengebiet der Südwestflanke des Staßfurter Sattels im Bereich der Kali- und Steinsalzgruben Leopoldshall I/II, v. d. Heydt/v. Manteuffel, Achenbach, Kali- und Umwelttechnik GmbH Sondershausen

STÄUBERT, A. (1989): Zu einigen Einflussfaktoren auf das Kluftgefüge im Zechsteinausbiß des Südharzrandes, Z. geol. Wiss., 17, 4, Seite 431 bis 439, Berlin

STÄUBERT, U.; STÄUBERT, A. (1989): Zum Einfluss der Tektonik auf die Gasführung im Salinar, Z. geol. Wiss., 17, Seite 369 bis 380, Berlin

STOLLE; DÖHNER, C.: Zur petrographischen Nomenklatur der Salzgesteine

TE KAMP, L.; KONIETZKY, H. (1996): Modellierung der Kluftwasserströmung im Programmsystem Flac, Bericht an das IfG Leipzig, Gelsenkirchen, Juni 1996

THÜRINGER, CH. (2002): Untersuchungen zum Gastransport im ungesättigten, geklüftet-porösen Festgestein, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, Dissertation 06.02.2002

YARAMANCI, U.; U.A. (1996): Machbarkeitsuntersuchungen zur Abbildung von mit hochsaliner Lösung gefüllten Klüften und Rissen im Anhydrit mittels Bodenradarmessungen, Bericht TU Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik

YARAMANCI, U.; FUNK, J. (1997): Machbarkeitsuntersuchungen zur Abbildung von mit hochsaliner Lösung gefüllten Klüften und Rissen im Anhydrit mittels Bodenradarmessungen. Abschlußbericht TU Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik

ZÄNKER, G. (1972): Beitrag zur Tektonik des Salinargebietes im Südharz-Kalirevier, Diss. Unveröff., Bergakademie Freiberg

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Übersichtsdarstellung des Bearbeitungsablaufes

Abb. 4.1: Geologisches Profil der Wetterstrecke Ost Pöthen und Lage der Anhydritkammer (Zeichnung von Kali Südharz AG, Teufe 1013 m)

Abb. 4.2: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Hauptanhydritaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Abb. 4.3: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Salztonaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Abb. 4.4: Lage der Anhydritmesskammer am Wetterquerschlag 13 (WQ 13) in Bernburg, Teufe 510 m (Skizze von Kali und Salz GmbH)

Abb. 4.5: Vertikalschnitt durch den Wartungsplatz am WQ 13 in Bernburg, Teufe 510 m, (Skizze Mitteldeutsche Salzwerke GmbH)

Abb. 4.6: Perspektivdarstellung Wartungsplatz WQ 13 in Bernburg, Teufe 510 m, vor der Auffahrung der Anhydritmesskammer

Abb. 4.7: Durchstoßpunkte der Flächennormalen der Klüfte, Hauptanhydritaufschluss WQ 13 Bernburg

Abb. 4.8: Kluftaussetzen beim Übergang vom Anhydrit zum Steinsalz

Abb. 4.9: A3 Pöthen mit fein- und grobkörnigem Gefüge

Abb. 4.10: A3 Bernburg mit Steinsalzporen

Abb. 4.11: A3 Bernburg mit Bitumen-Suturen und Porenstruktur

Abb. 4.12: Grauer Salzton Pöthen, flaserschichtiger Ton-Siltstein mit zwei anhydritgefüllten Mikroklüften

Abb. 4.13: Grauer Salzton Bernburg, intensive Klüftung mit Schwundrissen (gefüllt mit Reaktionsanhydrit), Ausgangspunkt für Verwitterung

Abb. 5.1: Manteldruck-Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls (GPa) von Anhydrit

Abb. 5.2: Festigkeit A3 Pöthen in Abhängigkeit vom Manteldruck

Abb. 5.3: Festigkeit A3 Bernburg in Abhängigkeit vom Manteldruck

Abb. 5.4: Festigkeit T3 Pöthen in Abhängigkeit vom Manteldruck

Abb. 5.5: Festigkeit T3 Bernburg in Abhängigkeit vom Manteldruck

Abb. 5.6: Abhängigkeit der Bruchverformung A3 Pöthen vom Manteldruck

Abb. 5.7: Abhängigkeit der Bruchverformung A3 Bernburg vom Manteldruck

Abb. 5.8: Triaxiale Mehrstufenversuche am Anhydrit (Vorbruchbereich und Kluftfestigkeiten)

Abb. 5.9: Triaxiale Mehrstufenversuche an den anhydritischen und magnesitischen Zonen des Grauen Salztons (Vorbruchbereich und Kluftfestigkeiten)

Abb. 5.10: Triaxiale Mehrstufenversuche an den Bereichen des Rotbraunen Salztons und der Sandflaserlage (Vorbruchbereich und Kluftfestigkeiten)

Abb. 5.11: Versuchsapparatur für Permeabilitätsmessungen mit Stickstoff

Abb. 5.12: Permeabilität von kompaktem und geklüftetem Anhydrit in Abhängigkeit von der Differenz der minimalen Druckeinspannung zum Gasdruck

Abb. 5.13: Permeabilität von Salzton in Abhängigkeit von der Differenz der minimalen Druckeinspannung zum Gasdruck

Abb. 5.14: Im Seitendruckaggregat eingesetzter Gesteinswürfel mit aufgesetztem Stahlwürfel zur Innendruckeinleitung

Abb. 5.15: Kompletter Einbauzustand des Gesteinswürfels im Seitendruckaggregat mit herangefahrenem Prüfmaschinenstempel

Abb. 5.16: Versuchsablauf im Steinsalz mit Dichtheitsnachweis, Frac und Refrac

Abb. 5.17: Steinsalzwürfel mit Querriss nach dem Ausbau

Abb. 5.18: Versuchsablauf im Steinsalz mit Dichtheitsnachweis und unterschiedlichen Drucksteigerungsraten bis zum Frac

Abb. 5.19: Steinsalzwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

Abb. 5.20: Versuchsablauf im Salzton mit Dichtheitsnachweis, Frac und unterschiedlichen Injektionsraten zur Ermittlung eines konstanten Abströmwiderstandes

Abb. 5.21: Salztonwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

Abb. 5.22: Versuchsablauf im Anhydrit mit Dichtheitsnachweis, Frac und Refrac

Abb. 5.23: Anhydritwürfel mit Längsriss nach dem Ausbau

Abb. 5.24: In einem Hydrofracriss im Anhydrit erreichte stationäre Strömungsverhältnisse

Abb. 5.25: Unter stationären Verhältnissen in Anhydritrissen berechnete hydraulisch wirksame Kluftöffnungen bzw. die entsprechenden Transmissibilitäten

Abb. 5.26: Einzelriss in einer Anhydritprobe nach dem Hydrofrac (hundertfache Vergrößerung, Druckmedium fluoreszierendes Öl)

Abb. 5.27: Gesamtdarstellung der Abhängigkeit der Aufreißspannung σ_A von der Minimalspannung σ_{min} unabhängig von der Richtung zum Bohrloch

Abb. 6.1: Übersichtsplan der Gruben am Staßfurter Sattel mit dem Jahr der Inbetriebnahme, Stilllegung und Flutung (aus HAUSKE, K.-H.; FULDA, D. (1990))

Abb. 6.2: Profil durch den Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe (Blickrichtung nach Südost)

Abb. 6.3: Mauer in zwei Abschnitten im Markscheidesicherheitspfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe (Blickrichtung nach Südost)

Abb. 6.4: Bauarbeiten an der „Großen Mauer“ im Markscheidepfeiler zwischen den Gruben Achenbach und Hammacher-Agathe im Januar 1905

Abb. 6.5: Am Markscheidepfeiler angrenzender Firstkammerbau der Grube Hammacher-Agathe und Steilfirstenbau der Grube Achenbach (Abmessungen in m)

Abb. 6.6: Maximale und minimale Hauptspannungen in MPa im Bereich der Abbaue auf beiden Seiten des Markscheidepfeilers nach 20 Jahren Standzeit

Abb. 6.7: Normalspannungen in MPa in den Klüften 1 und 2 im Salzton (Spannungsverläufe auf den Maximalwert normiert) und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in allen Klüften, 20 Jahre Standzeit

Abb. 6.8: Maximale und minimale Hauptspannungen in MPa im Bereich der Abbaue auf beiden Seiten des Markscheidepfeilers nach 29 Jahren Standzeit

Abb. 6.9: Normalspannungen in MPa in den Klüften 1 und 2 im Salzton (Spannungsverläufe auf den Maximalwert normiert) und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in allen Klüften, 29 Jahre Standzeit

Abb. 6.10: Entwicklung der mittleren Hohlraumkonvergenz im Teufenbereich 278 bis 360 m

Abb. 6.11: Streichendes Rechenmodell im Teufenbereich 190 bis 400 m

Abb. 6.12: Minimale Druckeinspannung und Indikatoren für Festigkeitsüberschreitungen in den Klüften im Bereich des Markscheidepfeilers, Jahr 1903

Abb. 6.12: Maximale Druckeinspannung im Bereich des Markscheidepfeilers, Jahr 1903

Abb. 6.14: Normalspannungsverlauf in MPa in der unmittelbar zu den Abbauen verlaufenden Kluft im Salzton (Spannungsverlauf ist auf den Maximalwert normiert) , Jahr 1903

Abb. 7.1: Hydrofracsonde des IfG Leipzig für Bohrlochdurchmesser 42 mm

Abb. 7.2: Druckkurve eines typischen Hydrofracversuches

Abb. 7.3: Interfels-Bohrlochsonde: Detailaufnahmen der Trennscheibe und des Kontaktdehnungsgebers

Abb. 7.4: In der Anhydritkammer Pöthen ermittelte Minimalspannungen (Teufe 1013 m)

Abb. 7.5: Bohrkerne nach Überbohren der horizontalen Hydrofracbohrung Richtung NNW sowie der horizontalen Hydrofracbohrung Richtung WSW

Abb. 7.6: Aufschluss des Grauen Salztons in der Wetterstrecke Ost Pöthen

Abb. 7.7: Im Grauen Salzton Pöthen (Teufe 1013 m) ermittelte Minimalspannungen

Abb. 7.8: In den Nachbarschichten zum Grauen Salzton Pöthen (Teufe 1013 m) ermittelte Minimalspannungen

Abb. 7.9: In Bernburg vor und nach der Auffahrung der Anhydritkammer ermittelte Minimalspannungen (Teufe 510 m)

Abb. 7.10: Aufbau der maximalen und minimalen Hauptspannung im WQ 13 vor der Auffahrung der Anhydritkammer

Abb. 7.11: Aufschluss des Grauen Salztons in der Transportstrecke XII in Bernburg (Teufe 410 m)

Abb. 7.12: Minimalspannungen im Grauen Salzton in der Transportstrecke XII in Bernburg (Teufe 410 m)

Abb. 7.13: Dehnung des Extensometers parallel zur Kammerlängsachse bei der Kammerauffahrung mittels Sprengen

Abb. 7.14: Lage der Stangenextensometer in der Anhydritkammer Bernburg

Abb. 7.15: Horizontalverschiebungen der Kontur (Konvergenz positiv)

Abb. 7.16: Temperaturen in 1 m Stoßteufe in Grad und relative Luftfeuchtigkeit in Nullpunkt der Zeitachse 12.12.1993, 12.00 Uhr

Abb. 7.17: Schematischer Aufbau der Bohrlochsonde

Abb. 7.18: Equipment am untertägigen Messort

Abb. 7.19: Druckverlauf von Frac und Refrac bei einem Demonstrationsversuch im Steinsalz mit Angabe der georteten Ereignisse

Abb. 7.20: Projektion der georteten Schallemissionen eines Fracversuches im Steinsalz in einer Bohrlochteufe von 4 m auf die drei Koordinatenebenen

Abb. 7.21: Projektion der georteten Schallemissionen eines Fracversuches im Steinsalz in einer Bohrlochteufe von 4 m im gedrehten Koordinatensystem

Abb. 7.22: Richtung von σ_{min} als Durchstoßpunkt der Flächennormalen in der unteren Halbkugel

Abb. 7.23: Kurvenfit der uniaxialen Axialspannungsrelaxationen, die in Übertragung auf die Bohrlochkontur der Tangentialspannungsrelaxation entsprechen

Abb. 7.24: Verlauf der mittels Kurvenfit ermittelten normierten Relaxationsverläufe im Steinsalz

Abb. 7.25: Konvention des Bezugssystems

Abb. 7.26: Konvention der jeweiligen Bohrlöcher (Achsen des Untersuchungssystems) bei Blickrichtung entgegen der positiven Achsenrichtung

Abb. 7.27: Richtung der Hauptnormalspannungen als Durchstoßpunkte in der unteren Halbkugel

Abb. 8.1: Radarmessungen im Technikumsversuch ohne Reflektor, mit trockenem Filz und mit laugegetränktem Filz

Abb. 8.2: Radar-Profilvermessung am Anhydrit mit begleitender SE-Rissortung

Abb. 8.3: Raumbild der Profilvermessung am Anhydrit vor und nach der Laugeninjektion

Abb. 8.4: Hydrofracsonde mit SE-Aufnehmern und Gestell mit 6 Wegaufnehmern zur Rissöffnungsmessung

Abb. 8.5: Hydrofrac-Rissbildung im Anhydrit in einer Stoßteufe von 1,9 m und Messung der dabei realisierten Rissöffnung

Abb. 8.6: SE-Ortungen im ungeklüfteten Anhydrit in einer Stoßteufe von 1,9 m

Abb. 8.7: Anhydritklüfte mit Carnallitfüllung am südwestlichen Streckenstoß der alten Hauptförderstrecke in Bernburg

Abb. 8.8: SE-Ortungen im Anhydrit mit Carnallitfüllung in einer Bohrlochteufe von 5,5 m

Abb. 8.9: Verlauf und Abstand der kumulierten Ortungen vom Injektionsort sowie des Injektionsdruckes

Abb. 8.10: Exemplarische Auswertung eines Permeabilitätstests im ungeklüfteten Anhydrit

Abb. 8.11: Gesamtdarstellung der in Bernburg in einem abbaufreien Bereich ermittelten minimalen Druckeinspannungen und Permeabilitäten

Abb. 8.12: Detailansicht des Messortes „Liegendzufahrt zur Kippstelle 9b“ mit Konvergenzmessstellen und den Bohrlöchern für Spannungssondierungen

Abb. 8.13: Abbaublock 211 (Abbaue gestrichelt) und Lage des Anhydrit-Messortes

Abb. 8.14: Vertikalkonvergenz obere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

Abb. 8.15: Vertikalkonvergenz mittlere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

Abb. 8.16: Vertikalkonvergenz untere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

Abb. 8.17: σ_{max} [MPa] Anfang 1999 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2113

Abb. 8.18: σ_{max} [MPa] Anfang 2003 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2111

Abb. 8.19: σ_{min} [MPa] Anfang 1999 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2113

Abb. 8.20: σ_{min} [MPa] Anfang 2003 vor Abschluss der Auffahrung des Abbaus 2111

Abb. 8.21.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im März 2001

Abb. 8.21.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im März 2002

Abb. 8.21.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 4,7 m im Oktober 2002

Abb. 8.22: Geschlossene Anhydritkluft im Bohrloch F2

Abb. 8.23.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im März 2001

Abb. 8.23.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im März 2002

Abb. 8.23.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im Oktober 2002

Abb. 8.23.4: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 3,7 m im Oktober 2002

Abb. 8.24: Mit Carnallit gefüllte Kluft im Bohrloch F2

Abb. 8.25.1: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2001

Abb. 8.25.2: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2002

Abb. 8.25.3: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im März 2002

Abb. 8.25.4: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im September 2003

Abb. 8.25.5: Fluiddruckbelastbarkeit Bohrung F2 in Stoßteufe 2,7 m im September 2003

Abb. 8.26: Integrale Permeabilität im Anhydrit in einem Hydrofracriss und in einer geschlossenen bzw. mit Carnallit verheilten Kluft in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt

Abb. 9.1: Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 0,5 m

Abb. 9.2: Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 1 mm

Abb. 10.1: Rechenmodell eines druckbeaufschlagten Bohrloches Ø 101 mm

Abb. 10.2: Vergleich der Modellfunktion mit der gemessenen Druckabfallkurve im Steinsalz im März 2000 (Stoßteufe 8 m)

Abb. 10.3: Gefracter Anhydritwürfel mit Längsriss entlang der Bohrung

Abb. 10.4: Rechenmodell für die Kluftströmungsrechnungen (Horizontalschnitt durch einen Anhydritwürfel

Abb. 10.5: Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bei einem Innendruck an der Kluft von 5 MPa

Abb. 10.6: Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einem Innendruck an der Kluft von 1,5 MPa

Abb. 10.7: Volumenbilanzen bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}64 \cdot 10^{-9}$ m³/s

Abb. 10.8: Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}64 \cdot 10^{-9}$ m³/s

Abb. 10.9: Abströmwiderstand in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung (Laborversuch)

Abb. 10.10: Berechnung des Abströmwiderstandes in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung

Abb. 10.11: Vertikaler Modellschnitt quer zur Messstrecke und zum Untersuchungsbohrloch im Anhydrit mit angeschlossener horizontaler Kluft

Abb. 10.12: Porendruck in Pa in einer horizontalen Anhydritkluft nach einem Tag bei 10 MPa Fluidinnendruck im abgepackerten Bohrlochintervall (Ausschnitt aus Abb. 10.11)

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Petrographische Nomenklatur zur Beschreibung der Salzgesteine nach Stolle und Döhner

Tabelle 4.2: Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Tabelle 4.3: Gliederung des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Tabelle 4.4: Kluftparameter des Hauptanhydrits zwischen Südharz und Allertalgraben

Tabelle 4.5: Gliederung des Grauen Salztons zwischen Südharz und Allertalgraben

Tabelle 4.6: Kluftaufnahmeprotokoll Hauptanhydritaufschluss Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Tabelle 4.7: Kluftaufnahmeprotokoll Salzton Wetterstrecke Ost Pöthen, Teufe 1013 m

Tabelle 4.8: Kluftaufnahmeprotokoll Hauptanhydrit WQ 13 Bernburg, Teufe 510 m

Tabelle 5.1: Dichten und elastische Parameter

Tabelle 5.2: Uniaxiale Druckfestigkeit

Tabelle 5.3: Spaltzugfestigkeit und triaxiale Festigkeitsparameter

Tabelle 5.4: In Mehrstufenversuchen ermittelte Festigkeiten (Pöthen und Bernburg)

Tabelle 5.5: In Mehrstufenversuchen ermittelte Rest- und Kluftfestigkeiten (Pöthen und Bernburg)

Tabelle 5.6: Zusammenfassung der durchgeführten Würfelfracversuche

Tabelle 6.1: Normalprofil der geologischen Schichten am Staßfurter Sattel

Tabelle 6.2: Elastische und Kriechparameter der Gebirgsschichten

Tabelle 6.3: Festigkeitsparameter im Hauptanhydrit und Grauen Salzton

Tabelle 6.4: Festigkeiten und Steifigkeiten der Klüfte

Tabelle 7.1: Materialparameter für die Modellierung der zeitabhängigen Spannungsumlagerung infolge Kriechen vom Steinsalz auf den Anhydrit

Tabelle 7.2: Winkel zwischen den positiven Koordinatenachsen

Tabelle 8.1: Auf die Messbasislänge normierter Konvergenzverlauf

Tabelle 8.2: Materialparameter für begleitende Modellierung Abbaublock 211 Bernburg

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

A3	Anhydrit der Leineserie (Hauptanhydrit)
T3	Grauer Salzton in der Leineserie
Na2	Staßfurtsteinsalz
Na3	Leinesteinsalz
K2	Staßfurtcarnallitit
σ_1	Axialspannung im Triaxialversuch bzw. maximale Hauptnormalspannung
σ_3	Manteldruck im Triaxialversuch bzw. minimale Hauptnormalspannung (minimale Druckeinspannung σ_{min})
d_K	Kluftabstand d_K bei einer Schar in cm
l_K	Kluftausbißlänge in m
f_K	Kluftöffnungsweite f_K in mm
R	Streichrichtung rheinisch
E	Streichrichtung erzgebirgisch
Hf	Streichrichtung flachherzyn
Hs	Streichrichtung steilherzyn
He	Streichrichtung eggisch
ρ	Dichte
E	Elastizitätsmodul

ν	Poissonzahl
σ_D	Uniaxiale Druckfestigkeit in MPa
σ_{SZ}	Spaltzugfestigkeit in MPa
σ_D und m	Ordinatenschnittpunkt und Anstieg der Festigkeitsgerade im σ_1 - σ_3 –Diagramm
τ_C und Φ_g	Ordinatenschnittpunkt und Anstieg der Festigkeitsgerade im τ - σ -Diagramm
ε_{Br}	Bruchdeformation
τ_R	Restfestigkeit auf einer Scherbruchfläche in Abhängigkeit von der Normalspannung σ_n
Φ_R	Restreibungswinkel
i	Aufgleitwinkel
α	Bruchwinkel
s, h, d, a	Zeitangaben für Sekunde, Stunde, Tag und Jahr
ns	Nanosekunde
t	Zeit
K	Temperatur in Kelvin
p_1	Gasdruck im Permeabilitätsversuch
K, k	Permeabilität
ϕ	Drehwinkel ab Abszisse entgegen oder mit Uhrzeigersinn
ρ	Quotient aus Bohrlochradius und radialem Abstand

σ_z	Gesteinsfestigkeit in Wirkrichtung der Tangentialbeanspruchung
p_A	Aufreißdruck beim Hydrofrac
p_i	Innendruck
p	Druck
SE	Abkürzung für Schallemission
q_a	axialer Volumenstrom in der Kluft
q_n	normaler Volumenstrom in der Kluft
b	hydraulisch wirksame Kluftöffnung
μ	dynamische Viskosität in Pa·s
a	Risslänge
L	Risstiefe
r_i	Bohrlochradius
r_a	mittlere radiale Entfernung (Außenradius)
T	Transmissbilität
Q_n	Volumenstrom quer zum Bohrloch in radialer Richtung
H	Prüfintervallhöhe
ε_ϕ	Tangentialdeformation, Dehnungssignal beim Schlitzen
σ_x, σ_y, τ_{xy}	Komponenten des ebenen Spannungstensors im X - Y - Diagramm (im Koordinatensystem X - Y - Z sinngemäß)

λ	Seitendruckkoeffizient
STR	Streichrichtung
EFW	Einfallwinkel
σ_{diff}	Differenzspannung
A, n	Koeffizienten im Kriechansatz für stationäres Kriechen
Re	Reynoldszahl
mr	Mikrorauigkeit der Kluftoberfläche
V_{ϕ}	in einen Porenraum abströmendes Fluidvolumen
K_S	Steifigkeit eines druckbeaufschlagten Systems
k_{Modell}	äquivalente Steifigkeit im Rechenmodell