Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN II)

Institut
für
Gebirgsmechanik
GmbH

FKZ 02 E 9582

Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN II)

Abschlußbericht

Laufzeit 01.03.2002 bis 30.06.2004

Federführend erarbeitet von Dr.-Ing. Peter Kamlot
Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig
mit Beiträgen von Dr. rer. nat. G. Manthei (GMuG Ober-Mörlen)
sowie Prof. Dr.-Ing. H. Bock (Q+S Consult Bad Bentheim)

Geschäftsführung: Dr.-Ing. habil. W. Minkley
Dipl.-Phys. W. Schreiner

Leipzig, März 2005

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit unter dem Förderkennzeichen 02 E 9582 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 3

2. Anlass 5

3. Ergebnisse der vorauslaufenden Projekte und Vorhabensziel 7

4. Bergbauliche und geologische Situation 9

5. Erfassung der Streckenkonvergenz in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt 14

5.1 Installation der Messstellen 14

5.2 Diskussion der Messwerte 14

6. Begleitende Spannungsmessungen mit der Hydrofrac-Methode 17

6.1 Beschreibung der Messeinrichtung 17

6.2 Wiederholungsmessungen in der Zufahrtstrecke zum Messort im Steinsalz 19

6.2.1 Ermittlung der Spannungsbeträge 19

6.2.2 Bestimmung der Spannungsrichtungen mittels SE-Ortung 23

6.2.2.1 Ablauf der Messungen und Festlegung der Messorte 23

6.2.2.2 Darstellung der georteten SE-Ereignisse 25

6.2.2.3 Bestimmung der Richtung der minimalen Hauptspannung 33

6.3 Messkampagnen im Anhydrit 38

6.3.1 Ermittlung der Abströmwiderstände im Anhydrit 38

6.3.2 Bestimmung der Spannungsrichtungen mittels SE-Ortung 50

6.3.2.1 Ablauf der Messungen und Festlegung der Messorte 50

6.3.2.2 Erfassung der Schallemissionen während der Langzeitversuche und Hydrofracs 53

7. Spannungssondierungen mit der Bohrlochschlitzmethode 66

7.1 Darstellung der Methode 66

7.2 Darstellung der Ergebnisse 68

8. Begleitende Permeabilitätsmessungen im Steinsalz 71

8.1 Messmethode und Auswertebeziehung 71

8.2 Darstellung der Ergebnisse 74

9. Ermittlung hydraulischer Kennwerte im Anhydrit 76

9.1 Untersuchung des kompakten und ungeklüfteten Anhydrits 76

9.2 Diskussion einer Kluftströmung 77

9.3 Auswertung der Druckstoßtests in einer carnallitgefüllten Kluft 83

9.4 Auswertung der Druckstoßtests im Bereich bitumengefüllter Suturen 86

10. Modellierung der Fluidströmung im Porenraum der Gesteinsmatrix und in Klüften 89

10.1 Simulation der instationären Permeation nach einem Druckstoßtest 89

10.2 Berechnung axialsymmetrischer stationärer Strömungsverhältnisse in der Gesteinsmatrix bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen 91

10.3 Berechnung einer stationären parallelen Kluftströmung bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen 96

10.4 Abhängigkeit der stationären parallelen Kluftströmung von der normal zur Kluft wirkenden Spannung 101

11. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse 104

12. Schlussfolgerungen für das Anhydritszenario 110

Literaturverzeichnis 112

1. Einleitung

Der vorliegende Abschlußbericht fasst die FuE-Arbeiten des vom BMWA unter dem Förderkennzeichen 02 E 9582 geförderten Vorhabens mit der Laufzeit vom 01.03.2002 bis 30.06.2004 zusammen.

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Vorläuferprojekt BARITON (IfG 1999), dass die Festigkeit und hydraulische Dichtheit des geklüfteten Anhydrits neben der geologischen Ausbildung (Gefüge, Kluftausbildung) wesentlich vom Einspannungszustand der Klüfte im Gebirge abhängt, wurde im Steinsalzbergwerk Bernburg (jetziger Eigentümer esco-european salt company GmbH&Co. KG) ein Hauptanhydritaufschluß gesucht, der in der Projektlaufzeit infolge des sich nähernden Steinsalzabbaus erhöhten Gebirgsspannungen ausgesetzt ist. Im Bereich des Aufschlusses wurden durch den Grubenbetrieb ein Messort errichtet und die notwendige Infrastruktur sowie personelle Betreuung für eine mehrjährige Vorhabenslaufzeit abgesichert.

Das Vorhaben wurde gemeinsam mit dem Bereich Endlagersicherheitsforschung der GRS in Braunschweig bearbeitet.
Die Arbeiten der GRS unter dem Förderkennzeichen 02 E 9592 beinhalteten die Arbeitspakete

- Großräumige und langfristige Überwachung der infolge der Gebirgsspannungs-änderungen bei der Steinsalzgewinnung in einem geklüfteten Anhydritbereich induzierten Seismizität mit Schallemissions(SE)messungen und quantitative Beschreibung der SE-Ereignisse

- Permeabilitätsmessungen im Anhydrit in unterschiedlich aufgelockerten Gebirgsbereichen

Die Untersuchungen des IfG Leipzig umfassten die Arbeitspakete

- Ermittlung der Gebirgsspannungen im Anhydrit und benachbarten Steinsalz mit unterschiedlichen Messverfahren und Nachweis der Spannungsänderungen unter Abbaueinwirkung

- Konvergenzmessungen in der Zufahrtstrecke zum Messort zum zusätzlichen Nachweis der Abbaueinwirkung

- Bestimmung der Fluiddruckbelastbarkeit von Anhydritklüften sowie von hydraulischen Kennwerten in Abhängigkeit von der Abbaueinwirkung

- Modellierung des Einflusses sich ändernder Gebirgsspannungen auf die hydraulische Durchlässigkeit im klüftigen Anhydrit

Das FuE-Vorhaben BARIAN II stellt die Fortsetzung des vom 01.09.1998 bis zum 31.12.2001 gemeinsam mit der Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH (GRS) durchgeführten Vorhabens "Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN, IfG 2002)" dar. Im Rahmen dieses Projektes wurden im Steinsalzbergwerk Bernburg bereits abbaubedingte Spannungs- und Verformungsänderungen im Anhydrit und die dabei induzierte Seismizität bezüglich ihres Einflusses auf die Barrierewirkung von Anhydrit untersucht und bewertet. Aufgrund betrieblicher Umstände war es jedoch nicht zu dem erwarteten Abbaufortschritt und den damit verbundenen maximalen Gebirgsspannungsänderungen gekommen, so dass eine Projektverlängerung bis Mitte 2004 zur Erreichung der Projektziele erforderlich war.

Der von GRS und IfG gemeinsam weiter genutzte Messort im Steinsalzbergwerk Bernburg eignete sich sehr gut für die Untersuchung der genannten Problemstellungen. An dem ausgewählten Hauptanhydritaufschluss sind weitreichende Klüfte ausgebildet und auf den Anhydrit bewegte sich der Steinsalzabbau zu. Das Steinsalz wurde aus 20 m breiten und 35 m hohen Langkammern gewonnen, zwischen denen 28 m breite Pfeiler stehen blieben. Infolge des Abbaus traten Spannungsumlagerungen auf den steifen Hauptanhydrit auf, deren gebirgsmechanische Auswirkungen mit einem mikroseismischen Array (GRS) sowie Spannungs-, Verformungs- und Permeabilitätsmessungen (IfG) erfasst wurden.

Die weitere Zurverfügungstellung des Messortes durch den Eigentümer bot die außergewöhnliche und optimale Gelegenheit für geotechnische Untersuchungen am geklüfteten Gestein unter sich signifikant ändernden Gebirgsspannungen. Die daraus resultierenden gebirgsmechanischen und hydraulischen Reaktionen wurden als deutlicher erwartet, als sie sich in einem Endlager im Salz ohne Gewinnungsbergbau einstellen werden.

Die gebirgsmechanische Bewertung des Steinsalzabbaus in der Grube Bernburg war kein Untersuchungsgegenstand. Die Abbautätigkeit sollte lediglich die für das Untersuchungsprogramm notwendigen Gebirgsspannungsänderungen verursachen.

Als Vertragspartner mit der esco-european salt company GmbH&Co. KG, Werk Bernburg trat das IfG auf. Es schloss einen Vertrag über die Nutzung des Versuchsortes bzw. über die durch die Grube beizustellenden Leistungen ab, plante alle von GRS und IfG in der Grube Bernburg durchzuführenden Untersuchungen und rechnete die grubenseitig anfallenden Arbeiten zum Betreiben des Versuchsortes kostenmäßig getrennt entsprechend der Anforderungen von GRS und IfG ab.

2. Anlass

Anhydritschichten sind Bestandteile der Normalabfolge des Salinars, weisen jedoch unter gebirgsmechanischen Beanspruchungen (Auffahrung eines Endlagerbergwerkes oder einer Untertagedeponie) 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 Stoffe sicher einzuschließen, kommt es in den überwiegend elastisch reagierenden sowie steiferen und festeren Anhydritschichten zu Beanspruchungserhöhungen. Diese führen zu einer gebirgsmechanischen Beanspruchung der im Anhydrit immer vorhandenen Klüfte, dessen Konsequenzen hinsichtlich der Festigkeit und hydraulischen Dichtheit im Rahmen von geotechnischen Sicherheitsnachweisen zu bewerten sind. Die tektonisch angelegten Anhydritklüfte können geschlossen oder mit sekundären Mineralkristallisationen (Carnallit, Halit) gefüllt sein und repräsentieren hinsichtlich der Festigkeit und Dichtheit die "Schwachstelle" in diesem Gestein.

Es ist grundsätzlich nicht auszuschließen, dass in der Betriebsphase unter erhöhten Gebirgsspannungen in der Nähe von bergmännischen Auffahrungen die Klüfte geöffnet werden und eine ursprünglich vorhandene Dichtheit verloren geht. In der Folge können im Salzgebirge eingeschlossene salinare Lösungen in Richtung der Hohlräume zutreten. Mit solchen Zutritten hochmineralisierter Lösungen ist beim Steinsalzbergbau immer zu rechnen und in den meisten Fällen sind die Zutritte auf Grund ihrer geringen Mengen für den Betriebsablauf unproblematisch.

In der Nachbetriebsphase einer Untertagedeponie oder eines Endlagers ist es jedoch denkbar, dass, solange noch kein vollständiger Einschluss der Abfälle mit ausgeglichenen Gebirgsspannungen vorliegt, die Lösungen in Kontakt mit den eingelagerten Abfällen geraten. Es könnte eine Kontamination der Lösungen eintreten und infolge der Hohlraumkonvergenz über den Zutrittspfad 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 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 Barrierenintegrität der geklüfteten Anhydritbereiche unter dem Einfluss erhöhter Gebirgsspannungen kommt deshalb bei der Endlagerung im Salz eine entscheidende Bedeutung für den Sicherheitsnachweis zu. Es sind die für ein solches Zutrittsszenario über den Hauptanhydrit notwendigen Einwirkungen und Bedingungen zu untersuchen, um eine fundierte Analyse vornehmen zu können.

Beispiele aus dem historischen Steinsalz- und Kalibergbau zeigen, dass die zwangsläufige Unterstellung des Absaufens von Salzbergwerken bei Aufschluß von Anhydritschichten 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 Grubenbau von etwa 7 m Breite im ursprünglichen, wenig deformierten Zustand mit einer freien Firstfläche von 200 m^2 neben einer Anhydritwand gefunden.

Dem Absaufen einzelner Bergwerke am Staßfurter Sattel über den Hauptanhydrit sind entsprechend des heutigen gebirgsmechanischen Kenntnisstandes gravierende Unterdimensionierungen der Tragpfeiler im Rahmen der Salzgewinnung vorausgegangen und mit dem Abpumpen der zutretenden Deckgebirgswässer (in der Absicht, die Produktion trotz der Zuflüsse möglichst lange aufrecht erhalten zu können) wurden weitreichende Lösungserscheinungen der sekundären Mineralkristallisationen verursacht.
Diese Bedingungen können nicht auf ein Endlager im Salz übertragen werden. Infolge der zum Gewinnungsbergbau völlig andersartigen Dimensionierung werden die gebirgsmechanischen Beanspruchungen des Hauptanhydrits wesentlich geringer sein und mit einer geophysikalischen Vorerkundung wird angestrebt, dieses Gestein möglichst überhaupt nicht aufzuschließen.
Das „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. Das vorliegende FuE-Vorhaben soll einen Beitrag zur Entwicklung der dazu notwendigen Verfahren und Kriterien liefern.

3. Ergebnisse der vorauslaufenden Projekte und Vorhabensziel

Von GSF und IfG wurde bereits gemeinsam das Vorhaben "Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton (ANTON, IfG 1995)" (Förderkennzeichen GSF 02 E 8452 und IfG 02 E 8241) bearbeitet, welches eine Laufzeit vom 01.04.1992 bis 31.03.1995 bzw. vom 01.01.1992 bis 31.03.1995 hatte. In Laborversuchen konnten die gesteinsmechanischen und geophysikalischen Parameter von Anhydrit- und Salztonproben ermittelt werden. Die In-situ-Gebirgsspannungen im Anhydrit sowie die Spannungsänderungen und Hohlraumkonvergenzen bei der Auffahrung von 2 Messkammern in unterschiedlichen Teufen und bei unterschiedlicher geologischer Ausbildung wurden im Südharz-Kalirevier und im Steinsalzwerk Bernburg bestimmt. Insgesamt präsentierte sich der untersuchte Hauptanhydrit als steife und feste Gesteinsschicht mit sehr wenigen natürlichen Klüften.

Da aus Analogiebetrachtungen zum Kalibergbau am Staßfurter Sattel zu den dort nachgewiesenen Ersaufensvorgängen der Gruben über den stark klüftigen Hauptanhydrit jedoch die potentiellen Gefahren bekannt waren, wurden in einem zweiten gemeinsamen FuE-Vorhaben "Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON)" (Förderkennzeichen GSF 02 E 8765 und IfG 02 E 8755) mit einer Laufzeit vom 01.09.1995 bis 31.08.1998 insbesondere die Anhydritklüfte als „schwächste Stelle“ im Gesteinsverband hinsichtlich ihres mechanischen und hydraulischen Verhaltens untersucht. Da dieses die geologische Barrierefunktion wesentlich bestimmende Verhalten von den Gebirgsspannungen abhängt, war es erforderlich, zunächst eine neue Spannungsmesssonde zu konstruieren, die im Schichtgrenzenbereich Steinsalz/Anhydrit erfolgreich zum Einsatz kam. Die Fluidausbreitung in Anhydritklüften bei definierten Volumenraten und unter bekannten Gebirgsspannungen wurde gleichfalls mit Schallemissionsmessungen verfolgt. Die Anwendung von Oberflächenradarmessungen zur Ortung hochkonzentrierter Lösungen war auf Grund der geringen Rissöffnung von etwa einem Hundertstel Millimeter, der nur teilweise benetzten Rissfläche sowie der hohen Dämpfung des Anhydrits nicht erfolgreich. Das Hydrofrac-Verhalten von Salz-, Anhydrit- und Salztonwürfeln unter triaxial unterschiedlichen Randlasten konnte im Labor bestimmt werden und lieferte wesentliche Aussagen zum in situ zu erwartenden Fracverhalten und zur Risspermeabilität. Die Labor- und In-situ-Untersuchungen wurden mit numerischen Modellrechnungen nachvollzogen.
Die GRS war für Schallemissionsmessungen im Auffahrungsbereich einer Anhydritkammer in der Grube Bernburg, für Permeabilitätsmessungen in einer alten Hauptförderstrecke im Steinsalz und Anhydrit sowie für begleitende Laboruntersuchungen verantwortlich.

An den in den Vorhaben ANTON und BARITON zur Verfügung stehenden Messorten in der Grube Bernburg unterlagen die Gebirgsspannungen keinen signifikanten Änderungen, da in der unmittelbaren Nähe keine Hohlraumauffahrungen erfolgten. Da in anderen Bereichen im Bergwerk jedoch Steinsalz gewonnen wird und Anhydrit in Form von Klippenstrukturen auch dort aufgeschlossen ist, wurde in Vorbereitung des Projektes BARIAN nach potentiellen Messorten gesucht, an denen die gebirgsmechanischen und hydraulischen Reaktionen unter Abbaueinfluss bei Annäherung der Abbaukammern untersucht werden konnten. Im Bereich der zukünftigen Gewinnungsfelder wurde ein Ort gefunden, an dem der Hauptanhydrit, z.T. mit Carnallit gefüllten Klüften, in den nächsten Jahren unter Abbaueinfluss gelangte. In Abstimmung mit der Werksleitung konnten die notwendigen bergmännischen Arbeiten zur Messorterstellung in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt so abgestimmt werden, dass die

Steinsalzgewinnung nicht beeinträchtigt wurde.

Im Projekt BARIAN II soll die komplexe Verknüpfung von geophysikalischen, gebirgsmechanischen und hydraulischen Untersuchungsmethoden beibehalten werden. Während die Erfassung von Schallemissionen und deren mikroakustische Analyse zunächst nur auf das Phänomen von Bruchvorgängen unter einer erhöhten Gebirgsspannung hinweist, liefert die Messung der Spannungen in diesem Bereich und der Vergleich mit der im Labor bestimmten Festigkeit (maximal zulässige Spannung) eine Aussage zur Signifikanz der Schallemissionen bzgl. einer Materialschädigung. Zur Bewertung der geologischen Barrierefunktion ist es wesentlich, unter den bergbaulichen Spannungsumverlagerungen begrenzte und die Dichtheit nicht beeinträchtigende Mikrorisse entlang der Schichtgrenzen oder Klüfte von großräumigen hydraulisch relevanten Kluftaktivierungen (Öffnung und Relativverschiebung der Kluftufer) und Festigkeitsüberschreitungen im Gesteinsverband unterscheiden zu können.
Die Bestimmung der hydraulischen Parameter und des Durchlässigkeitsverhaltens des Anhydrits mit seinen Klüften liefert letztendlich eine Abschätzung, ob und welche Flüssigkeitsmengen unter den gegebenen geologischen und bergbaulichen Bedingungen überhaupt zutreten können und ob der Konvergenzprozeß im Salz bis zum Hohlraumverschluß nicht schneller als ein signifikanter Laugenzutritt verläuft. Das bisher oft a priori vorausgesetzte „Anhydritszenario“ kann somit belastbar mit Zahlen untersetzt werden.

Das generelle Vorhabensziel besteht deshalb darin, ein standortunabhängiges Instrumentarium für Bewertungen und Prognoserechnungen zu schaffen, welches den geotechnischen Sicherheitsnachweis in der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers gestattet und Hinweise liefert, wie ein Endlager auszulegen ist, so dass die geologische Barriere auch hinsichtlich der Anhydritschichten erhalten bleibt.
Die gewonnenen Untersuchungsergebnisse sowie die angewendeten Untersuchungsmethoden und Modelle (Prozessverständnismodelle und konkrete rechentechnische Nachweisverfahren) sollen auf andere Wirtsgesteinsbedingungen übertragbar sein.

4. Bergbauliche und geologische Situation

Der Messort befindet sich in einer Teufe von etwa 500 m im Westen des Grubenfeldes des Steinsalzwerkes Bernburg (siehe Abbildung 1). Dort wurde im Abbaublock 211 in 35 m

hohen und 20 m breiten Abbaukammern Steinsalz gewonnen. Die Abbildung 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.

Der Abbau erfolgt in der Grube 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. Das Haufwerk wird mit Ladetransportfahrzeugen zur nächsten Kippstelle (Bandübergabe) transportiert und von dort Richtung Schacht befördert. 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.

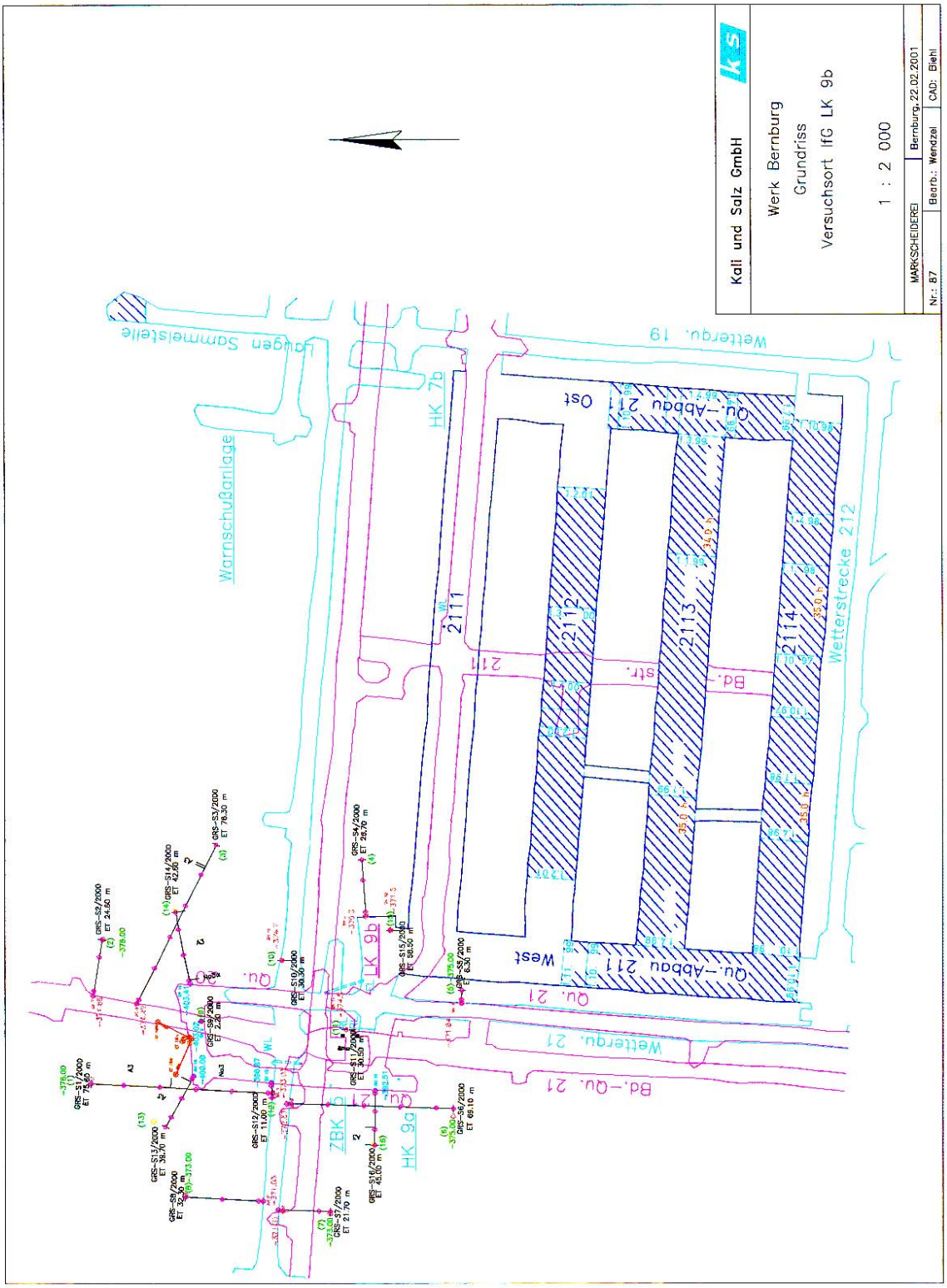

Abbildung 1 Abbaublock 211 und Lage des Anhydrit-Messortes

Die Bernburger Leinesteinsalzlagerstätte befindet sich im südöstlichen Teil der Subherzynen Senke. Diese ist durch meist herzyn streichende schmale Sättel und breite Mulden reich gegliedert. Das Leinesteinsalz kann maximale Mächtigkeiten von 150 m erreichen. Infolge der nur mäßigen tektonisch-halokinetischen Beanspruchung ist es in nur flachwelligen und weitgespannten Falten verformt. Verbunden damit sind unregelmäßige Schichtausdünnungen und -anstauungen.
Das Leinesteinsalz wird in Abständen von meist einigen hundert Metern von Anhydritklippen unterschiedlicher Größe 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.

Für die Vorhaben BARIAN und BARIAN II wurde im Grubenfeld ein Messort gesucht, an dem folgende Voraussetzungen gewährleistet sein mussten:

- Innerhalb der Projektlaufzeiten sollte sich dem Messort der Steinsalzabbau mit etwa 35 m hohen und 20 m breiten Abbaukammern nähern.

- Am Hauptanhydritaufschluß mussten die bergbausicherheitlichen und infrastrukturellen Voraussetzungen für die Durchführung einer mehrjährigen Messkampagne zur Verfügung stehen.

- Am Aufschluß sollten carnallitgefüllte Klüfte ausstreichen, die mit Bohrungen vom Stoß aus erschlossen und sondiert werden konnten.

Gemeinsam mit dem Grubenbetrieb konnte die Liegendzufahrt zur Kippstelle 9b als am besten für die Aufgabenstellung geeignet ermittelt und als Messort vorbereitet werden. Die Teufe liegt bei 403 m unter NN bzw. 480 m unter Geländeoberkante. In Abbildung 2 ist in einer Detailansicht die Auffahrungssituation dargestellt.

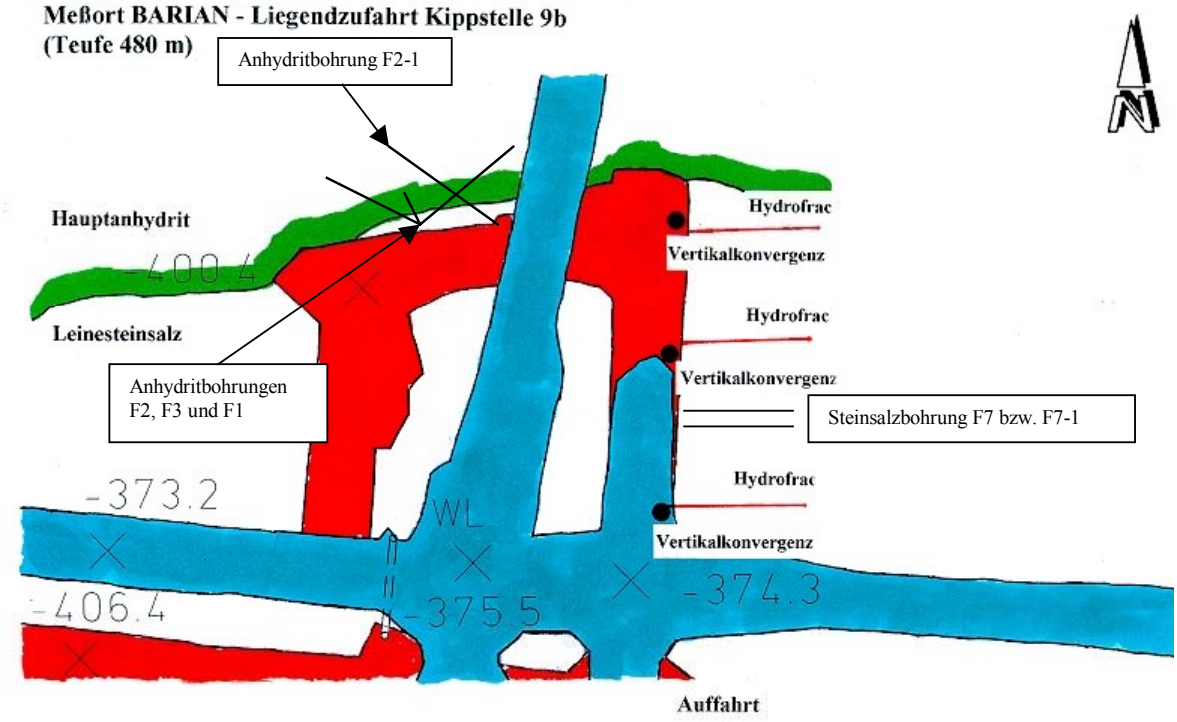

Abbildung 2 Detailansicht des Messortes mit Konvergenzmessstellen und den Bohrlöchern für Spannungssondierungen

Zum Messort am aufgeschlossenen Hauptanhydrit (grün) 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 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.

Der gesamte Messortbereich war von einem seismischen Array umgeben (siehe Bohrungen für die seismischen Aufnehmer am Versuchsort in Abbildung 1), dessen Registrierungen von der GRS ausgewertet und in einem separaten Bericht beschrieben werden.

5. Erfassung der Streckenkonvergenz in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt

5.1 Installation der Messstellen

Die Installation der drei Konvergenzmessstellen erfolgte am 12.03.1999 in der Auffahrt zum Anhydritmessort an den in Abbildung 2 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 verlaufen etwa 0,6 m parallel zueinander und in diesem Bereich sind elektrische Wegaufnehmer der Firma Interfels mit Leitplastikwiderstandselement (Gesamtweg 25 mm, Auflösung 0,01 mm) mittels Klemmvorrichtungen befestigt und zur gegenüberliegenden Stange verspannt. Der Abstand des verankerten Firstpunktes zum Sohlenpunkt beträgt etwa 7,2 m. Die unmittelbaren Auflockerungszonen in der Firste und Sohle beeinflussen damit die Messwerte nicht.

Der Messschrank für die Aufnahme der Datenerfassungsanlage befindet sich in der nordöstlichen Ecke der Steinsalzauffahrt und bis dorthin wurde zweiadriges geschirmtes Kabel verlegt. Das Messsignal gelangt über die Übertragungsleitung, A/D-Wandler und die serielle Schnittstelle RS 232 zum Steuerrechner. Die Abfrage der Wegaufnehmer erfolgte über das auf einem Laptop installierte Programm mit Zeitabständen im Dreistundentakt (beliebig einstellbar) und die Datenspeicherung im ASCII-Format.

Das System arbeitete seit der Installation fehlerfrei. Zu Unterbrechungen in der Datenaufnahme kam es lediglich durch Stromausfälle am Messort sowie Beschädigungen durch Grubenfahrzeuge. In allen Fällen konnten die Messeinrichtungen wieder instand gesetzt und die Messreihen mittels Interpolation weitergeführt werden.

5.2 Diskussion der Messwerte

Die Konvergenzverläufe sind in den folgenden Abbildungen 3 bis 5 dargestellt. Zur besseren Zuordnung sind die Abbaustände, basierend auf den markscheiderischen Vermessungsergebnissen, mit angegeben.

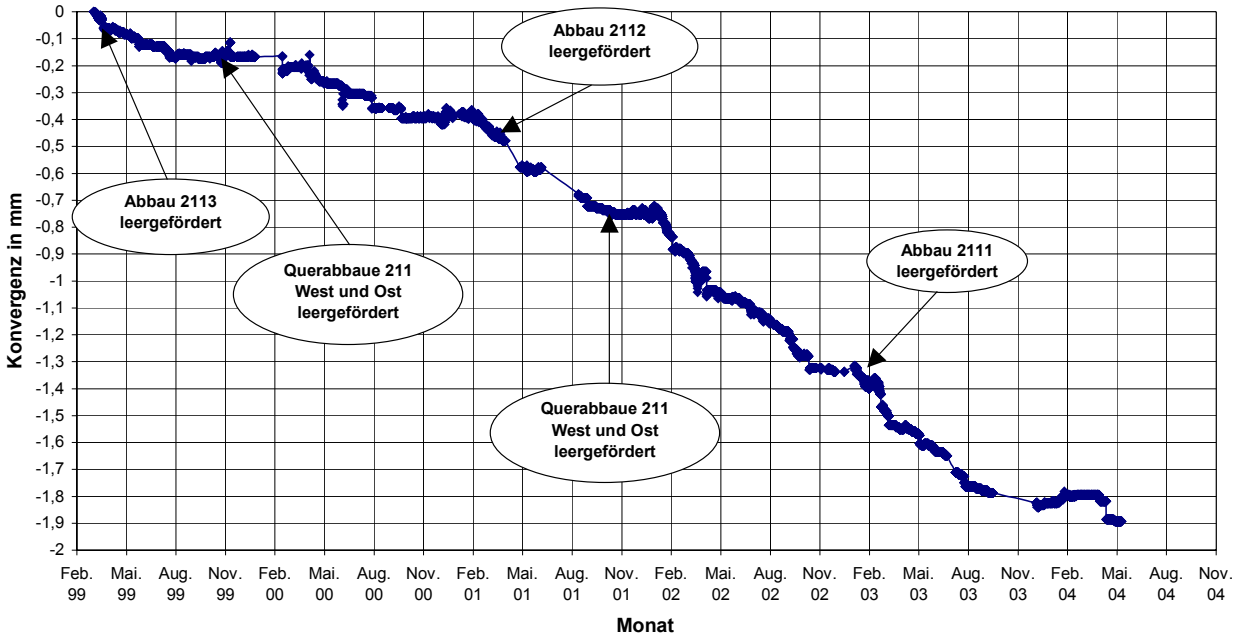

Abbildung 3 Vertikalkonvergenz obere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

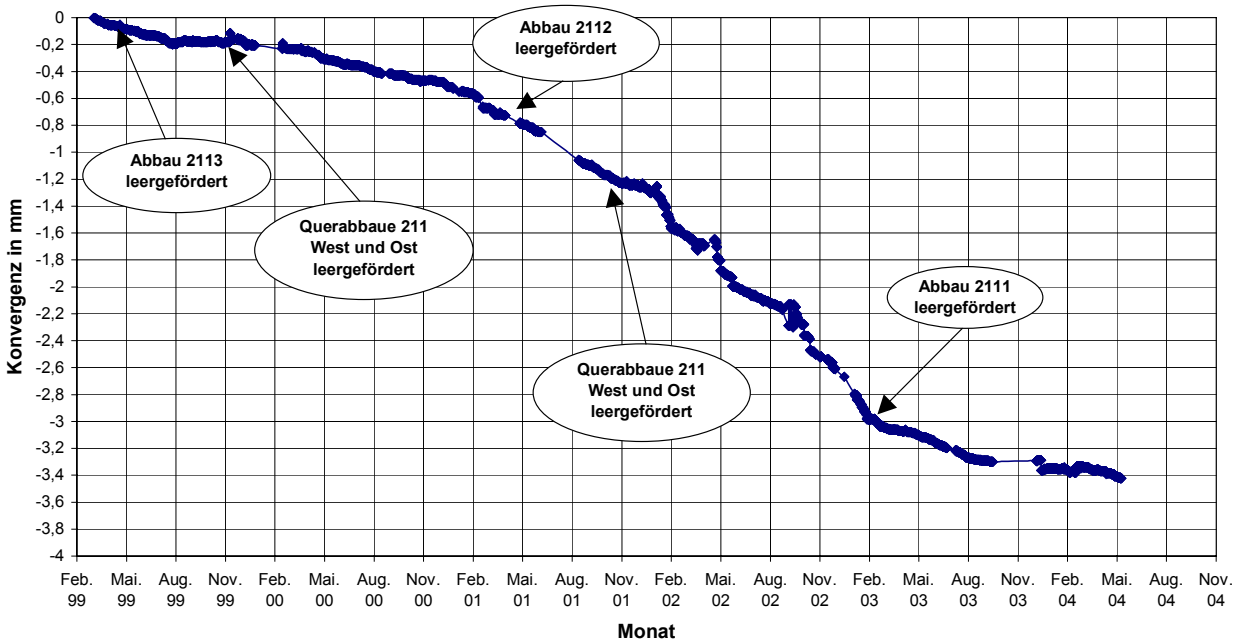

Abbildung 4 Vertikalkonvergenz mittlere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

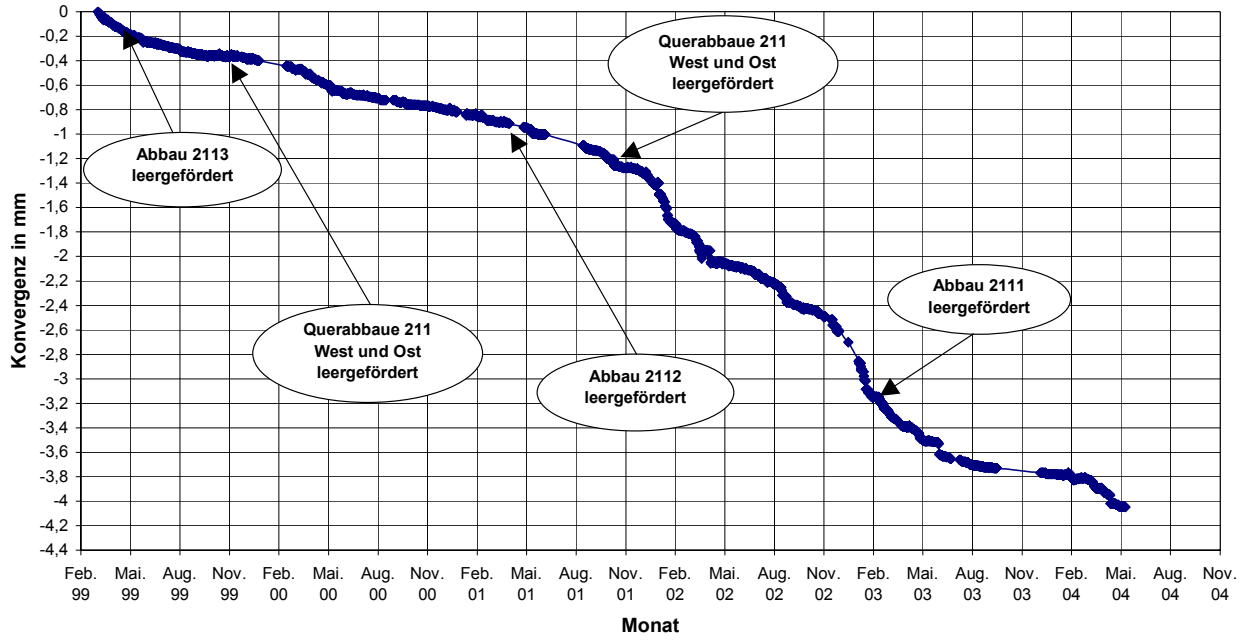

Abbildung 5 Vertikalkonvergenz untere Messstelle vom 12.03.1999 bis 12.05.2004

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 der Tendenz 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.

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

Tabelle 1 Auf die Messbasislänge normierter Konvergenzverlauf

Entsprechend Tabelle 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.

6. Begleitende Spannungsmessungen mit der Hydrofrac-Methode

6.1 Beschreibung der Messeinrichtung

Die Spannungsmessungen wurden in Weiterführung des im Projekt BARIAN begonnenen Messprogramms in einzelnen Kampagnen in Abhängigkeit vom Abbauforschritt durchgeführt. Zur Bestimmung der Richtung und des Betrages der minimalen Hauptspannung wurde die gemeinsam von IfG Leipzig und GMuG Ober-Mörlen im Projekt BARITON entwickelte Hydrofrac-Sonde für Bohrlochdurchmesser von 101 mm im Steinsalz und Anhydrit eingesetzt. Neben der Anwendung in kurzzeitigen Hydrofrac-Versuchen über mehrere Stunden eignet sich die Sonde auch für längere Versuche über einige Tage zur Verfolgung der Ausbreitung der Flüssigkeitsfront bei Messungen der Kluftpermeabilität.

Die Sonde besitzt eine Länge von etwa 2 m. Das Injektionsintervall ist ca. 0,5 m lang und der Abstand der Aufnehmerkränze beträgt ca. 1,5 m. Diese Sondenabmessungen wurden im Projekt BARIAN durch eine Neukonstruktion der beiden Aufnehmerkränze erreicht. Sie bestehen jetzt aus einem nur noch 60 mm langen, massiven Messinggehäuse mit einem Durchmesser von 98 mm. In jedem Kranz befinden sich in vier senkrecht zueinander angeordneten Radialbohrungen die Aufnehmergehäuse mit integrierten piezoelektrischen Wandlerelementen und Vorverstärkern. Das Aufnehmergehäuse selbst dient als Pneumatikkolben. Bei Druckluftbeaufschlagung fahren alle vier Aufnehmer gleichzeitig bis maximal 7 mm aus und nach Druckentlastung durch Federrückstellung wieder ein. Beide Aufnehmerkränze sind durch lange Schrauben an der Risserzeugungseinheit befestigt. Dazu befindet sich an beiden Enden der Risserzeugungseinheit ein massiver Stahlring, der verdrehsicher mit dem Grundrohr der Bohrlochsonde verbunden ist. In den Distanzrohren zwischen dem Stahlring und dem Aufnehmerkranz sind die Kabelstecker und Pneumatikanschlüsse geschützt untergebracht. Zur besseren Montage und Demontage der Sonde sind die Messkabel an den Anschlussstellen der Aufnehmerkränze zur Risserzeugungseinheit und am vorderen Ende der Sonde nur noch durch zwei Stecker verbunden.

Trotz der stark verkürzten Aufnehmerabstände konnten die Ereignisse ohne Veränderung des Ortungsprinzips weiterhin automatisch geortet werden. Lediglich der geänderte Abstand zwischen den Aufnehmerkränzen wurde beim Orten berücksichtigt. Anders als bei den früheren Auswertungen wurden die Signale jedoch nur mit einem 20 kHz Hochpass gefiltert. Die hochfrequenten Signalanteile wurden also zur Bestimmung der Einsatzzeiten der P- und S-Welle mitbenutzt. Ein Vergleich der Ergebnisse bei Ortung mit hochfrequenten Signalanteilen mit einer Ortung, zu der nur die niederfrequenten Signalanteile (Bandpass zwischen 20 und 50 kHz) herangezogen wurden, zeigt, dass sich die Risse bei der „hochfrequenten Ortung“ etwas schärfer abbilden. Die Orientierung der Risse hingegen bleibt weitgehend unverändert.
Die Schallemissionserfassung für die insgesamt 8 Aufnehmer erfolgt mit einer Transientenrekorderkarte, die in einen PC eingebaut ist. Mit dieser Erfassungseinheit können bis zu 16 Ereignisse pro Sekunde 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 - 300 kHz gearbeitet.

Zur Druckerzeugung kam eine Hochdrucklaborpumpe zur Anwendung. Die Dosierpumpe arbeitet mit Volumenströmen von 0,1 bis 600 ml/h bei maximalen Drücken bis 500 bar. Sie ist für eine Realisierung von Fluidratenänderungen in Profilen frei programmierbar und daher für die Aufgabenstellung hervorragend geeignet. Um einen störungsfreien Pumpenbetrieb bis zu mehreren Tagen gewährleisten zu können, war es erforderlich, ein niedrig viskoses Spindelöl einzusetzen und dieses auf der Ansaugseite mit einem Vordruck von 3 bar zu beaufschlagen.
Die Leitungen sowie das abgepackerte Bohrlochintervall wurden mit einer Handpumpe mit umschaltbarem Fördervolumen von 11 ml auf 2 ml gefüllt. Hierfür wäre die Hochdrucklaborpumpe mit dem kleinen Förderstrom nicht geeignet gewesen.

Weiterhin erfolgte im Steinsalz auch eine Spannungssondierung ohne Lokalisierung der Schallemissionen. Für diese Messungen wurde eine kleinere Fracsonde mit dem gleichen Aufbauprinzip als Zweikreissystem mit Quetschpackern für Bohrlochdurchmesser von 42 mm verwendet. Als Druckfluid kam gleichfalls Hydrauliköl zum Einsatz.

6.2 Wiederholungsmessungen in der Zufahrtstrecke zum Messort im Steinsalz

6.2.1 Ermittlung der Spannungsbeträge

Die Spannungssondierungen fanden in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt in den in Abbildung 2 gekennzeichneten Bohrungen statt. Die Bohrung F7 hatte einen Durchmesser von 101 mm und stand für die Schallemissionsrissortung zur Verfügung. Sie wurde horizontal nach Osten bis zu einer Länge von etwa 12 m gestoßen. Die anderen drei Sondierungsbohrungen entsprechend Abbildung 2 (rot gefärbt mit Bezeichnung Hydrofrac) besaßen einen Durchmesser von 42 mm und wurden gleichfalls horizontal nach Osten mit Bohrlochlängen bis zu 15 m gestoßen.

In Abbildung 6 ist ein typischer Versuchsablauf in der Bohrung F7 vom Februar 2001 dargestellt.

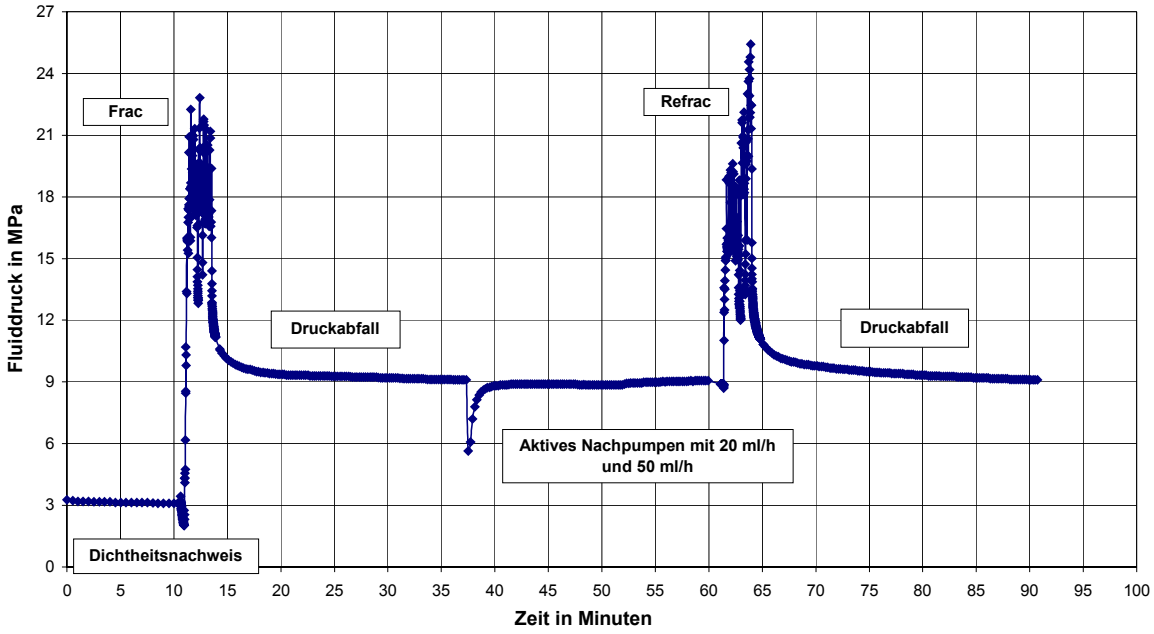

Abbildung 6 Spannungssondierung mit Hydrofrac im Steinsalz (Bohrung F7, Stoßteufe 9 m, Datum 23.02.2001)

In diesem Standardmessregime wird nach dem Zusammenbau der Sonde und dem technischen Dichtheitsnachweis aller Leitungen und Verbinder zunächst der abgepackerte Bohrlochabschnitt etwa 10 min hydraulisch mit einem Druck unterhalb der Aufreißspannung

beaufschlagt. In dieser Phase soll nachgewiesen werden, dass der Untersuchungsabschnitt im Bohrloch frei von geologisch, gebirgsmechanisch oder bohrtechnisch bedingten Rissen ist und sich für die Spannungssondierung eignet. Das war hier der Fall und mit der Handpumpe wurde dann der Hydrofrac, verbunden mit einem mehrmaligen Überpumpen, erzeugt. Die verpressten Ölmengen lagen im Mittel bei 300 ml. Das Überpumpen nach dem Frac ist notwendig, um den Riss aus der unmittelbaren Bohrlochkontur mit dem lokalen Spannungsfeld in weiter entfernt liegende Gebirgsbereiche zu erweitern.

Die Druckabfallkurve in der "shut in" Phase wird 20 bis 30 Minuten beobachtet und danach erfolgt die Bestätigung des Endwertes der Druckabfallkurve mit der Hochdrucklaborpumpe. Der am Ende der Druckabfallkurve in den meisten Fällen im Salz noch feststellbare geringe Druckverlust infolge Permeation in das Gesteinsgefüge (eine vollständige Dichtheit ist nur in Ausnahmefällen zu beobachten) wird durch aktives Nachpumpen mit geringen Raten kompensiert und somit der gesuchte Gleichgewichtsdruck zur minimalen Gebirgsspannung von 9 MPa bestätigt. Im Steinsalz zeigt sich dabei, dass der gefundene Druckwert wenig sensitiv bezüglich der eingestellten Verpressrate ist. Der in Abbildung 6 ausgewiesene nur marginale Druckanstieg bei der Steigerung von 20 ml/h auf 50 ml/h belegt diesen Befund.
Nach dem Refrac erfolgt eine asymptotische Annäherung der Druckkurve an den bereits gefundenen Betrag der Druckkonstanz und bestätigt diesen erneut.

Eine weitere Messung in diesem Bohrloch in einer Teufe von 10,4 m etwa 2 Wochen später (siehe Abbildung 7) führt gleichfalls zu einer minimalen Druckeinspannung von 9 MPa. Am Ende der Druckabfallkurve nach dem Frac wurde hier das Bohrlochintervall vollständig entlastet und danach mittels der elektrischen Hochdrucklaborpumpe der Druck mit einer Verpressrate von 30 ml/h wieder aufgebaut. Es zeigt sich eindrucksvoll eine asymptotische Annäherung an den Einspannungswert von 9 MPa, der nach dem Refrac wiederum bestätigt wird.

Als Schlussfolgerung bzgl. der Hydrofrac-Spannungssondierungen im Steinsalz lässt sich festhalten, dass das gewählte Versuchsregime zu konsistenten Resultaten führt. Die nach der Einstellung des Druckgleichgewichtes zur minimalen Gebirgsspannung auftretenden Fluidpermeationen lassen sich mit einer geringen Nachverpressung kompensieren, wobei die Einstellung dieses Druckwertes von der Rate kaum beeinflusst wird.

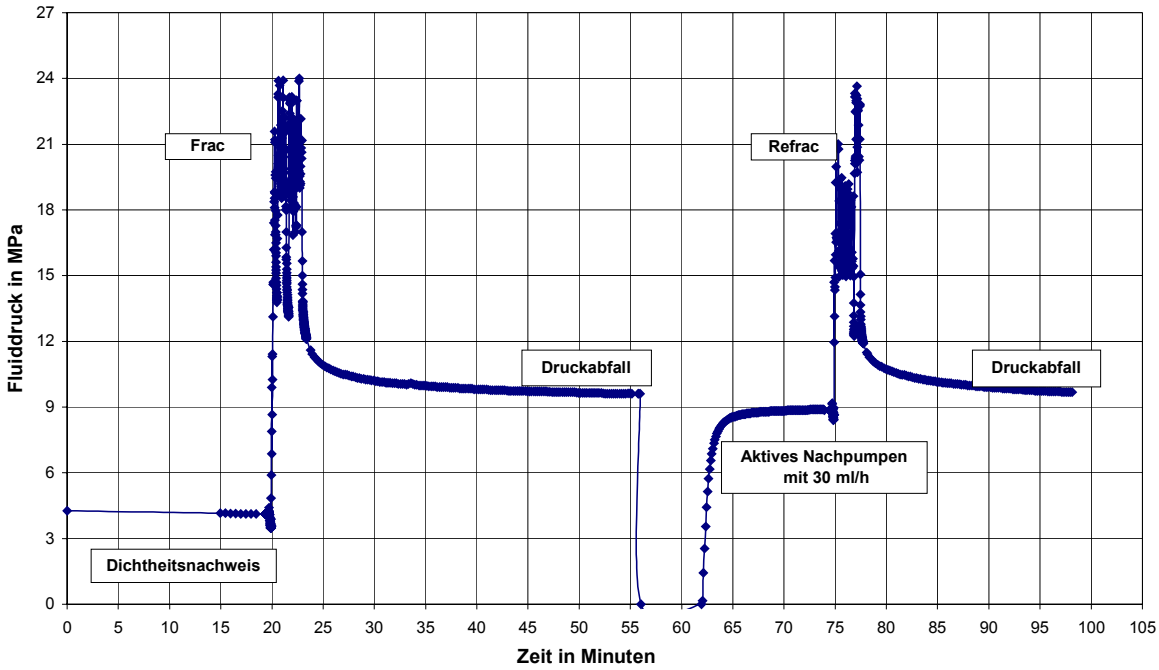

Abbildung 7 Spannungssondierung mit Hydrofrac im Steinsalz (Bohrung F7, Stoßteufe 10.4 m, Datum 06.03.2001)

Beginnend ab März 1999 bis zum Februar 2004 wurden in den 4 Steinsalzbohrungen Wiederholungsmessungen durchgeführt. In Abbildung 8 sind die ermittelten Minimalspannungen in einer Bohrlochteufe > 4 m als Mittelwerte der jeweiligen Messung dargestellt. Die Steinsalzbohrungen mit einem Durchmesser 42 mm konnten nur bis zum Februar 2001 sondiert werden. Danach war infolge der Bohrlochkonvergenz der Durchmesser zu klein. Die Bohrung F7-2 wurde 2003 unmittelbar neben der alten Bohrung F7 mit der gleichen Teufe und Richtung neu gebohrt.

Die sondierten minimalen Hauptspannungen von 8 bis 11 MPa außerhalb des unmittelbaren Streckeneinflusses sind gegenüber dem erwarteten Teufendruck grundsätzlich abgesenkt. In einer Teufe von 480 m wären mit einem Teufendruckgradienten von 24 kPa/m etwa 11,5 MPa zu erwarten. Die Spannungsabsenkung wird auf die Entlastungswirkung infolge eines ehemaligen Carnallititabbaufeldes mit einer Größe von etwa 100.000 m^2 zurückgeführt, dass sich in einer Vertikalentfernung von etwa 85 m unter dem Messort befindet. Die Messaufgabe lässt sich unter diesen Randbedingungen trotzdem erfüllen, da die durch den Steinsalzabbau verursachten Spannungsänderungen erfasst werden sollen.

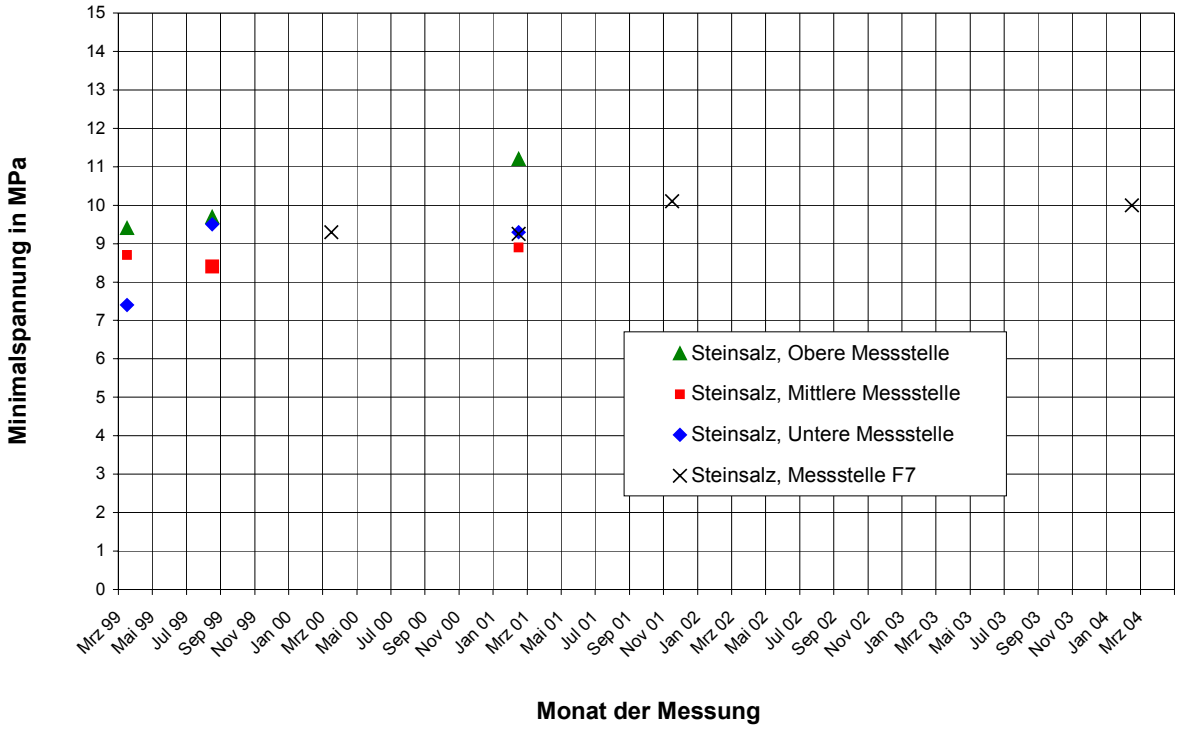

Abbildung 8 Entwicklung der Minimalspannungen im Steinsalz in einer Stoßteufe > 4 m

Die Minimalspannungssondierungen bis zum Februar 2001 zeigen Änderungen (Messwerterhöhungen und –verringerungen) von bis zu 2 MPa. Da entsprechend der Abbildungen 3 bis 5 in dieser Zeit die Gewinnung des Querabbaus 211 West und Ost sowie des Abbaus 2112 keinen Einfluss auf die ansonsten sehr sensitiv reagierenden Konvergenzmessstellen besaß, müssen diese Messwertunterschiede der Genauigkeit des Messverfahrens zugeschrieben werden. Die sich bei jeder Messung in einem Bohrloch einstellenden Ruhedrücke können von der lokalen Ausbildung des Steinsalzes (Struktur, Textur, Porosität) im jeweiligen Bohrlochabschnitt beeinflusst sein. Standardabweichungen vom Mittelwert in der Größenordnung von 10 % sind deshalb nicht ungewöhnlich.
Die Wiederholungsmessungen in der Steinsalzbohrung F 7 liefern einen eindeutigen Beleg für diese Interpretation. Bis zum Ende der Spannungssondierungen im Februar 2004 konnten keine signifikanten Änderungen des Betrages der minimalen Druckeinspannung infolge der Abbaueinwirkung im Steinsalz festgestellt werden.

6.2.2 Bestimmung der Spannungsrichtungen mittels SE-Ortung

6.2.2.1 Ablauf der Messungen und Festlegung der Messorte

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vorhabens BARIAN wurde mit den hier beschriebenen Arbeiten im Zeitraum 2002 bis 2004 das Ziel verfolgt, mittels SE-Messungen während der Hydrofrac-Versuche im Steinsalz eine Änderung der Minimalspannungsrichtung infolge des nunmehr deutlichen Abbaufortschrittes nachzuweisen. Dazu wurden im Vorhabenszeitraum zwei Frac-Serien mit jeweils 3 Frac-Versuchen und anschließendem Refrac-Versuch in der schon vorhandenen Bohrung F7 und in einer neuen Injektionsbohrung F7-2 durchgeführt.

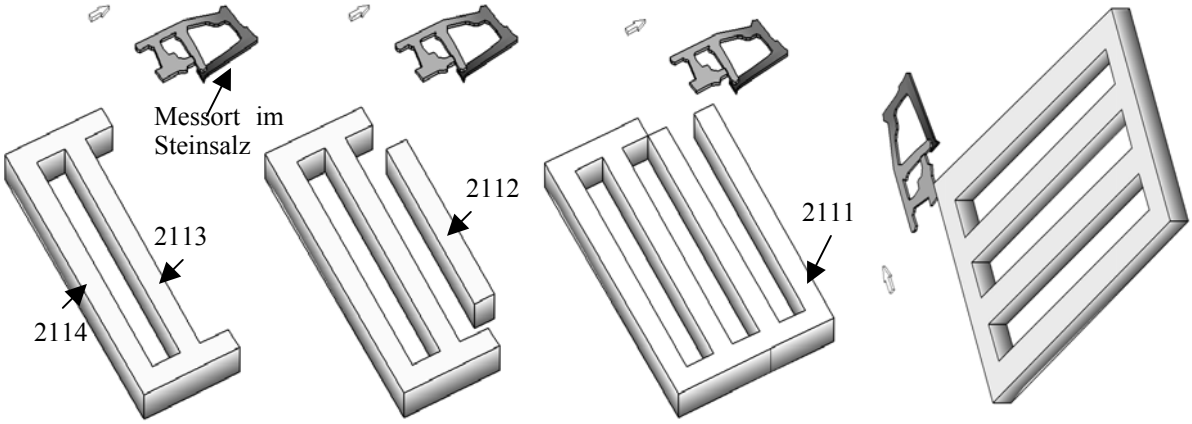

Abbildung 9 Entwicklung des Abbaukomplexes 211 in perspektivischer Darstellung mit Blick aus einer erhöhten Position nach Nordwesten bzw. rechts nach Nordosten. Im oberen Bereich sind der Streckenverlauf der Auffahrt zur Kippstelle 9b und im unteren Bereich die Großkammern 2111 bis 2114 dargestellt. Der Pfeil zeigt nach Norden.

Abbildung 9 zeigt in vier perspektivischen Teilbildern mit Blick aus einer erhöhten Position (Höhenwinkel 58°) nach Nordwesten bzw. nach Nordosten den Abbaustand ab Frühjahr 1999 bis zum Abbauende im Frühjahr 2003. Zur besseren Darstellung der zeitlichen Entwicklung wurden auch die Abbaustände der Messkampagnen aus dem Projekt BARIAN mit aufgenommen.
In der Abbildung ist der Abbaukomplex 211 dargestellt, der aus vier 35 m hohen und 20 m

breiten Abbaukammern (Kammer 2111 bis 2114) besteht. Die Länge der Abbaukammern beträgt etwa 220 m. Zwischen den Kammern befinden sich Langpfeiler mit einer Breite von 28 m. Der eigentliche Messort befindet sich in der nördlich vom Abbaukomplex 211 am westlichen Ende gelegenen Liegendauffahrt zur Kippstelle 9b (Abbildung 9 oben mit Pfeil nach Norden).

Nach der Gewinnung der Abbaue 2114 und 2113 im April 1999 (Teilbild links) wurde die erste Frac-Serie im Steinsalz im März 2000 durchgeführt. Die zweite Frac-Serie im Steinsalz erfolgte im Februar und März 2001. Bis zu diesem Datum wurde die Großkammer 2112 bis zur Hälfte leergefördert (zweites Teilbild von links). Der Abstand zwischen dem Versuchsort und der nördlichen Kante der Abbaufront betrug etwa 150 m. Die dritte Frac-Serie im Steinsalz wurde noch während des Abbaus der am nördlichsten gelegenen Kammer 2111, mit der erst im Herbst 2001 begonnen wurde, im November 2001 durchgeführt. Bis zum Jahreswechsel war die Kammer etwa zu zwei Dritteln abgebaut (drittes Teilbild von links). Die Abbaufront näherte sich dem Versuchsort bis auf 100 m. Bei diesem Abbaustand wurde im Rahmen von nunmehr BARIAN II die vierte Frac-Serie im Steinsalz (Dezember 2002) realisiert. Die fünfte und letzte Frac-Serie im Steinsalz erfolgte im Februar 2004. Der Abstand zwischen dem Messort in der Auffahrt zur Kippstelle 9b und dem nördlichen Rand des Abbaukomplexes betrug am Ende nur noch 50 bis 60 m.

Die Tabelle 2 gibt für alle im Steinsalz durchgeführten Messungen die wesentlichen Versuchsparameter an. Im Rahmen der vierten Serie Anfang Dezember 2002 im Projekt BARIAN II wurden in 2,5 m, 5,5 m und 7,45 m jeweils ein Frac- und ein Refrac-Versuch noch in der alten Bohrung F7 vorgenommen. Bei der fünften Frac-Serie etwa 14 Monate später Ende Februar 2004 wurden drei Versuche in 4,0 m, 6,0 m und 8,0 m Bohrlochteufe realisiert. Hierzu wurde parallel zur Bohrung F7 eine neue Injektionsbohrung F7-2 etwa 3 m südlich der Bohrung F7 erstellt. Die verpresste Flüssigkeitsmenge betrug nach der Risserzeugung im allgemeinen 300 ml (jeweils für Frac und Refrac).

		Datum	Versuchs-bezeichnung	Teufe	Zahl der Ortungen	Flüssigkeitsmenge [ml]	
						Frac	Refrac
Projekt BARIAN	1. Serie	7. März 2000	NaF7-5m-3.00	5,0 m	1414	50	200
		7. März 2000	NaF7-8m-3.00	8,0 m	884	100	200
		8. März 2000	NaF7-10m-3.00	10,0 m	536	100	200
	2. Serie	23. Feb. 2001	NaF7-9m-2.01	9,0 m	649	200	-
		6. März 2001	NaF7-10m-3.01	10,4 m	477	200	200
		6. März 2001	NaF7-9m-3.01	9,0 m	888	400	100
	3. Serie	20. Nov. 2001	NaF7-4m-11.01	4,0 m	5232	200	100
		20. Nov. 2001	NaF7-10m-11.01	10,0 m	1270	200	200
		20. Nov. 2001	NaF7-7m-11.01	7,0 m	2458	200	100
		20. Nov. 2001	NaF7-2m-11.01	2,0 m	6155	200	100
Projekt BARIAN II	4. Serie	10. Dez. 2002	NaF7-3m-12.02	2,5 m	9083	300	300
		10. Dez. 2002	NaF7-6m-12.02	5,5 m	1670	300	300
		10. Dez. 2002	NaF7-8m-12.02	7,45 m	517	300	300
	5. Serie	20. Feb. 2004	NaF7-2-4m-2.04	4,0 m	324	300	300
		20. Feb. 2004	NaF7-2-6m-2.04	6,0 m	853	300	300
		20. Feb. 2004	NaF7-2-8m-2.04	8,0 m	731	300	300

Tabelle 2 Datum, Bohrlochteufe, Zahl der Ortungen und Injektionsmenge der Frac-Serien im Steinsalz

6.2.2.2 Darstellung der georteten SE-Ereignisse

Eine Gesamtübersicht über die Ortungen der vierten Frac-Serie im Dezember 2002 in Bohrung F7 zeigt Abbildung 10. Dieses Bild gibt, wie alle späteren Darstellungen dieser Art, die Projektionen der georteten Quellen auf die drei Koordinatenebenen wieder.

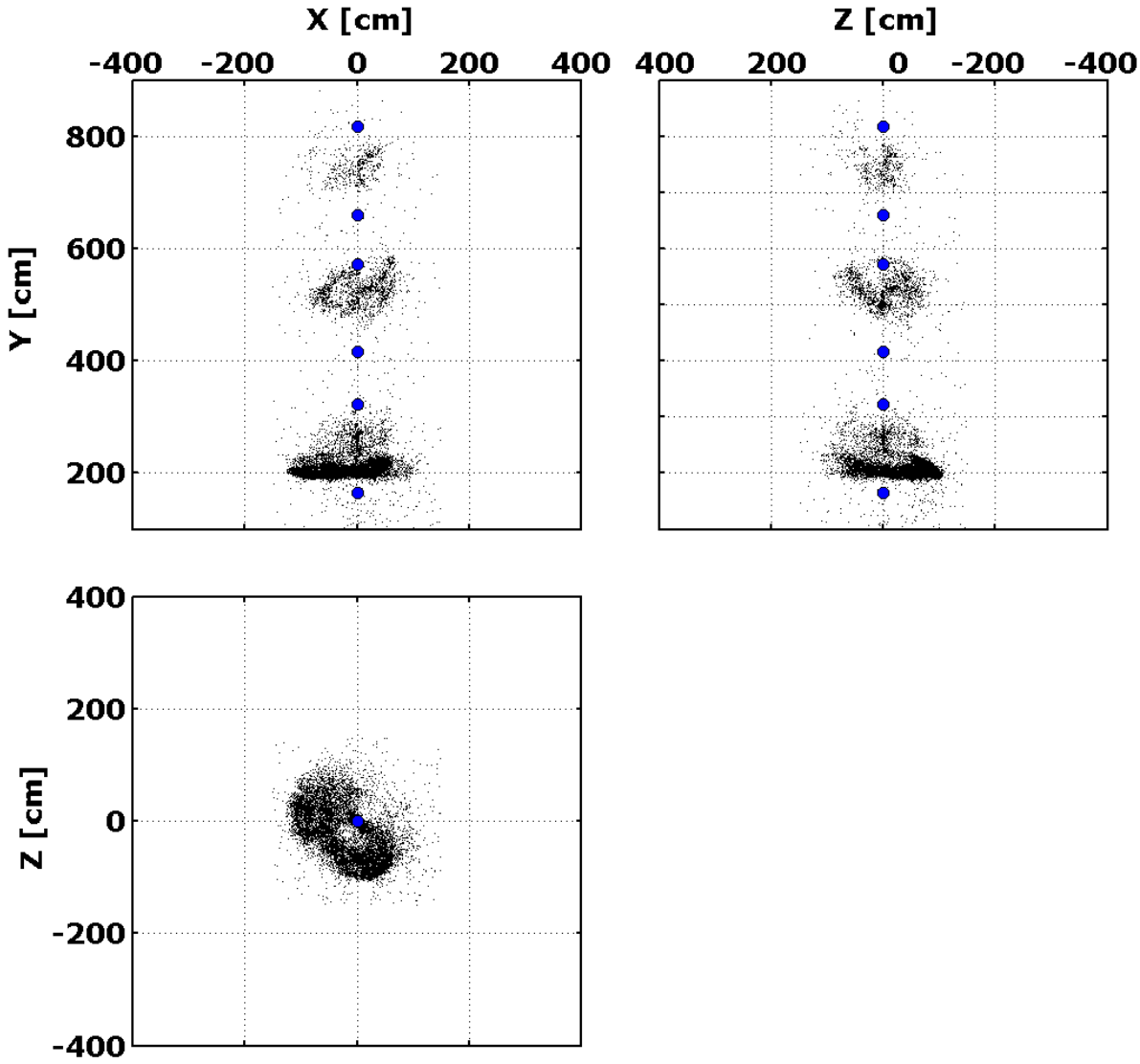

Abbildung 10 Projektion der Ereignisse der vierten Frac-Serie auf die drei Koordinatenebenen im Steinsalz in Bohrung F7 (Gesamtdarstellung)

Zu sehen ist mit der x-y-Ebene (links oben) die Aufsicht von oben, die x-z-Ebene (links unten) gibt die Sicht auf den Bohrlochmund wieder und die y-z-Ebene (rechts oben) die Seitenansicht längs der Bohrung.

Das Koordinatensystem ist so orientiert, dass die Bohrlochachse parallel zur y-Achse verläuft. Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems liegt im Ansatzpunkt der Bohrung. Die Zahlen an den Koordinatenachsen geben die Entfernung vom Ursprung in Zentimetern an. Die Lage der Aufnehmerkränze ist durch blaue Punkte markiert. Das etwa 50 cm lange Injektionsintervall liegt zwischen den beiden Aufnehmerkränzen. In diesem Bild sind alle

Ortungen des Frac- und Refrac-Versuchs zusammen dargestellt. Während der drei Frac-Versuche wurden insgesamt 11.324 Ereignisse geortet. Davon entfallen, wie schon früher festgestellt, die meisten Ereignisse, nämlich 9.083, auf den stoßnahen Versuch NaF7-3m-12.02 in 2,5 m Bohrlochteufe, 1.670 Ereignisse auf der Versuch NaF7-6m-12.02 in 5,5 m Bohrlochteufe und 517 auf den Versuch NaF7-8m-12.02. in 7,45 m Bohrlochteufe.

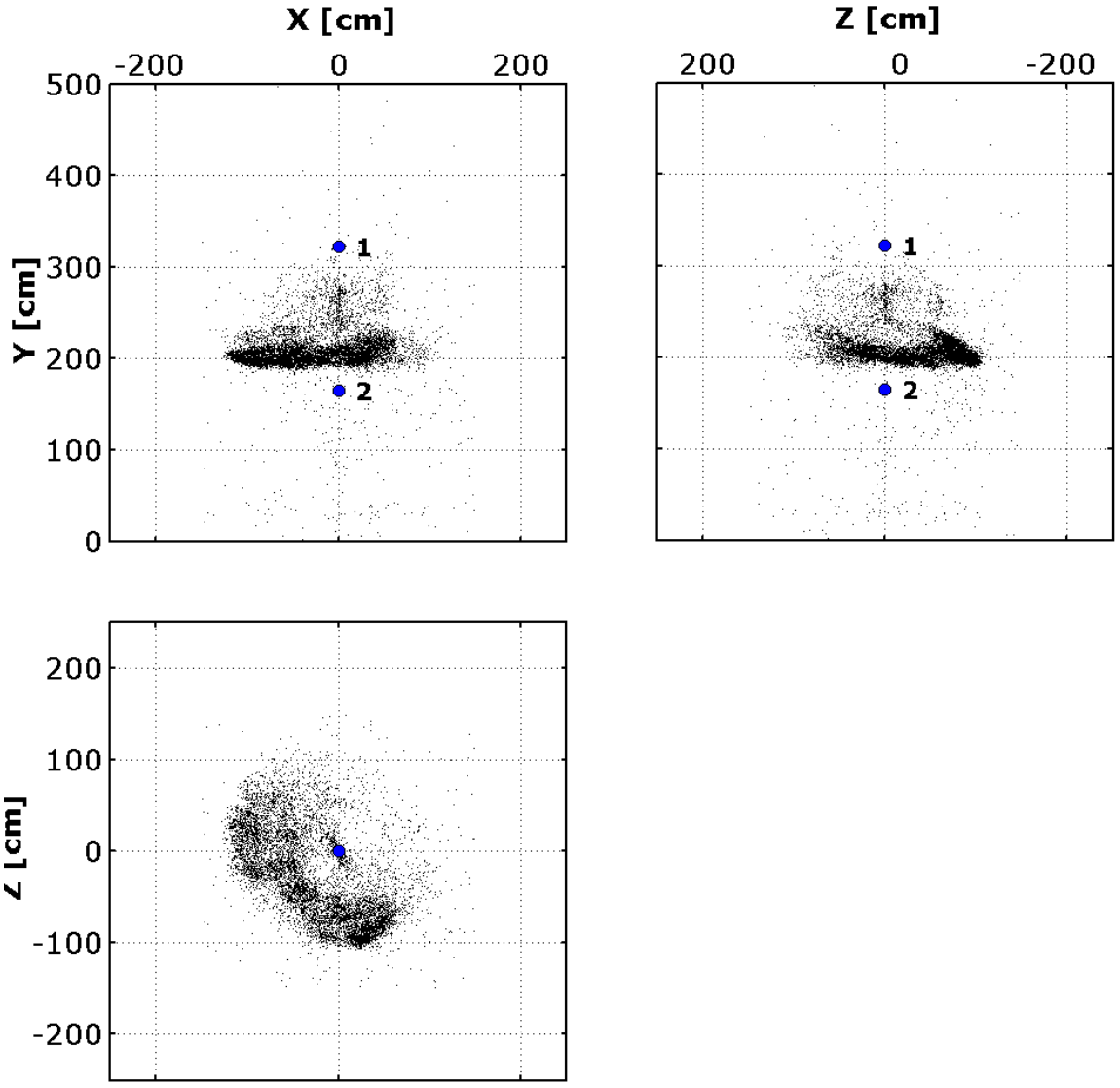

Abbildung 11 Einzeldarstellung der Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-3m-12.02 in 2,5 m Bohrlochteufe

Im folgenden sollen die Einzeldarstellungen der 4. Frac-Serie diskutiert werden. In Abbildung 11 sind die 9.083 georteten Ereignisse aus Versuch NaF7-3m-12.02 in 2,5 m Bohrlochteufe

dargestellt. Es zeigt sich, dass der Riss am vorderen Ende des Injektionsintervalls eingeleitet wird und sich quer zur y-Achse, d.h. quer zur Injektionsbohrung, ausbreitet. Ins Auge fällt sofort die scharfe Begrenzung der elliptischen Rissfläche, die parallel zum Stoß verläuft. Der Riss steht senkrecht und hat einen maximalen Radius von etwa 1,2 m. Die meisten Ereignisse liegen links und unterhalb des Bohrlochmundes. Bei genauerer Betrachtung des Bildes fällt eine linienförmige Anordnung auf, die sich, vom Bohrlochmund aus gesehen, hinter der Rissfläche entlang des Bohrloches erstreckt (gut zu sehen in der x-y-Ebene und y-z-Ebene in Abbildung 11). Diese Ereignisse stammen aus dem 50 cm langen Injektionsintervall und bilden dieses bemerkenswert gut ab.
In der x-z-Ebene in Abbildung 11 deutet sich am Koordinatenursprung ein Längsriss an, der etwa um 45° zur vertikalen Achse gedreht ist.

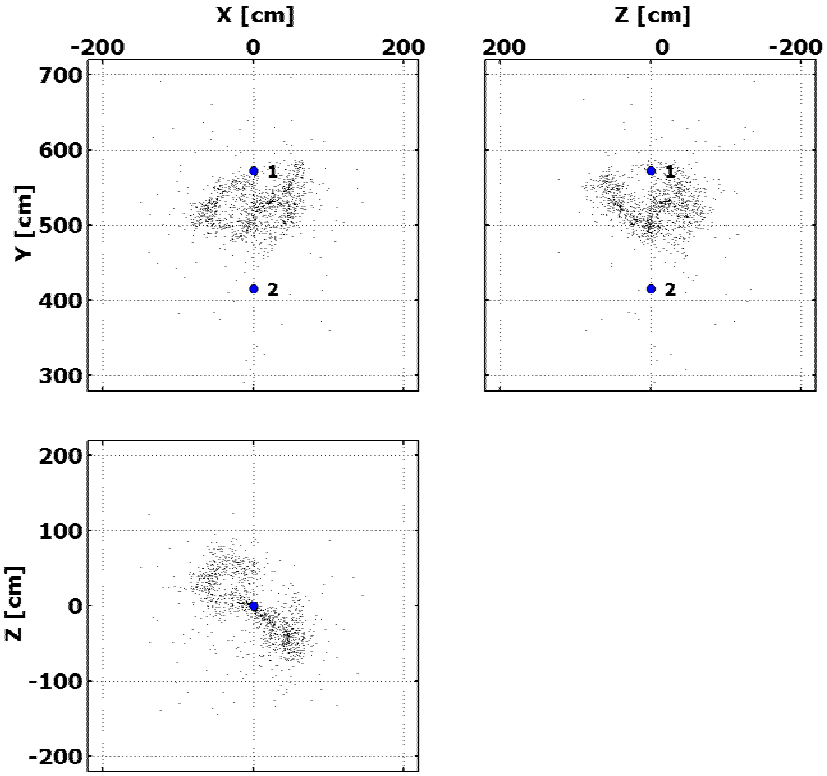

Abbildung 12 Projektionen der Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-6m-12.02 in 5,5 m Bohrlochteufe auf die drei Koordinatenebenen

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse des Frac- und Refrac-Versuchs in 5,5 m Teufe (NaF7-6m-12.02) in den drei Projektionen und Abbildung 13 des gleichen Versuchs in einem gedrehten Koordinatensystem. Die Drehung des Koordinatensystems basiert auf einem mathematischen Ausgleichsverfahren mit dem Ziel einer besser konturierten Darstellung

ebener Strukturen im dreidimensionalen Raum. Bei diesem mathematischen Ausgleichsverfahren werden die beiden Drehwinkel φ (Azimut) und ϑ (Neigungswinkel) ermittelt, bei denen das Volumen eines achsenparallelen Quaders bei Drehung um zwei senkrecht zueinander stehende Achsen ein Minimum erreicht. Die Seitenlängen des Quaders ergeben sich dabei aus den mittleren Streuungen der Punktwolke um den Schwerpunkt in allen drei Koordinatenrichtungen. 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. Diese Drehungen erfolgen in zwei Schritten: zunächst relativ grob in 10°- bzw. 5°-Schritten und dann verfeinert in 1°- bzw. ½°-Schritten zur besseren Auflösung des im ersten Schritt gefundenen Volumenminimums. Aus den beiden so gewonnenen Drehwinkeln kann die Normalenrichtung der Rissfläche (entspricht der Richtung der minimalen Hauptspannung) ermittelt werden. Die Rissfläche ist dabei streng genommen als dreidimensionaler Bereich im Gesteinsgefüge aufzufassen, in den das Fluid penetriert ist und zu SE-Ereignissen geführt hat. Der Penetrationsbereich wird durch den "umhüllenden" Quader minimalen Volumens beschrieben.

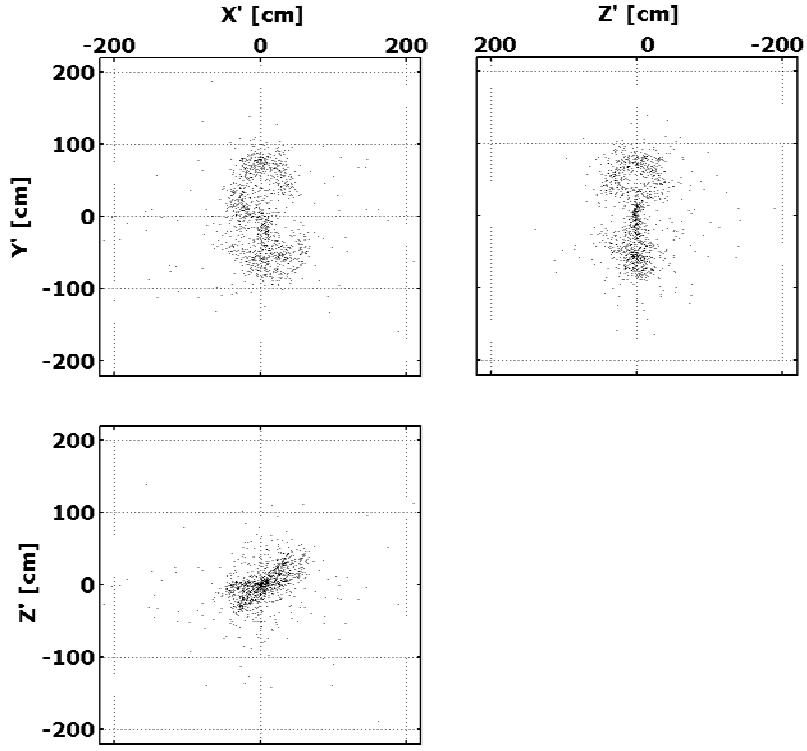

Abbildung 13 Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-6m-12.02 in 5,5 m Bohrlochteufe im gedrehten Koordinatensystem

Im gedrehten Koordinatensystem in Abbildung 13 wird deutlich, dass sich auch bei diesem Frac-Versuch eine Rissfläche gebildet hat, an deren Enden sich flügelförmige, um 45°

gedrehte Teilrisse (siehe x'-z'-Ebene in Abbildung 13 unten) befinden. Die gesamte Rissfläche hat eine maximale Längserstreckung in y'-Richtung von etwa 2 m.

Die Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-8m-12.02 in 7,45 m Bohrlochteufe sind in den drei Projektionsebenen in Abbildung 14 und im gedrehten Koordinatensystem in Abbildung 15 dargestellt. Bei diesem Frac-Versuch verläuft die Rissfläche längs zur Injektionsbohrung (x-y-Ebene und y-z-Ebene in Abbildung 14). Sie liegt zwischen den Aufnehmerkränzen und erstreckt sich über das gesamte Injektionsintervall. Sie ist um etwa 45° aus der vertikalen Ebene herausgedreht. Im gedrehten Koordinatensystem in Abbildung 15 ist eine ebene Rissfläche (abgesehen von einigen gestreuten Ereignissen) mit einem Durchmesser von 1,45 m erkennbar.

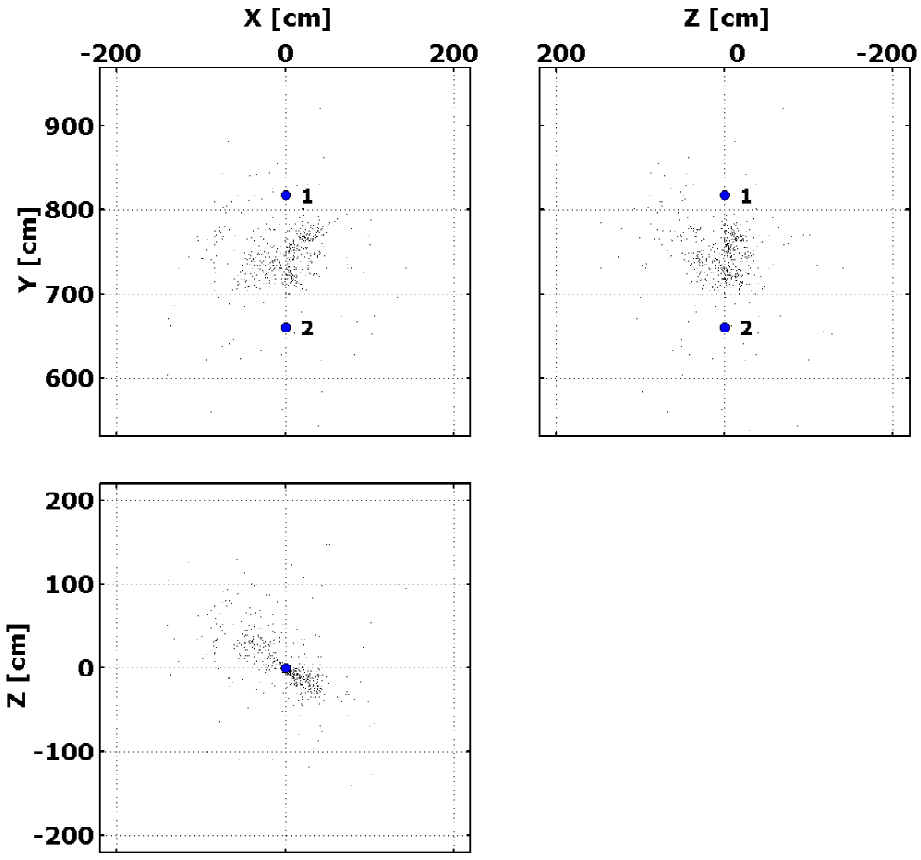

Abbildung 14 Projektionen der Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-8m-12.02 in 7,45 m Bohrlochteufe auf die drei Koordinatenebenen

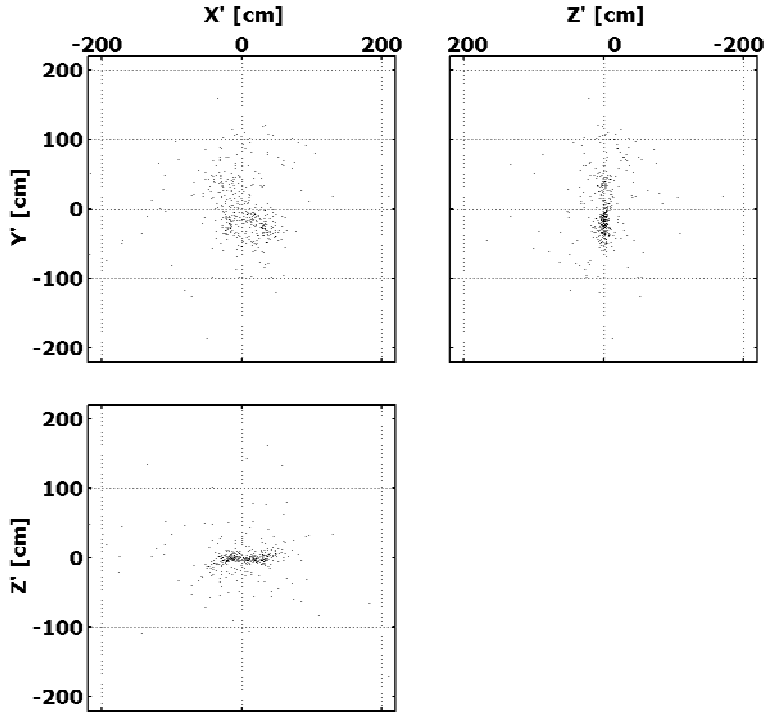

Abbildung 15 Ereignisse des Frac-Versuchs NaF7-8m-12.02 in 7,45 m Bohrlochteufe im gedrehten Koordinatensystem

Etwa 14 Monate nach der 4. Frac-Serie im Februar 2004 wurde die fünfte und letzte Frac-Serie im Bohrloch F7-2 durchgeführt. Abbildung 16 zeigt die Lage aller Schallemissions-Ereignisse. Die Injektionen fanden in Bohrlochteufen bei 4 m, 6 m und 8 m statt. Die SE-Messungen wurden häufig durch Betriebsgeräusche aus der benachbarten Förder- und Bandstrecke gestört, was zu einer relativ geringen Ortungsausbeute (vgl. Tabelle 2) führte. In dem Bild sind 1.908 Ortungen aus den drei Frac-Versuchen dargestellt. Obwohl die Ortungsausbeute gering ausfiel, markieren dennoch genügend viele Ereignisse in Abbildung 16 die Rissflächen. In Abbildung 17 sind die drei Frac-Versuche, wieder in einer Gesamtdarstellung, im gedrehten Koordinatensystem dargestellt. Der Drehpunkt liegt bei allen Versuchen im jeweiligen Koordinatenschwerpunkt der georteten Ereignisse.

In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass alle Rissflächen eine ähnliche Gestalt besitzen. Die Ereignisse erstrecken sich zwischen den beiden Aufnehmerkränzen (der Abstand beträgt etwa 1,5 m) in Querrichtung. An den Rändern der Rissflächen sind stellenweise Ortungsanhäufungen zu sehen. Die elliptische Form in der Projektion auf die x-z-Ebene (unteres Teilbild in Abbildung 16) gibt einen Hinweis auf längs erstreckte Rissflächen. Die tatsächliche Form und Ausdehnung der Rissfläche wird in Abbildung 17 durch Drehung der

Koordinatenachsen deutlich. Die Rissflächen besitzen eine elliptische Form mit einem maximalen Durchmesser von ca. 2,0 bis 2,25 m.

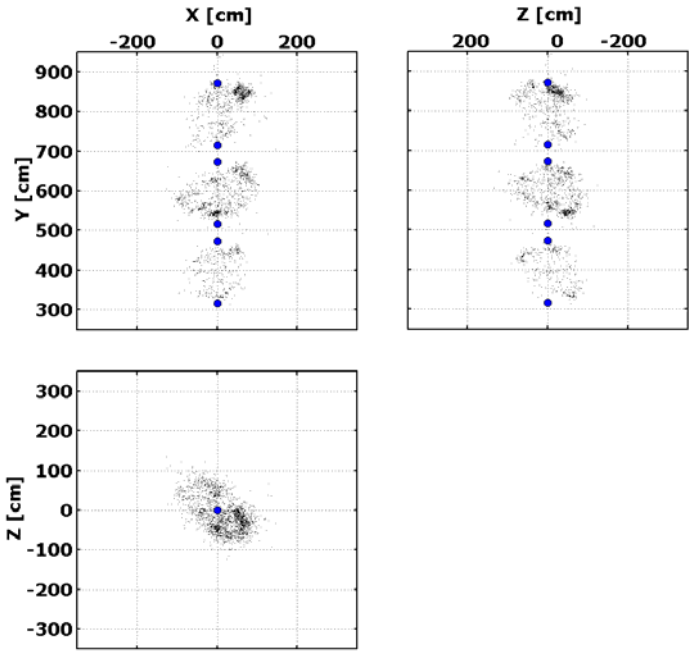

Abbildung 16 Projektion aller Ereignisse der fünften Frac-Serie im Steinsalz in Bohrung F7-2 auf die drei Koordinatenebenen, Februar 2004

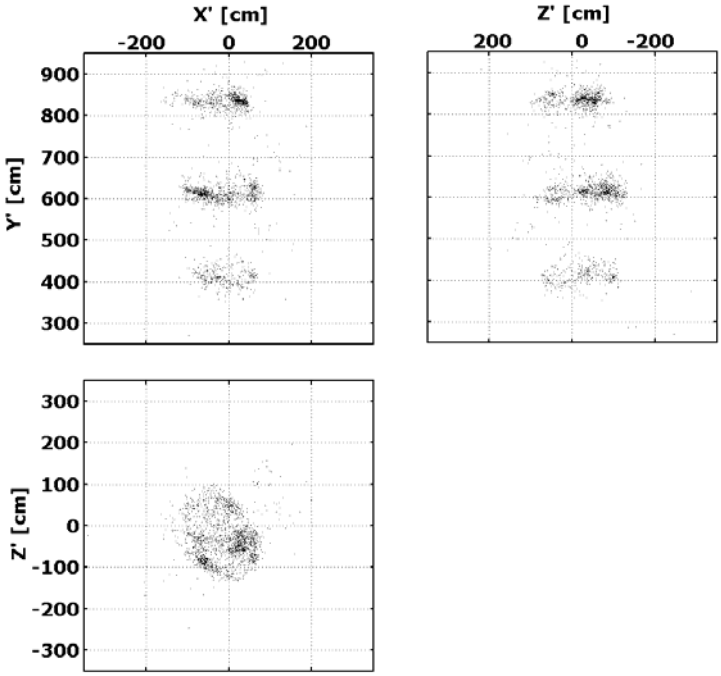

Abbildung 17 Ereignisse der fünften Frac-Serie im gedrehten Koordinatensystem

6.2.2.3 Bestimmung der Richtung der minimalen Hauptspannung

Im folgenden werden zur Untersuchung der Richtungsänderungen von σ_{min} infolge des Steinsalzabbaues neben den Ergebnissen der beiden zuletzt durchgeführten Frac-Serien im Dezember 2002 und Februar 2004 auch die der früheren Frac-Serien im März 2000, Februar/März 2001 und November 2001 herangezogen. Insgesamt wurden bei den fünf Frac-Serien 16 Einzelfrac-Versuche durchgeführt (jeweils mit Refrac). Zu bemerken ist, dass bei allen Versuchen die Risslage und damit die Orientierung der minimalen Hauptspannung anhand der georteten Ereignissen ermittelt werden konnte.

Abbildung 18 zeigt eine Gesamtübersicht der Durchstoßpunkte der Normalen der Rissflächen aller Frac-Versuche in einer flächentreuen Projektion („equal area projection“) auf die untere Erdhalbkugel. Die rote Linie markiert die Richtung der Injektionsbohrung, die vom Bohrlochansatz aus in östliche Richtung weist. Die einzelnen Frac-Serien sind zur Unterscheidung durch verschiedene Farben gekennzeichnet: *Blau* die 1. Frac-Serie im März 2000, *gelb* die 2. Frac-Serie im Februar und März 2001, *rot* die Frac-Serie im November 2001, *cyan* die 4. Frac-Serie im Dezember 2002 und *grün* die 5. Frac-Serie im Februar 2004. Frac-Versuche in größerer Bohrlochteufe ab 4 m sind durch Kreise und in geringere Teufe bis 4 m durch Quadrate markiert.
Entsprechend Abbildung 18 stehen die Risse im stoßnahen Bereich (Quadrate) relativ steil und verlaufen nahezu stoßparallel. Eine Ausnahme bildet der Frac-Versuch NaF7-2-4m-2.04 aus der 5. Frac-Serie in 4 m Bohrlochteufe. Die Werte des Einfallswinkels gegenüber der vertikalen Achse (gemessen von der horizontalen Ebene nach unten) liegen im stoßnahen Bereich bei 18° bis 32,5° und die Werte des Azimut-Winkels im Bereich zwischen 81° und 72° (gemessen von Norden im Uhrzeigersinn). Mit zunehmender Bohrlochteufe drehen sich die Rissflächennormalen nach Norden und fallen steiler ein. Die Azimut-Winkel liegen bei Werten zwischen 30° und 60°. Eine weitere Ausnahme bildet hier die Rissfläche des Frac-Versuchs in 7,45 m Bohrlochteufe aus der vorletzten Frac-Serie im Dezember 2002. Sie liegt nahezu achsparallel mit einem Azimut-Winkel von 19°. Die Neigungswinkel der meisten Rissflächen streuen im Bereich zwischen 35° und 55°.
Beim Vergleich der beiden jüngeren Frac-Serien (grün und cyan eingefärbte Punkte) mit den drei vorangegangenen Messkampagnen (blau, gelb und rot eingefärbte Punkte) lässt sich eine Tendenz zu kleineren Azimut-Winkeln feststellen. Während der mittlere Azimut-Winkel bis November 2001 51,5° betrug (gemittelt aus acht Messwerten in Bohrlochteufen größer als 4 m), lag er bei den letzten beiden Frac-Versuchen bei etwa 34° (gemittelt aus 5

Messwerten). Wie auch schon bei den ersten drei Frac-Serien festgestellt, bleibt der Neigungswinkel etwa gleich.

Stellt man, wie die Abbildungen 19 bis 23 in perspektivischer Darstellung mit Blick aus einer leicht erhöhten Position zeigen, den Flächennormalenvektor (blaue Linie) und die Ortungen (rote Punkte) zusammen mit den Strecken und der Auffahrt zur Liegendkippstelle 9b sowie den Abbauen des Abbaukomplexes 211 dar, so ist eine räumliche Zuordnung der minimalen Hauptspannung zu den Abbauen möglich. Der Pfeil zeigt wieder in nördliche Richtung. In den Bildern ist der jeweilige Abbaustand des Abbaukomplexes 211 (hier nur der westliche Teil dargestellt) vor Durchführung der Messungen eingezeichnet.

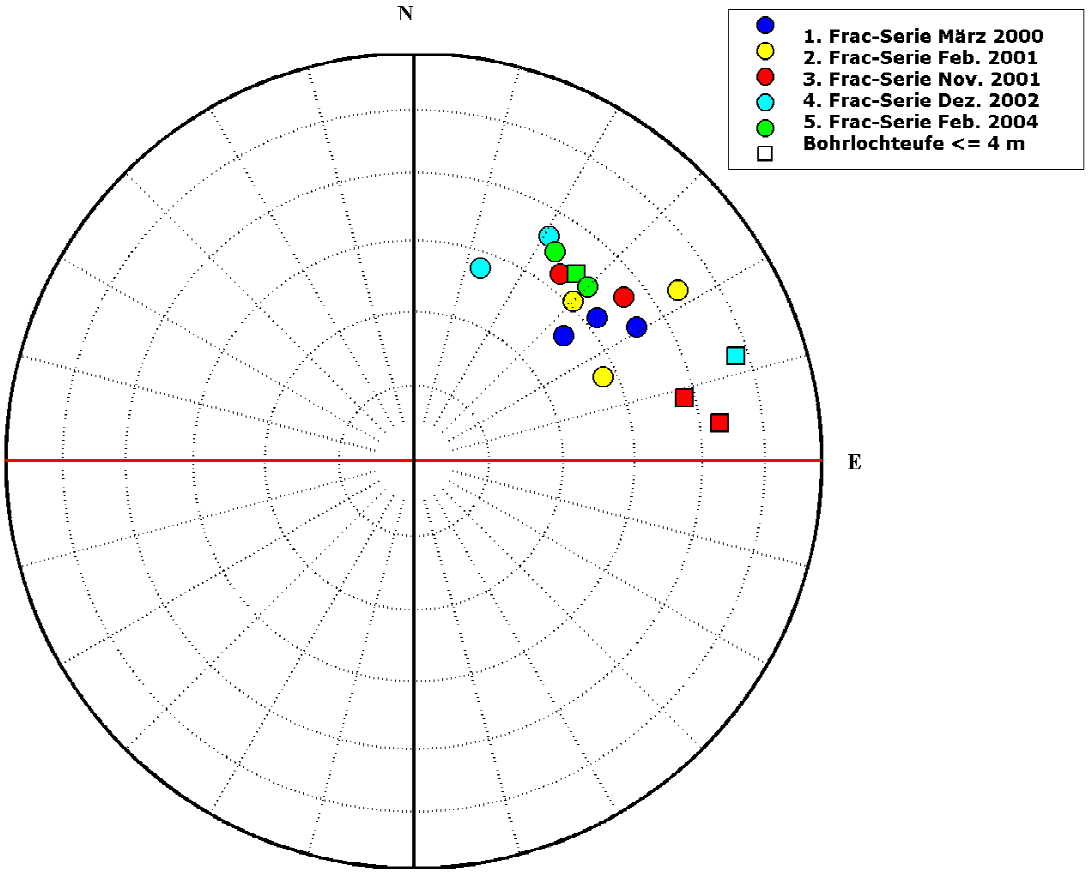

Abbildung 18 Richtung der minimalen Hauptspannung aller Frac-Versuche, dargestellt als Durchstoßpunkte der Flächennormalen in flächentreuer Projektion auf die untere Erdhalbkugel.

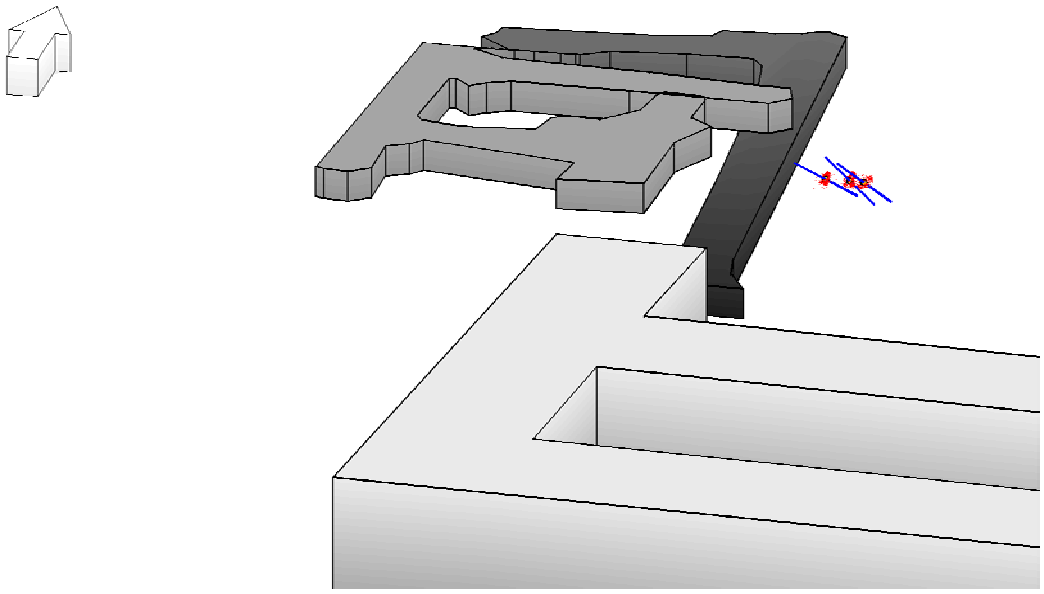

Abbildung 19 Orientierung der minimalen Hauptspannung (blaue Linien) mit Ortungen (rot), gemessen bei der ersten Frac-Serie im März 2000

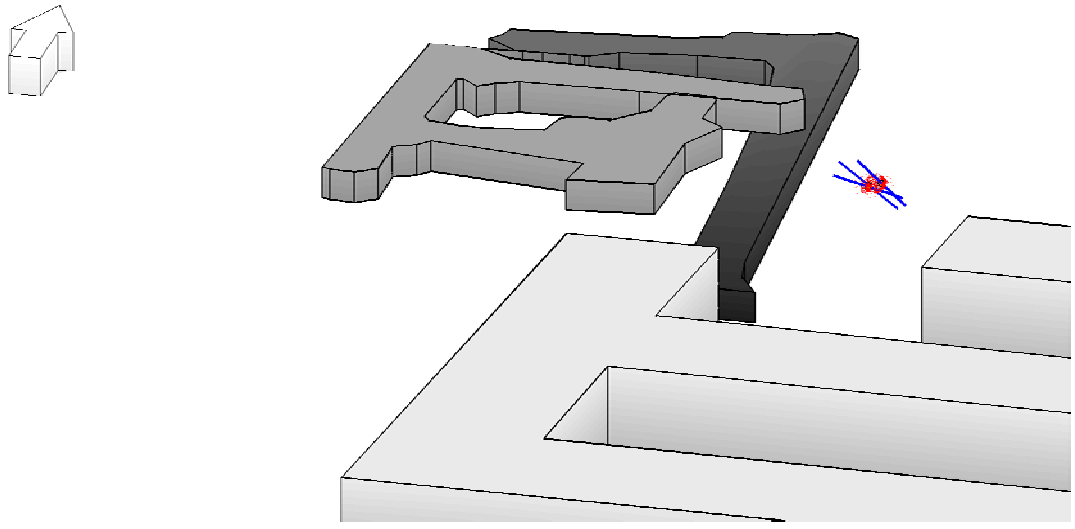

Abbildung 20 Orientierung der minimalen Hauptspannung (blaue Linien) mit Ortungen (rot), gemessen bei der zweiten Frac-Serie im Februar/März 2001

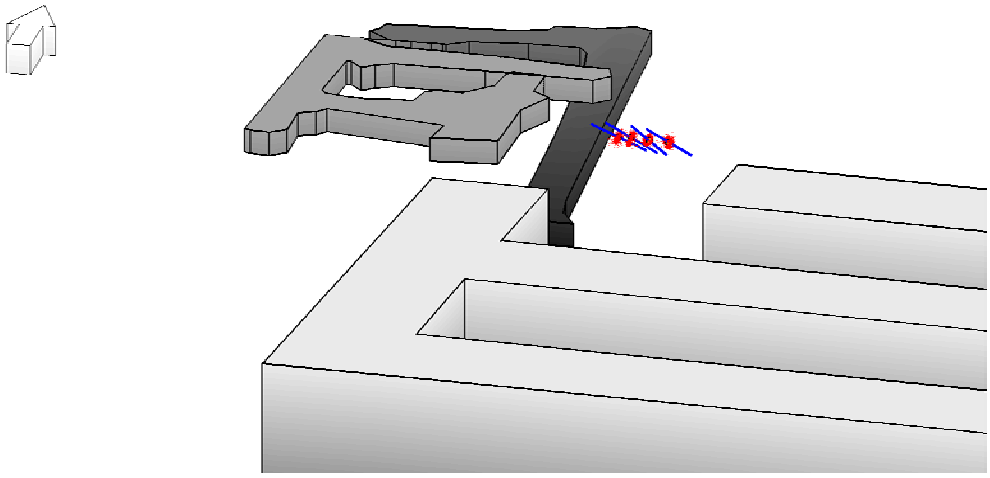

Abbildung 21 Orientierung der minimalen Hauptspannung (blaue Linien) mit Ortungen (rot), gemessen bei der dritten Frac-Serie im November 2001

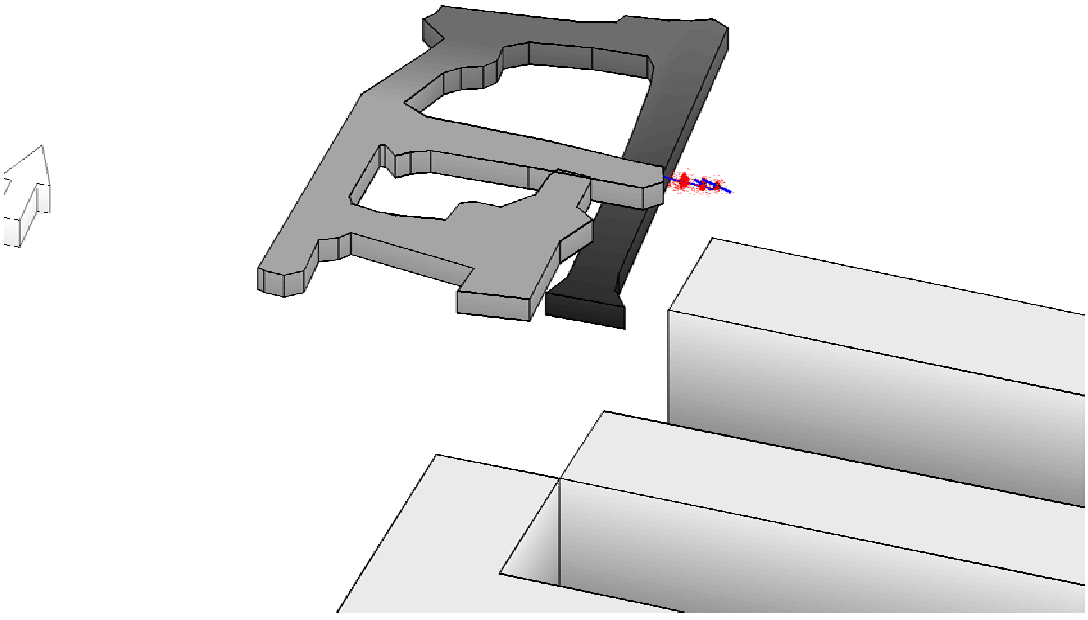

Abbildung 22 Orientierung der minimalen Hauptspannung (blaue Linien) mit Ortungen (rot), gemessen bei der vierten Frac-Serie im Dezember 2002

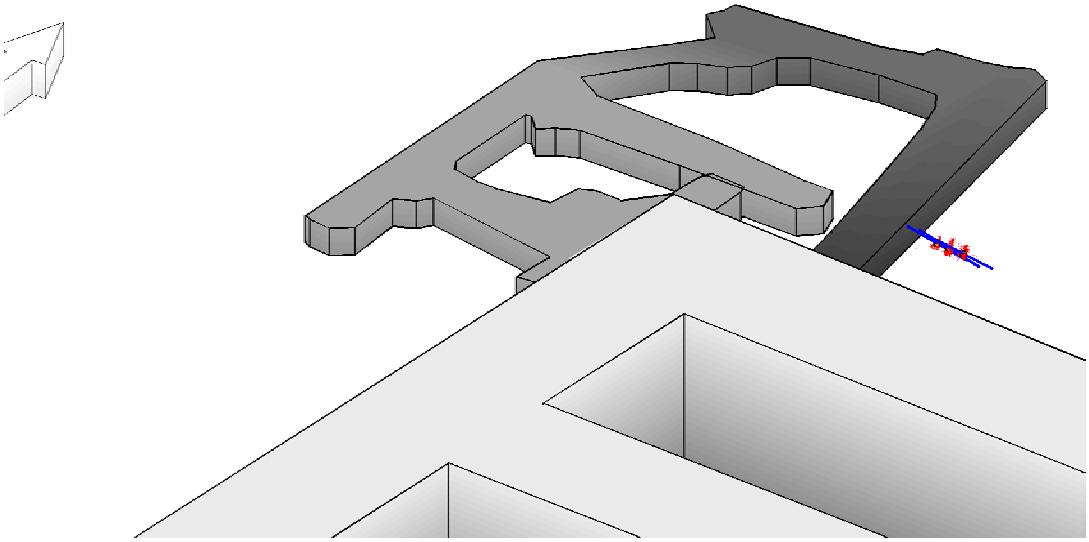

Abbildung 23 Orientierung der minimalen Hauptspannung (blaue Linien) mit Ortungen (rot), gemessen bei der fünften Frac-Serie im Februar 2004

6.3 Messkampagnen im Anhydrit

6.3.1 Ermittlung der Abströmwiderstände im Anhydrit

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 2 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)

Die Bohrungen stehen nahezu senkrecht aufeinander und spannen ein rechtwinkliges Koordinatensystem auf. Diese Orientierung ist wesentlich für die Auswertung der noch zu beschreibenden Bohrlochschlitzmessungen.

Vor der Festlegung der Bohrlochansatzpunkte erfolgte eine Erstbemusterung des aufgeschlossenen Anhydritstoßes mit der Zielstellung, dass die Bohrungen möglichst die am Stoß zu erkennenden offenen und mit Carnallit gefüllten Klüfte durchstoßen sollten. In diesen Bereichen sollten dann in den Wiederholungsmessungen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt die Spannungen und hydraulischen Parameter als Kennwerte für die Gebirgsintegrität bestimmt werden.
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. Die Bohrlochkamera und die Bemusterungsresultate sind in IfG 2002 beschrieben. Im Rahmen des hier vorliegenden Berichtes werden lediglich die Bemusterungsbefunde aus den in den Wiederholungs-messungen verwendeten Bohrlochabschnitten noch einmal dargestellt.

Die Spannungssondierungen in den Anhydritbohrungen F1, F2 und F3 wurden in kompakten und ungeklüfteten Bereichen sowie in ausgewählten Zonen mit zu erwartender verringerter Dichtheit durchgeführt. Die Auswahl basierte auf den oben dargestellten Methoden der Bohrkern- und Bohrlochkamerabemusterung. Dabei ist festzustellen, dass in

Bohrlochbereichen mit geöffneten Anhydritklüften grundsätzlich weder eine Spannungssondierung, noch eine Bestimmung hydraulischer Parameter möglich war. Es konnte kein dichter Bohrlochabschnitt separiert werden und die Sonde musste etwa 1 m verschoben werden. In den 3 Bohrungen war das in 5 Testabschnitten der Fall, obwohl die Bereiche mit ausgeprägter Klüftigkeit schon von vornherein ausgeschlossen wurden. In Abschnitten mit geschlossenen Klüften, mit Carnallit verwachsenen Klüften sowie mit bitumengefüllten Suturen waren die geplanten Untersuchungen durchführbar.

In den Abbildungen 24, 25 und 26 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 fand im März 2001 und die Wiederholungsmessungen mit weiteren Refracs im März 2002 sowie Oktober 2002 statt.
Die Druckverläufe zeigen, dass es in vergleichbarer Weise wie im Steinsalz (Abbildungen 6 und 7) möglich ist, den nach dem Frac in der "shut in" Phase stattfindenden Fluiddruckabfall infolge der weiteren Penetration mit einer geringen Nachverpressung zu stoppen. Die Abströmwiderstände im Rissgebiet sind dabei wesentlich stärker gegenüber der Fluidrate sensitiv als im Steinsalz. Im März 2001 wurde ein konstanter Abströmwiderstand von 9 MPa bei einer Verpressrate von 35 ml/h gefunden. Eine Rate von 30 ml/h war zu niedrig und von 40 ml/h zu hoch zum Erreichen der Druckkonstanz.

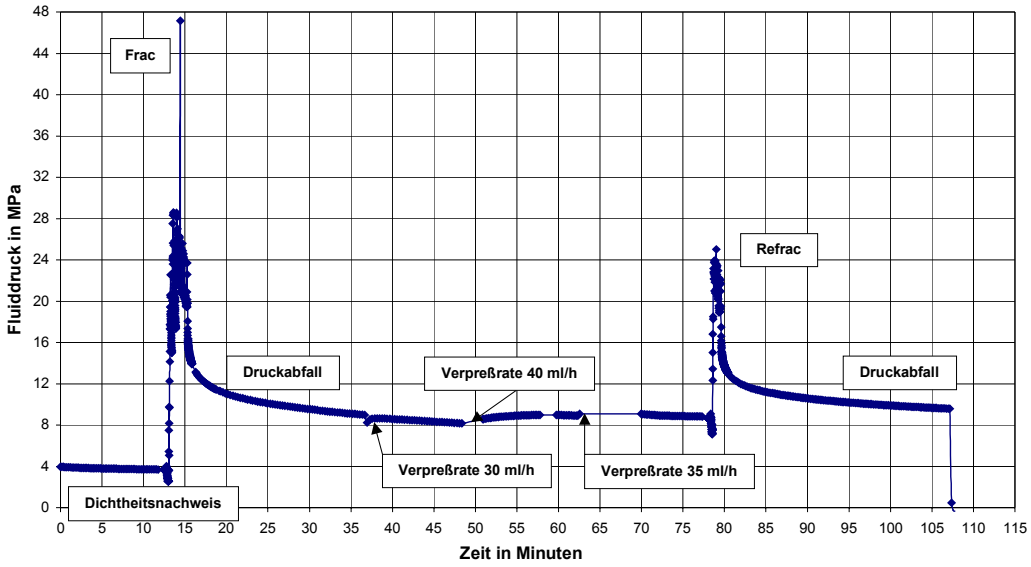

Abbildung 24 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 4,7 m, Datum 22.03.2001

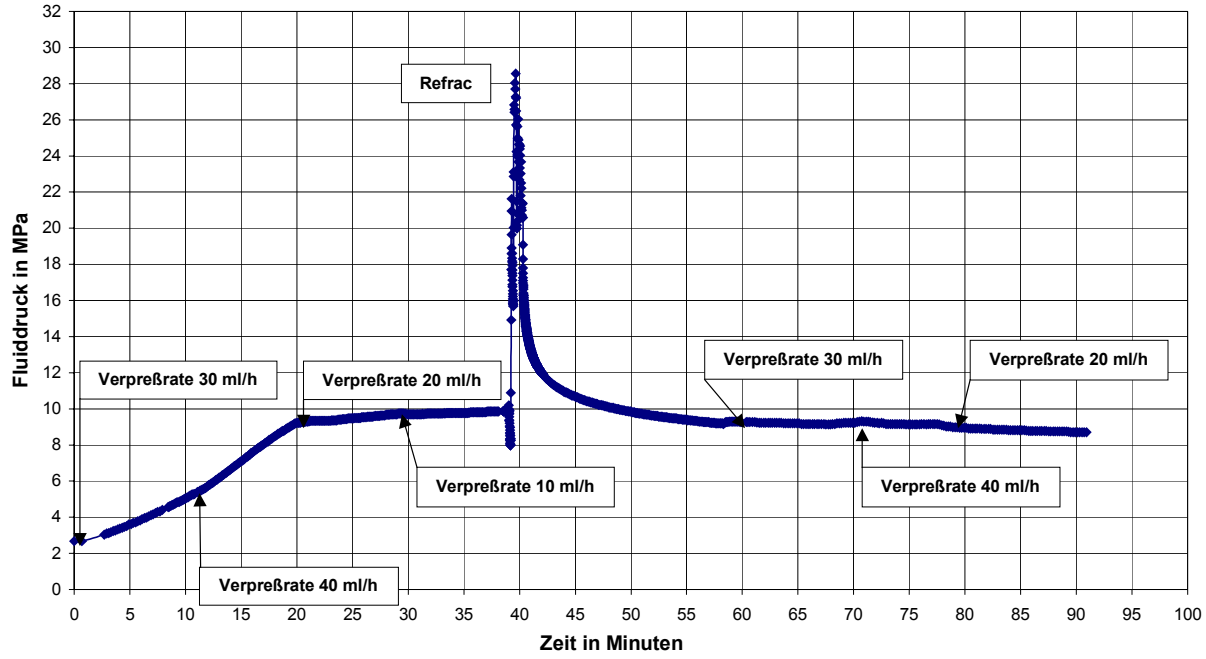

Abbildung 25 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 4,7 m, Datum 14.03.2002

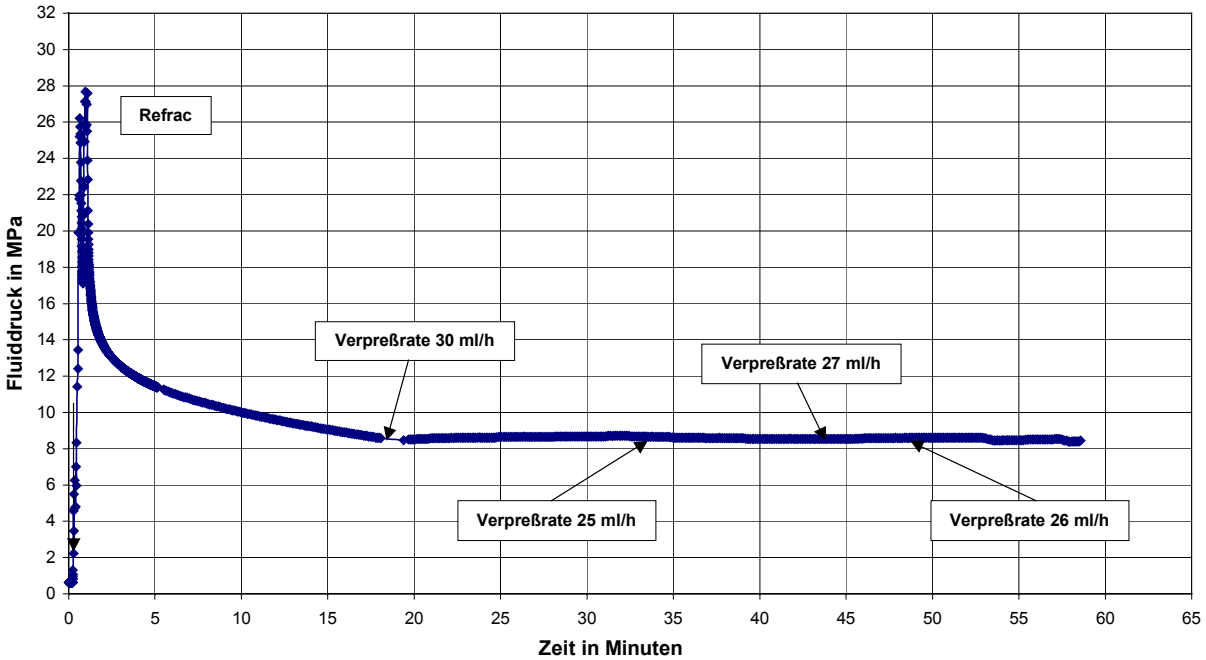

Abbildung 26 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 4,7 m, Datum 16.10.2002

Ein Jahr später führte am gleichen Messort im Bohrloch eine Rate von nur 10 ml/h noch zu einem kontinuierlichen Druckanstieg (Abbildung 25). 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 26 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 Riss zurückzuführen. Im Steinsalz umfasste der Permeationsbereich vermutlich 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 ist 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 28 bis 31 dargestellt ist. Einen Eindruck von der Ausbildung einer solchen Kluft gibt die Abbildung 27 aus der Bohrlochteufe 5,7 m mit einer gleichartigen Kluft.

Die Erstmessung fand im März 2001 statt, wobei vor dem Versuch kein Hydrofrac erzeugt werden konnte. Der Bohrlochabschnitt war von vornherein nicht völlig dicht und ohne aktive Verpressung war kein Dichtheitsnachweis erreichbar.

Abbildung 27 Geschlossene Anhydritkluft im Bohrloch F2

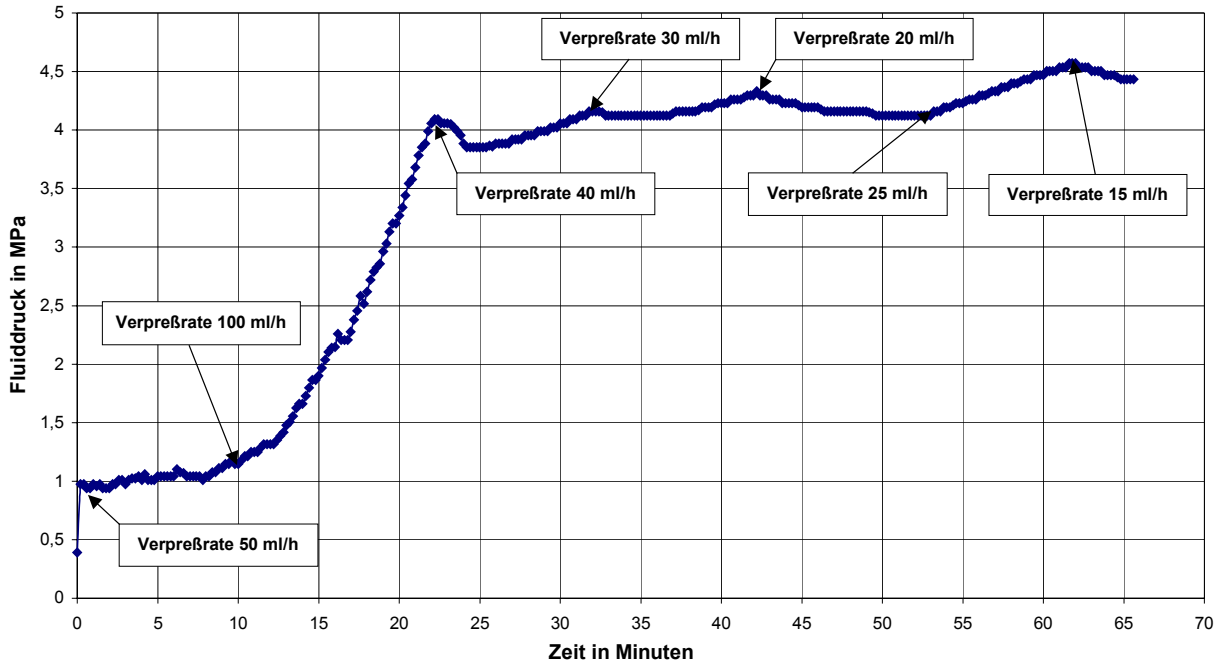

Abbildung 28 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 3,7 m, Datum 22.03.2001

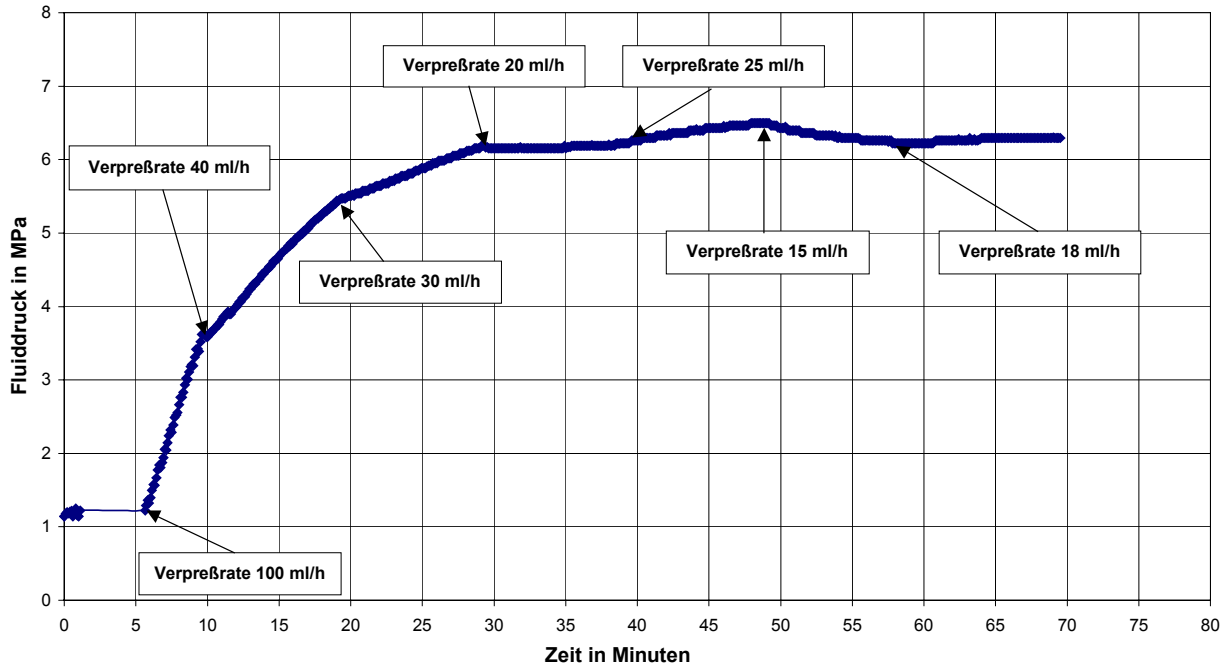

Abbildung 29 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 3,7 m, Datum 13.03.2002

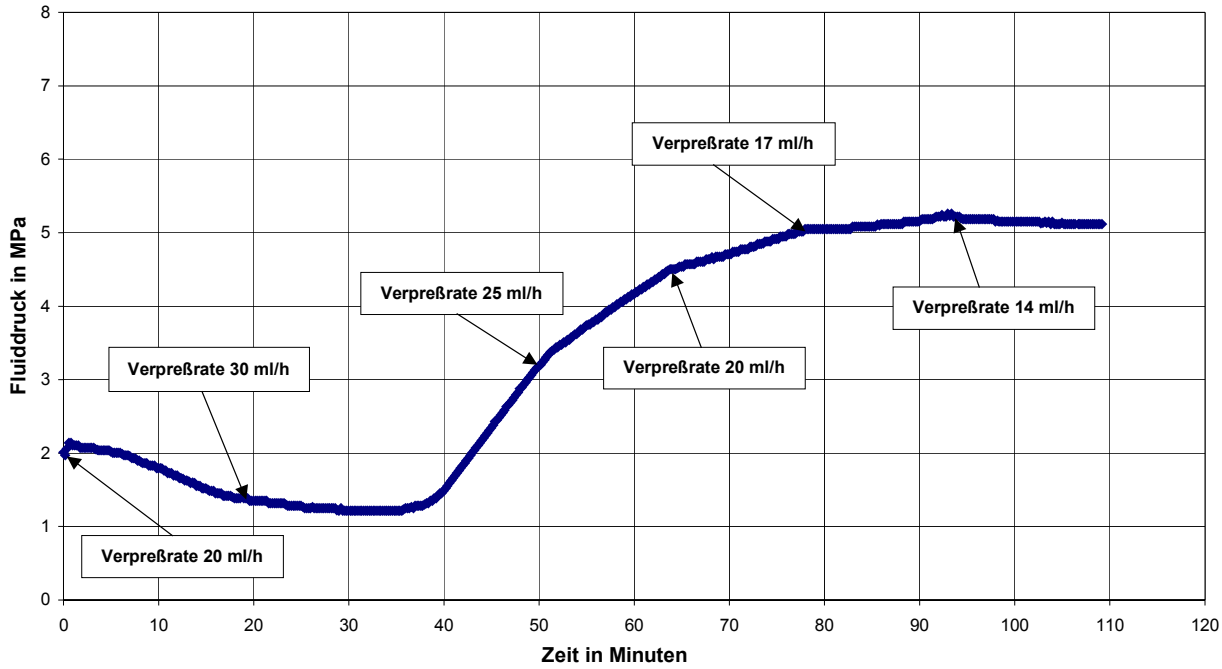

Abbildung 30 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 3,7 m, Datum 17.10.2002

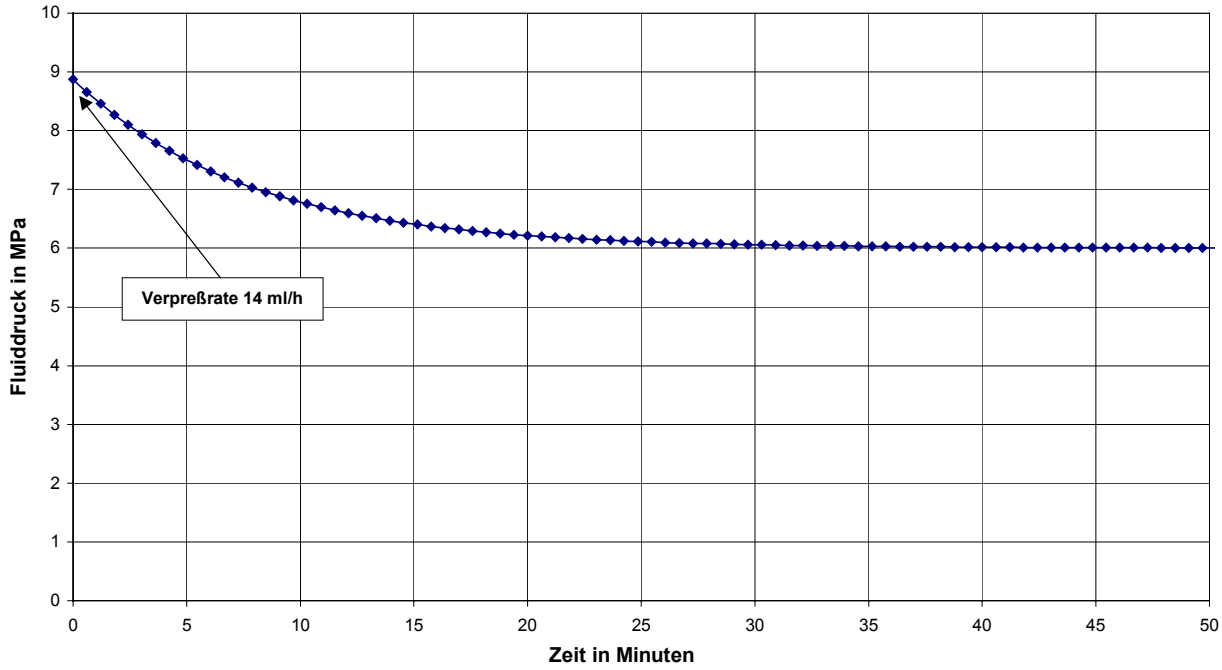

Abbildung 31 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 3,7 m, Datum 17.10.2002

Die Erstmessung im März 2001 in Abbildung 28 zeigt, dass 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 (Abbildung 29) 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 Abbaunäherung 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 30 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 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 31 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 Abbaunäherung 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.

Abbildung 32 Carnallitgefüllte 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 32 ist dort eine carnallitgefüllte Kluft aufgeschlossen.

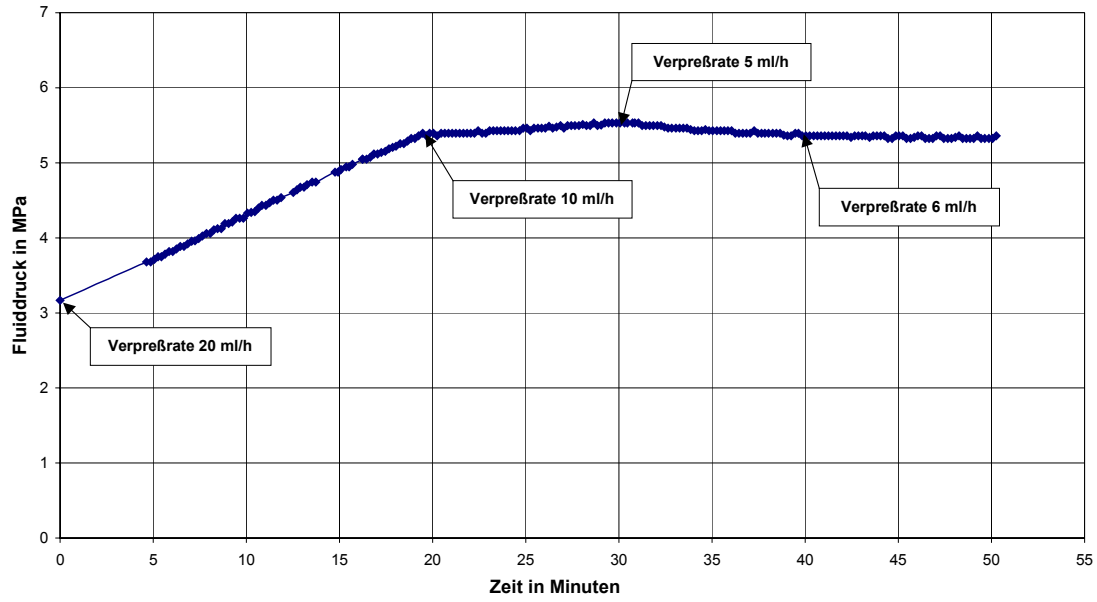

Abbildung 33 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 2,7 m, Datum 22.03.2001

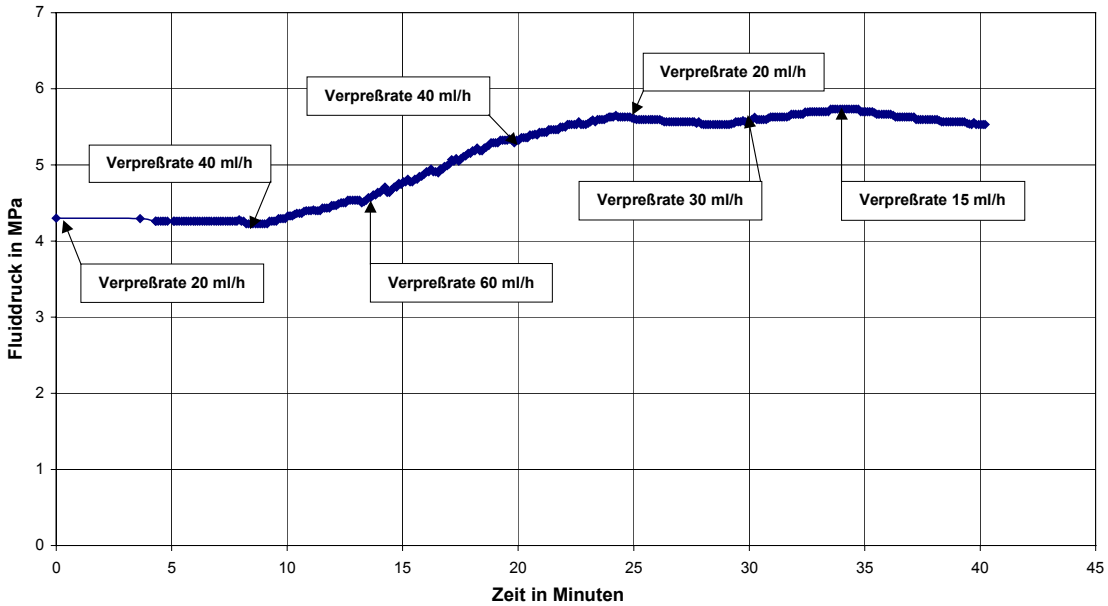

Abbildung 34 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 2,7 m, Datum 13.03.2002

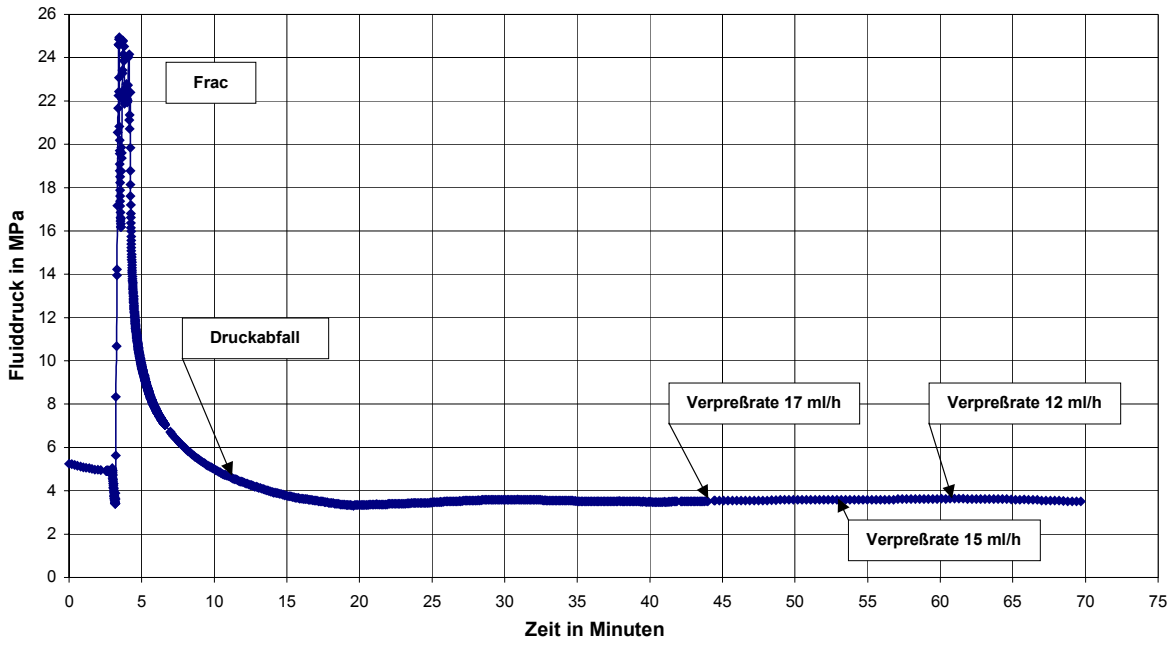

Abbildung 35 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 2,7 m, Datum 14.03.2002

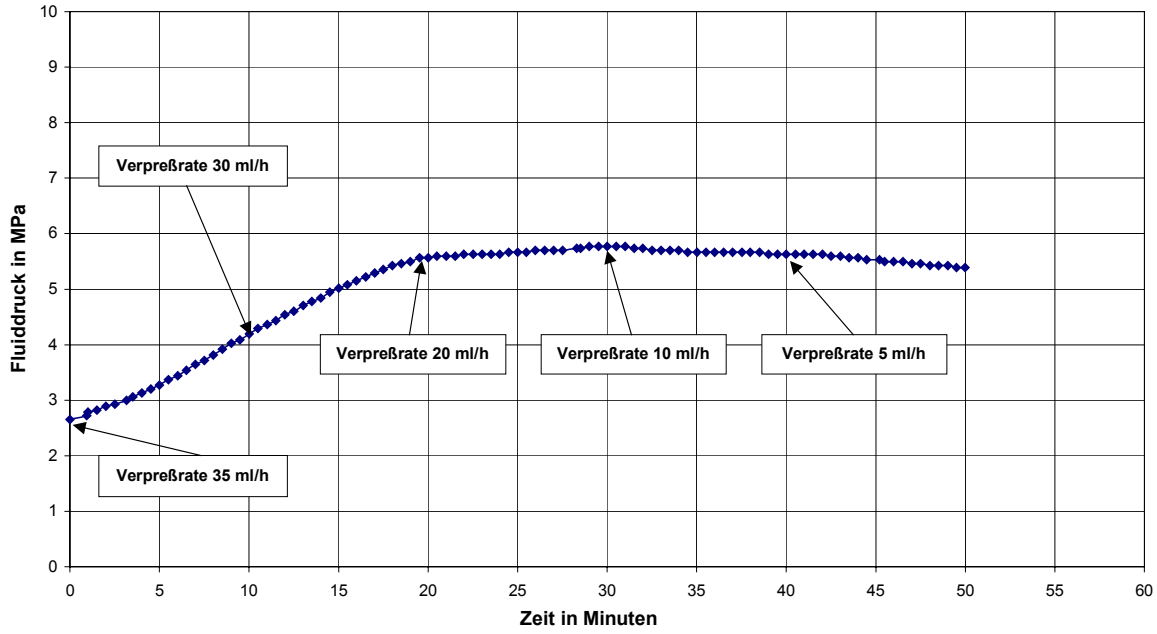

Abbildung 36 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 2,7 m, Datum 22.09.2003

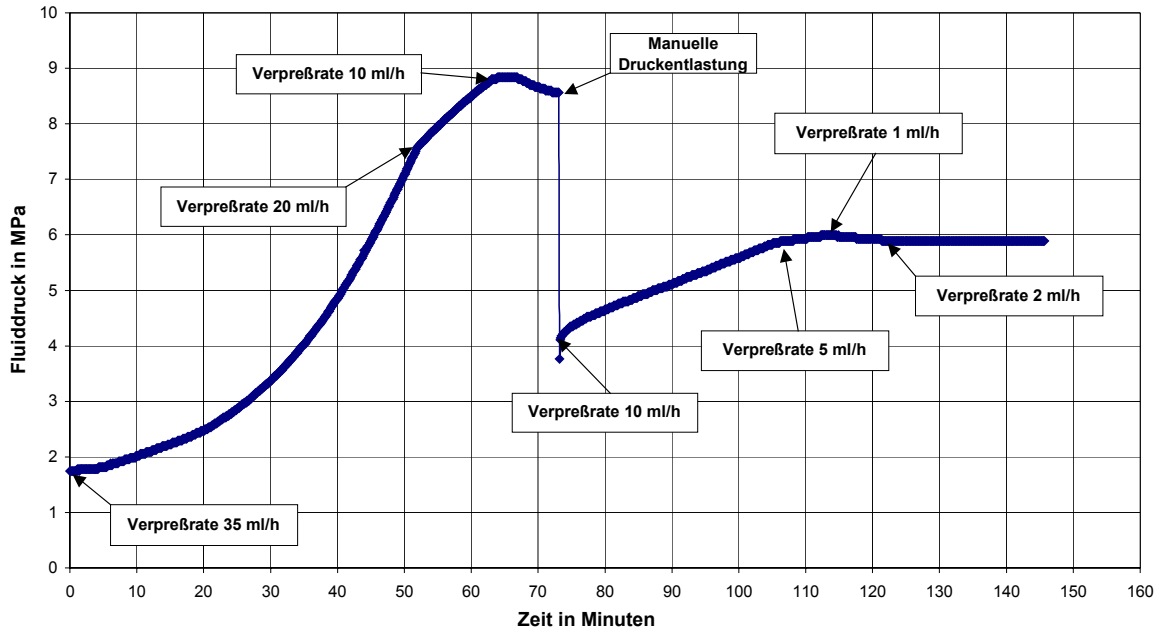

Abbildung 37 Spannungssondierung F2, Stoßteufe 2,7 m, Datum 23.09.2003

Die Erstmessung ist in Abbildung 33 und die Wiederholungsmessungen sind in den Abbildungen 34 bis 37 dargestellt.

Im März 2001 wurde mit einer vergleichsweise geringen Verpressrate von 6 ml/h ein Abströmwiderstand von 5,3 MPa ermittelt (Abbildung 33). Dieser Wert konnte ein Jahr später am 13.03.2002 mit 5,8 MPa bei einer Förderrate der Pumpe zwischen 20 ml/h und 30 ml/h nahezu bestätigt werden (Abbildung 34). Die zur Initiierung des gleichen Abströmwiderstandes wesentlich höhere Verpressrate wies auf eine Öffnung der carnallitgefüllten Kluft hin, was aber nicht gesichert war. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurde am folgenden Versuchstag (Abbildung 35) 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 36 wird ein Abströmwiderstand von 5,7 MPa von den Injektionsraten 10 und

20 ml/h eingegrenzt.

Abschließend wurde am 23.09.2003 noch einmal überprüft, ob in einem höheren Druckbereich nach einer längeren Verpressung auch ein anderes Wertepaar der Injektionsrate q zum Abströmwiderstand p gefunden werden kann. In Abbildung 37 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, Durchtrennungsgraden und Mineralfüllungen repräsentieren, aber nicht die senkrecht zur Kluft wirkende Normalspannung. Diese besitzt nur einen mittelbaren Einfluss auf die Kluftöffnungsweite, eine belastbar nachweisbare Änderung mit dem sich nähernden Gewinnungsbergbau konnte nicht gefunden werden.

Auf die Wertepaare der Injektionsrate q und dem Abströmwiderstand p zur Ermittlung hydraulischer Parameter unter stationären Bedingungen wird in den weiteren Ausführungen Bezug genommen.

6.3.2 Bestimmung der Spannungsrichtungen mittels SE-Ortung

6.3.2.1 Ablauf der Messungen und Festlegung der Messorte

Frühere Messungen im Anhydrit haben gezeigt, dass sich bei einem Hydrofrac die Flüssigkeit eher in den vorhandenen Klüften und Schwächezonen ausbreitet, als das eine Rissneubildung entsteht. Im Bereich der sekundären Spannungsfelder um die untertägigen Strecken und Abbaukammern ist im allgemeinen nicht davon auszugehen, dass die geogen angelegten natürlichen Klüfte nach dem sekundären Spannungsfeld der Hohlräume ausgerichtet sind. Dadurch ist die Richtung der minimalen Hauptspannung im Anhydrit unter Vorbehalt und eigentlich nur bei der Rissinitiierung im ungeklüfteten und homogenen Anhydrit zu bestimmen. Im Rahmen des Vorhabens BARIAN II wurde deshalb auf Wiederholungsmessungen im Verlauf des Abbaufortschritts verzichtet und nur eine Frac-Serie im Februar 2004 im geklüfteten Hauptanhydrit in der Bohrung F2-1 durchgeführt. Diese Bohrung wurde parallel zur Bohrung F2 gebohrt. Der Steinsalzabbau war zu diesem Zeitpunkt schon abgeschlossen. Die Lage der Bohrung ist in Abbildung 38 angegeben.

Weiterhin wurden im Dezember 2002 in der Bohrung F1 und im Dezember 2003 in der Bohrung F2-1 zwei Langzeitversuche in Bohrlochteufen von 3,9 m bzw. 9,0 über mehrere Tage durchgeführt. Die Bohrlochteufen sind in Abbildung 38 blau markiert. Das Ziel dieser Messungen bestand in der SE-Ortung bei niedrigen Injektionsraten bzw. in der „Shut-in-Phase“. Diese Aufgabenstellung war neuartig, da die bisher beim Hydrofrac generierten Schallemissionen an die hohen Injektionsraten der Risserzeugung und –ausbreitung gebunden waren. Im Rahmen der geplanten Permeabilitätsmessungen war es jedoch auch wesentlich, die bei niedrigen Injektionsraten auftretende Erstreckung und Vergrößerung der Permeationszone zu verfolgen. Zur Erhöhung der Ortungsausbeute wurde während der langsamen Verpressung in periodischen Abständen die Injektionsrate stoßartig erhöht.

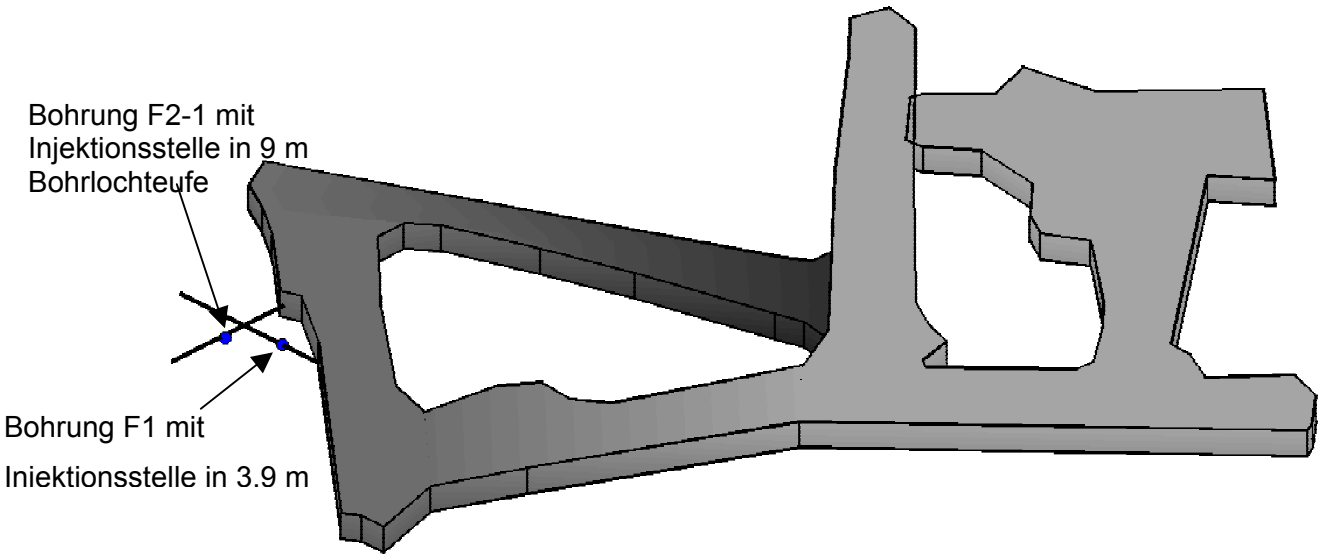

Abbildung 38 Messorte der SE-Messungen im Anhydrit

Auch hier war keine Zuordnung der Messungen zu den Abbauständen geplant. Entsprechend Abbildung 9 war im Dezember 2002 der Steinsalzabbau in der nächstgelegenen Strosse 2111 nahezu abgeschlossen.

In der Tabelle 3 sind Datum, Bohrlochteufe, Zahl der Ortungen und Injektionsmenge der SE-Messungen im Anhydrit aufgeführt. Aus Gründen der Zuordnung wurden auch die Versuchsparameter des Projektes BARIAN aufgenommen, die folgenden Auswertungen nehmen jedoch nur Bezug zu oben den genannten Messeinsätzen.

		Datum	Versuchs-bezeichnung	Teufe	Zahl der Ortungen	Flüssigkeitsmenge [ml] Frac	Refrac
Projekt BARIAN	1. Serie	**Frac-Versuche in Bohrung F1**					
		21. Feb. 2001	AnF1-4m-2.01	3,9 m	1433	100	400
		21. Feb. 2001	AnF1-6m-2.01	5,6 m	1205	200	200
		Frac-Versuche in Bohrung F2					
		21. Feb. 2001	AnF2-6m-2.01	6,1 m	2146	200	100
		22. Feb. 2001	AnF2-8m-2.01	8,0 m	858	200	200
		Frac-Versuche in Bohrung F3					
		22. Feb. 2001	AnF3-5m-2.01	5,0 m	224	200	200
		22. Feb. 2001	AnF3-8m-2.01	8,0 m	253	200	200
		22. Feb. 2001	AnF3-10m-2.01	10,0 m	172	200	200
Projekt BARIAN II	Langzeitversuche	**Langzeitversuch in Bohrung F1**					
		11. Dez. 2002	AnF1-4m-12.02	3,9 m	1374	1 bis 400 ml/h	
		Langzeitversuch in Bohrung F2-1					
		9. Dez. 2003	AnF2-1-9m-12.03	9,0 m	574	1 bis 100 ml/h	
	2. Serie	**Frac-Versuche in Bohrung F2-1**					
		20. Feb. 2004	AnF2-1-4m-2.04	4 m	324	100	100
		19. Feb. 2004	AnF2-1-7m-2.04	7,0 m	248	100	100
		19. Feb. 2004	AnF2-1-9m-2.04	9,0 m	98	100	-
		19. Feb. 2004	AnF2-1-11m-2.04	11,0 m	770	100	100

Tabelle 3 Datum, Bohrlochteufe, Zahl der Ortungen und Injektionsmenge der SE-Messungen im Anhydrit

6.3.2.2 Erfassung der Schallemissionen während der Langzeitversuche und Hydrofracs

Zur Erfassung der Schallemissionen bei annähernd konstanter und sehr niedriger Injektionsrate wurden zwei Langzeitversuche über mehrere Tage durchgeführt. Zur Erhöhung der Ortungsausbeute wurde in periodischen Abständen die Injektionsrate stoßartig erhöht. Das IfG setzte dazu eine Hochdrucklaborpumpe ein, mit der sehr geringe Injektionsraten von 0,1 bis 600 ml/h bei einem maximalen Druck bis 500 bar realisiert werden können. Die Pumpe kann auch im Programmiermodus betrieben werden, bei dem die Injektionsrate in Zeitfenstern frei programmierbar ist.

Die Injektionsstellen der Langzeitversuche im Anhydrit wurden so gewählt, dass im Injektionsintervall möglichst ein Riss oder eine geöffnete Kluft lagen. Der erste Langzeitversuch wurde im Bohrloch F1, welches vom Bohrlochmund aus gesehen in nordöstliche Richtung weist, in einer Teufe von 3,9 m durchgeführt. An dieser Stelle befindet sich ein Bereich im Anhydrit, an dem schon früher ein Frac-Versuch durchgeführt wurde. Der Versuch begann am 11. Dezember 2002 und wurde am 19. Dezember 2002 beendet.
Für den zweiten Langzeitversuch wurde eine neue etwa 20° ansteigende Injektionsbohrung F2-1 mit einer Länge von ca. 12 m erstellt. Der Ansatzpunkt lag in der Nähe der schon vorhandenen Bohrungen F1 bis F3 (siehe Abbildung 2). Vom Ansatz aus weist die neue Bohrung in nordwestliche Richtung. Das Injektionsintervall lag in einer Teufe von 9 m, in der sich entsprechend der Kernbemusterung eine Kluft befindet. Der Versuch wurde am 9. Dezember 2003 begonnen und dauerte etwa 10 Tage.
Die Lage der beiden Injektionsbohrungen (breite schwarze Linien) mit den Injektionsstellen (blaue Punkte) der Langzeitversuche und dem Verlauf der Strecken zur Auffahrt der Liegendkippstelle 9b ist in einer perspektivischen Darstellung mit Blick aus einer erhöhten Position nach Osten in Abbildung 38 dargestellt. Die tiefer gelegenen Strecken sind dunkler gezeichnet.

Im Anschluss an den Langzeitversuch in Bohrung F2-1 wurden am 19. und 20. Februar 2004 vier schnelle Frac-Versuche (Serie 2) in 4 m, 7 m, 9 m und 11 m Teufe durchgeführt.

Die folgenden Versuchsauswertungen beziehen sich zunächst auf die Langzeitversuche und danach auf die Frac-Serie 2.
Der erste Langzeitversuch wurde im Bohrloch F1 in 3,9 m Bohrlochteufe im schon gefracten Bereich durchgeführt. Der Versuch wurde am 11. Dezember 2002 um Uhr $9^{\underline{23}}$ begonnen und

acht Tage später am 19. Dezember 2002 beendet. Im Verlauf des Drucks sind während der ersten beiden Messtage (Abbildung 40) mehrere Druckspitzen zu erkennen, die durch eine starke Erhöhung der Injektionsrate von 1 ml/h auf 400 ml/h verursacht sind. Die hohe Förderrate wurde jeweils nur über 8 Minuten beibehalten. Nach zwei Messtagen trat an der Pumpe eine Verstopfung der Kugelventils ein, die keine weitere Verpressung mehr zuließ. Die weitere Fluidpermeation konnte mittels der Schallemissionen aber bis zum Versuchsende verfolgt werden.

Bei dem ersten Langzeitversuch konnten insgesamt 1.374 Ereignisse geortet werden. Abbildung 39 zeigt die Ortungen in den drei Projektionsebenen. Die Injektionsbohrung und die Aufnehmerkränze sind durch eine rote Linie bzw. blaue Punkte dargestellt. Es bildeten sich zwei Bereiche mit Ereignishäufungen aus: Im vorderen Bereich bis y = 4 m liegen die Ereignisse sehr gestreut. Diese Ereignisse sind auf ständige Mikrorissbildung in der Auflockerungszone der Zufahrtstrecke, die im Steinsalz liegt, zurückzuführen. Die Ereignisse aus dem hinteren Bereich ab y = 4 m, der im Anhydrit liegt, sind bei der Flüssigkeitsinjektion an den ersten beiden Tagen (9. und 10. Dezember 2002) registriert worden. Die Grenze zwischen Steinsalz und Anhydrit liegt in etwa 2 m Bohrlochteufe.

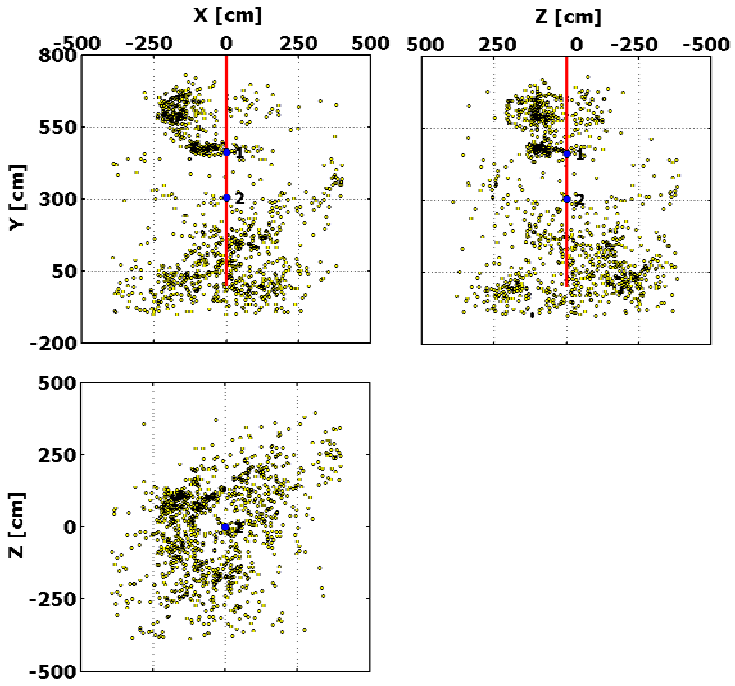

Abbildung 39 Projektion auf die drei Koordinatenebenen, Langzeitversuch AnF1-4m-12.02 in 3,9 m Bohrlochteufe, Injektionsbohrung F1 im Anhydrit

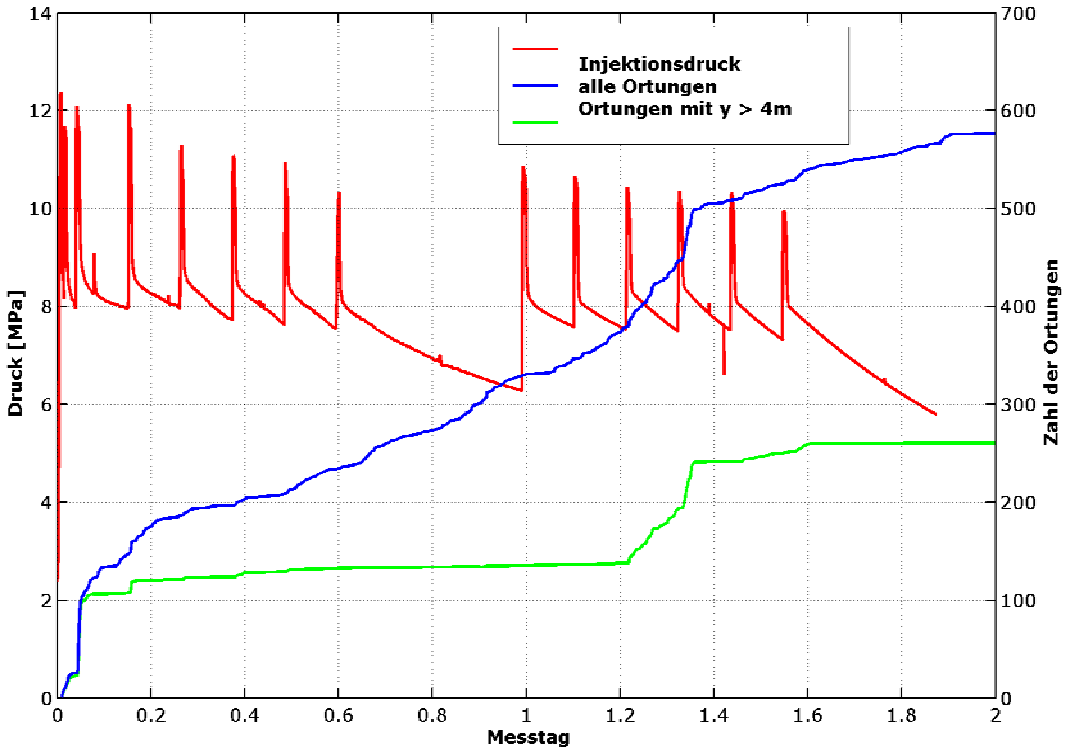

Abbildung 40 Verlauf der kumulierten Zahl der Ortungen und des Injektionsdruckes an den ersten beiden Messtagen des Langzeitversuchs AnF1-4m-12.02 in 3,9 m Teufe

Abbildung 40 stellt den zeitlichen Verlauf der kumulierten Zahl aller georteten Ereignisse (blau) und nur der Ereignisse, die im Anhydrit geortet wurden (grün), mit dem Injektionsdruck während der ersten beiden Tage des Versuchs dar. Wie oben schon erwähnt, entstehen die periodisch auftretenden Spitzen in der Druckkurve durch Erhöhung der Injektionsrate von 1 ml/h auf 400 ml/h. Im Anfangsbereich bei schneller Förderrate sind entsprechend der Schallemissionen viele Mikroschädigungen feststellbar, die wahrscheinlich beim weiteren Öffnen des Hydrofrac-Risses entstanden sind. Die Zahl der Ortungen steigt auf etwa 100 an. Anschließend konnten nur noch wenige Ereignisse bei der Druckerhöhung im Anhydrit geortet werden. Vielmehr stammen die folgenden Ereignisse bevorzugt aus der Auflockerungszone im Steinsalz. Nach der Rissöffnung breitet sich in den nachfolgenden Zyklen das Fluid ohne wesentliche Schallemission aus. Dafür spricht der rasche Druckabfall nach Ende der schnellen Injektionsrate. Bei genauerem Betrachten der grünen Kurve fällt auf, dass die SE-Aktivität teilweise während des Einpumpens leicht ansteigt, was zu einem treppenförmigen Verlauf führt. Der deutliche Anstieg der SE-Aktivität am zweiten Tag während des dritten und vierten Druckanstiegs kann durch spontanes Aufreißen von Materialbrücken im Riss entstanden sein. Auch während der längeren Zeit am Ende des

ersten Messtages ohne Erhöhung der Förderrate wurde Schallemission registriert, die aus der Auflockerungszone der Strecke herrührt.

Die Abbildungen 41 und 42 zeigen die Lage der georteten Ereignisse des ersten (Abbildung 41) und des zweiten Messtages (Abbildung 42) getrennt. Der Riss wurde am hinteren Aufnehmerkranz 1 eingeleitet und breitete sich quer zur Bohrlochachse in negative x-Richtung und nach oben (positive z-Richtung) um ca. 1,5 m aus. Abgesehen von einigen gestreuten Ereignissen, liegen nur wenige Ereignisse in der unmittelbaren Nähe der Injektionsstelle. In der Aufsicht auf den Bohrlochmund (Teilbild unten links in Abbildung 41) zeichnet sich eine kreisförmige Fläche mit einem Radius von ca. 1,2 m ab.

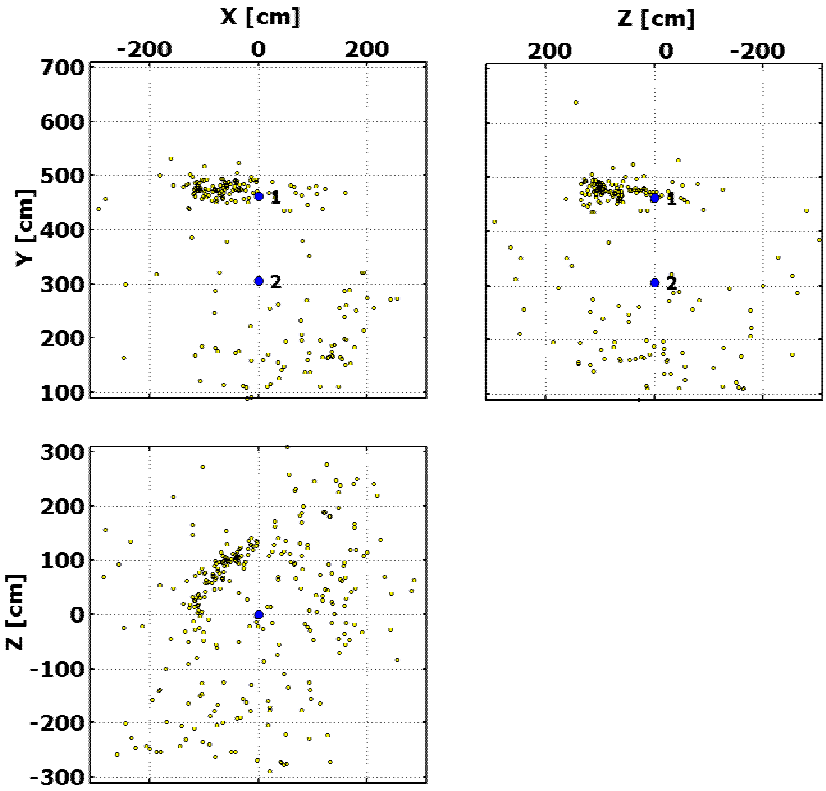

Abbildung 41 Projektion auf die drei Koordinatenebenen, erster Messtag des Langzeitversuchs im Anhydrit in 3,9 m Bohrlochteufe, Injektionsbohrung F1

Die Ereignisse des zweiten Messtages in Abbildung 42 liegen weit außerhalb des Injektionsintervalls, etwa 0,5 bis 2 m tiefer als der hintere Aufnehmerkranz. Sie schließen an die Ereignisse des ersten Messtages an. Entsprechend der Schallemissionen gelangte die Flüssigkeit zu dieser weit abgelegenen Stelle über einen Strömungsweg, der zu Beginn des

Versuchs am ersten Messtag entstanden ist (vgl. Abbildung 41).

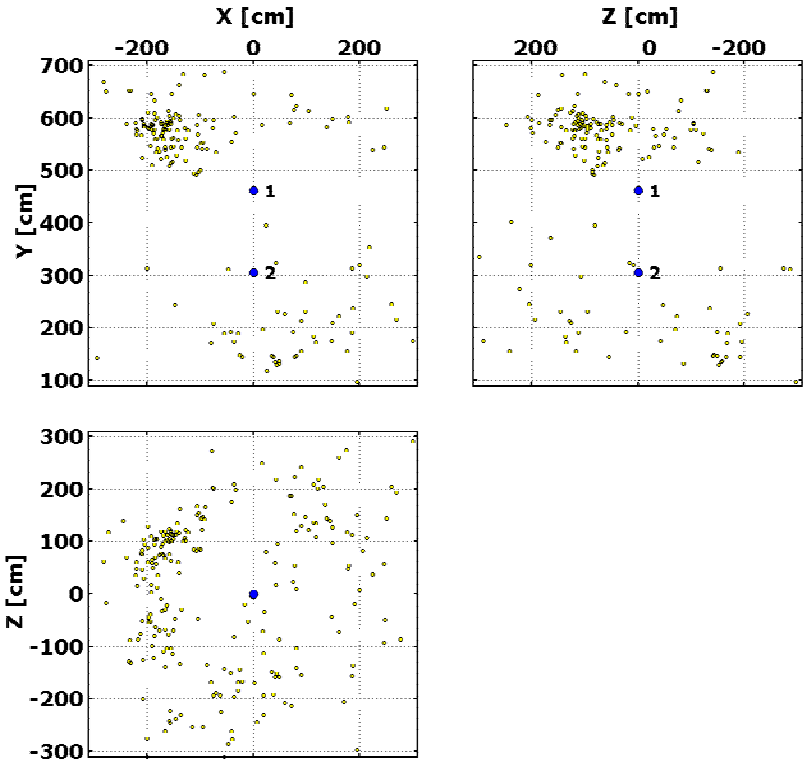

Abbildung 42 Projektion auf die drei Koordinatenebenen, zweiter Messtag des Langzeitversuchs im Anhydrit in 3,9 m Bohrlochteufe, Injektionsbohrung F1

Der zweite Langzeitversuch wurde am 9. Dezember 2003 um Uhr $10^{\underline{19}}$ begonnen und etwa 10 Tage später am 19. Dezember 2004 beendet. Am Anfang des Versuchs wurde bei einer sehr schneller Injektionsrate ein Kurzzeitversuch zur Rissinitiierung vorgenommen und dabei etwa 100 ml in das Injektionsintervall eingepumpt. Ab dem dritten Messtag wurde die Injektionsrate zwei Mal am Tag von 1 ml/h auf 100 ml/h erhöht und nach 30 Minuten wieder auf 1 ml/h zurückgesetzt. Die Zeit zwischen den beiden Injektionsintervallen betrug 5 Stunden.

Die insgesamt 574 Ortungen sind in Abbildung 43 dargestellt. Es ist eine deutliche, nahezu kugelförmige, Ereigniskonzentration im Injektionsbereich zu erkennen. Die gestreuten Ereignisse weit außerhalb der Injektionsstelle stammen, wie schon bei dem ersten Langzeitversuch festgestellt, aus dem Saumbereich der Strecke (siehe insbesondere x-y-Ebene links oben in Abbildung 43).

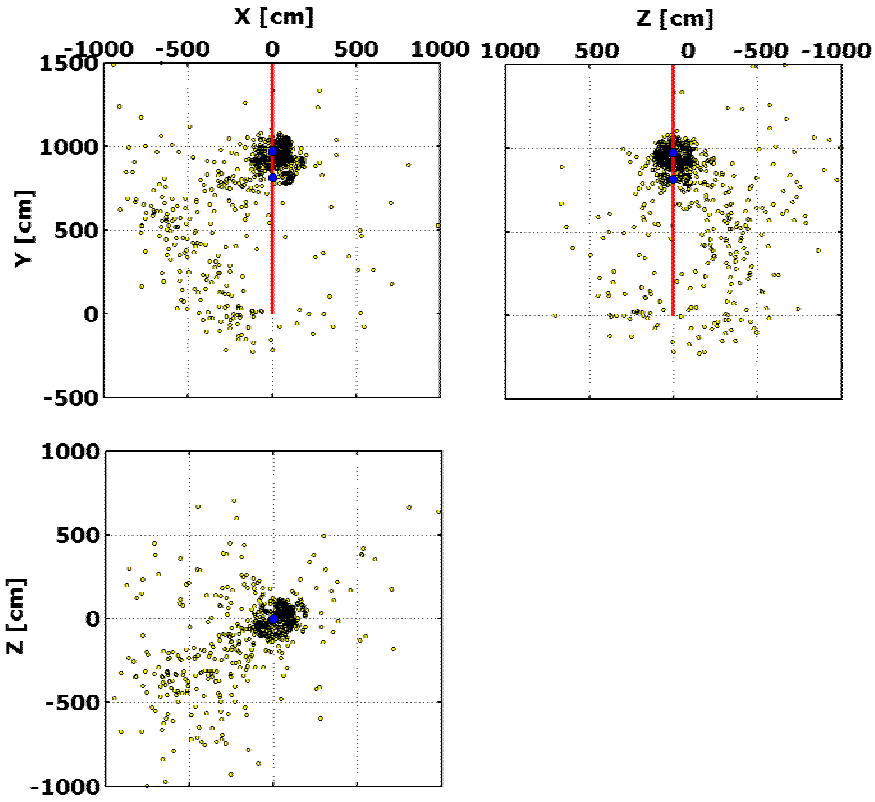

Abbildung 43 Projektion auf die drei Koordinatenebenen, zweiter Langzeitversuch im Anhydrit in 9,0 m Bohrlochteufe, Injektionsbohrung F2-1

Abbildung 44 stellt die zeitliche Entwicklung der kumulierten Anzahl georteter Ereignisse (blaue Linie) und des Injektionsdruckes (rote Linie) an den 10 Messtagen des zweiten Langzeitversuchs dar. Die periodisch auftretenden Spitzen in der Druckkurve sind wieder auf die Erhöhung der Injektionsrate von 1 ml/h auf 100 ml/h zurückzuführen. Das Bild zeigt, dass die meisten Ereignisse (etwa 370) während des schnellen Frac-Versuchs am Anfang der Messung geortet wurden. Bei langsamer Injektionsrate konnten keine Ereignisse registriert werden und die Schallemission setzt erst ein, wenn Flüssigkeit schnell eingepumpt wird.
Am 4. bis 7. Messtag konnten keine ortbaren SE-Ereignisse registriert werden, da sich durch eine kleine Leckage im Pneumatikschlauch die Aufnehmer von der Bohrlochwand abkoppelten.

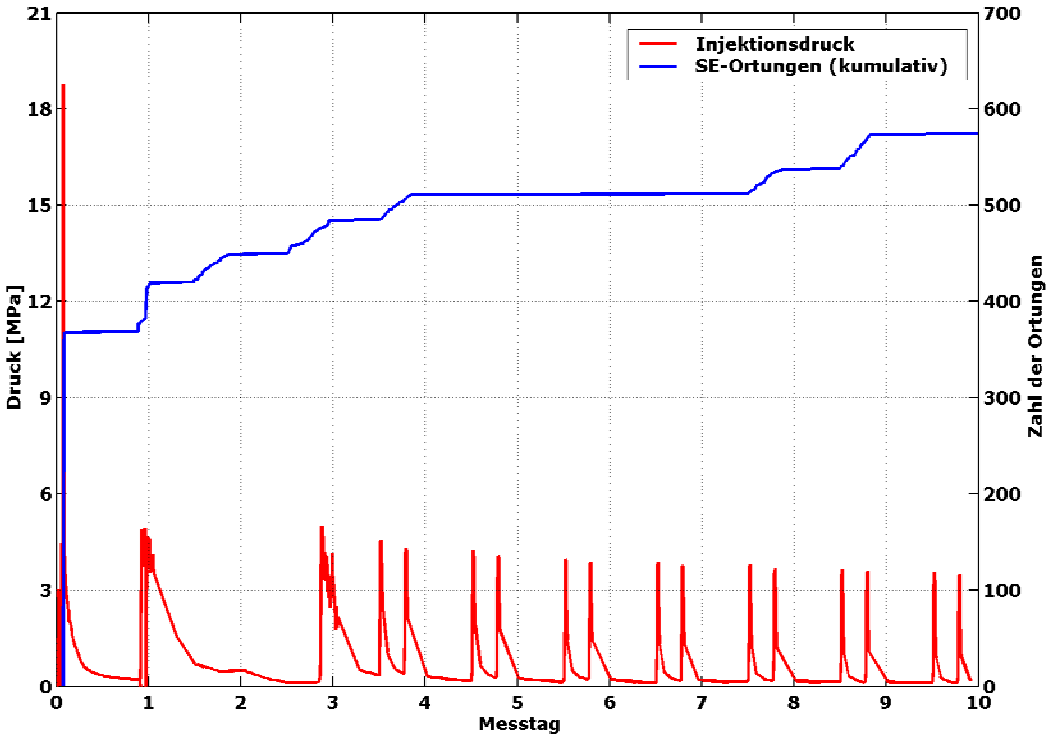

Abbildung 44 Verlauf der kumulierten Zahl der Ortungen und des Injektionsdruckes an den Messtagen des zweiten Langzeitversuchs AnF1-9m-12.03 in 9 m Teufe, F2-1

Abbildung 45 zeigt die Lage der georteten Ereignisse bei dem schnellen Frac-Versuch zu Beginn des Langzeitversuchs. Der Riss wird in der Mitte des Injektionsintervalls eingeleitet und breitet sich vorzugsweise in Richtung des hinteren Aufnehmerkranzes aus. Die Projektion auf den Bohrlochmund (x-z-Ebene, unteres Teilbild in Abbildung 45) besitzt einen maximalen Durchmesser von ca. 1,7 m. Eine ebene Rissfläche wird durch die Ereignisse jedoch nicht gebildet. Die Schallemissionen liegen vielmehr kugelförmig um die Injektionsstelle verteilt. Auch die Anwendung des Verfahrens zur Bestimmung der Richtung der minimalen Hauptspannung ergab keine Ausgleichsfläche.

Während der neun folgenden Injektionszyklen konnten nur 159 Ereignisse geortet werden. Sie sind in Abbildung 46 in einem größeren Ausschnitt als in Abbildung 45 dargestellt. Es fällt auf, das sehr wenige Ereignisse aus der Injektionsstelle herrühren. Abgesehen von den Ereignissen aus dem stoßnahen Bereich deuten einige Ortungen (markiert durch den Kreis in der in der x-y-Ebene) links der Injektionsbohrung an, das sich die Flüssigkeit entlang eines Ausbreitungsweges zum Stoß hin und um etwa 30° nach unten einfallend ausbreitet. Es

könnte sich hier um eine vertikal stehende Kluft handeln. Der starke Abfall des Injektionsdruckes bis auf wenige bar (siehe Abbildung 44, rote Kurve) weist auf abströmende Flüssigkeit entlang einer offenen Kluft hin.

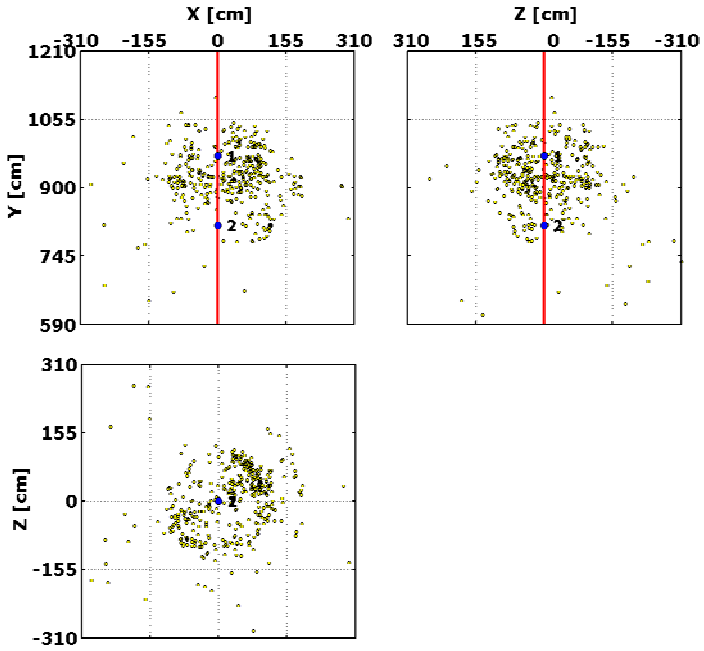

Abbildung 45 Ereignisse des schnellen Frac-Versuchs am Anfang des Langzeitversuchs in 9 m Teufe, F2-1, Projektion auf die drei Koordinatenebenen

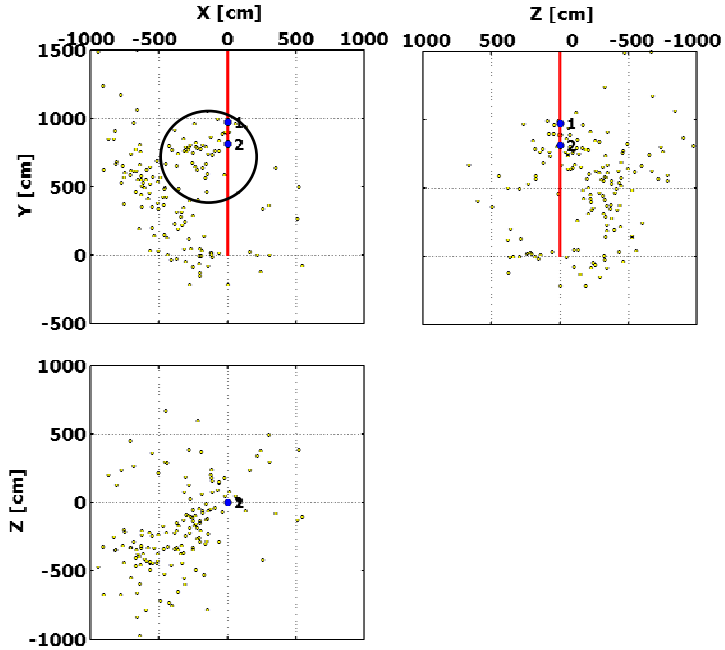

Abbildung 46 Langzeitversuch in 9 m Teufe, Injektionsbohrung F2-1, Projektion auf die drei Koordinatenebenen.

In Abbildung 47 ist der Abstand der Ereignisse (ohne die Ereignisse aus dem stoßnahen Bereich), gemessen von der Mitte des Injektionsintervalls aus, in der zeitlicher 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 um etwa 1 m und anschließend in einer Entfernung um 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.

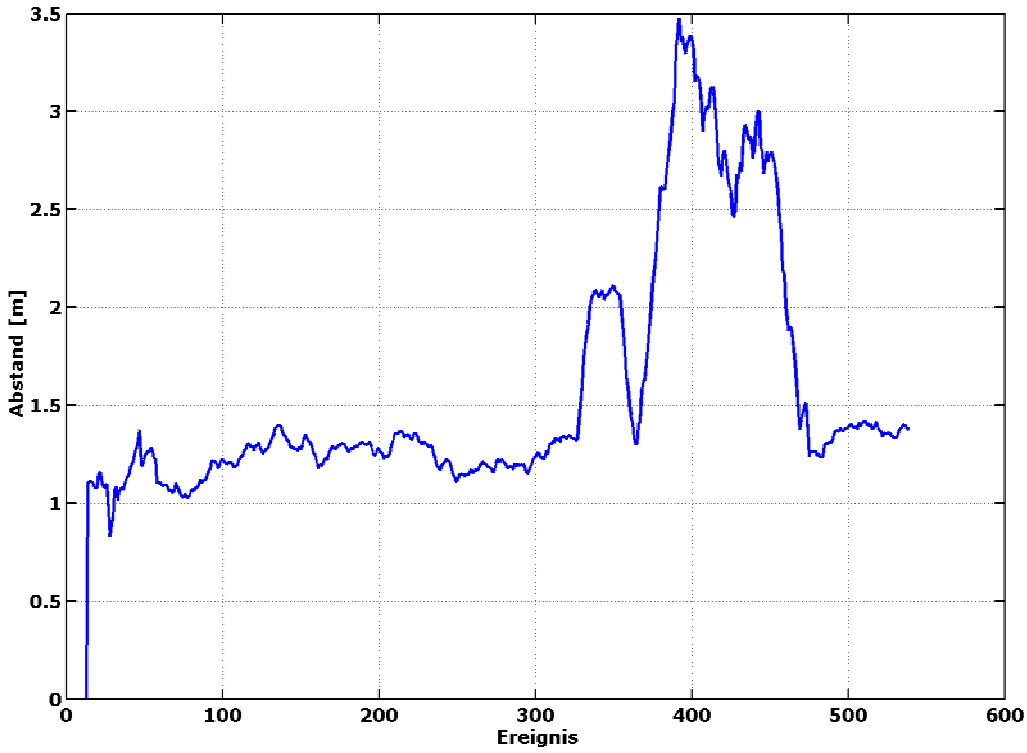

Abbildung 47 Abstand der Ereignisse von der Injektionsstelle des zweiten Langzeitversuch in 9 m Teufe, Injektionsbohrung F2-1

Im Anschluss an den Langzeitversuch wurde am 19. Februar 2004 ein weiterer schneller Frac-Versuch (ohne Refrac) an der gleichen Stelle im Bohrloch durchgeführt. Abbildung 48 zeigt wieder die Projektion auf die drei Koordinatenebenen. Die nur 98 georteten Ereignisse liegen in einer Teufe zwischen y = 9 m und y = 11 m. Die Flüssigkeit breitete sich *nicht*, wie am Ende des Langzeitversuchs festgestellt, in Richtung des Stoßes aus, sondern in entgegengesetzte Richtung, also vom Stoß weg. Durch das deutliche Überpumpen kann eine Kluft offensichtlich auch in eine völlig neue Richtung erweitert werden. Das Abströmen

in die vertikal stehende Kluft, wie oben beschrieben, ist vermutlich nur bei einer geringen Injektionsrate möglich. Bei einer hohen Rate ist die Durchlässigkeit des Abströmweges zu gering und es erfolgt eine Rissausbreitung in der Nähe der Injektionsstelle.

Die Ortungsergebnisse der anschließenden drei Kurzzeitversuche sind in den folgenden Abbildungen 49 bis 51 dargestellt. Die Analyse zur Bestimmung der Orientierung der Rissfläche ergab bei dem Versuch in 4 m Teufe eine erkennbare Rissfläche. Abbildung 49 zeigt die Ortungen des Frac-Versuchs in 4 m Bohrlochteufe im gedrehten Koordinatensystem. In diesen Projektionen kann die Rissausdehnung sowie die Lage der Ereignisse auf der Rissfläche bestimmt werden. Die 324 georteten Ereignisse streuen in einem 1 m breiten Streifen (x'-y'-Ebene und y'-z'-Ebene). Die x'-z'-Ebene zeigt eine Rissfläche mit fast kreisförmiger Form mit einem Durchmesser von 1,9 m.

Bei dem Frac-Versuch in 11 m Bohrlochteufe konnten die meisten der 770 Ereignisse geortet werden. In Abbildung 50 wird farblich unterschieden zwischen Ortungen während des Frac-Versuchs (rot) und während des Refrac-Versuchs (blau). Die Ortungen liegen in zwei Bereichen. Ausgehend von der Mitte des Injektionsintervalls breitet sich der Riss in x-Richtung nach beiden Seiten (x-y-Ebene in Abbildung 50) senkrecht zur Bohrlochachse aus und schwenkt anschließend in einem Abstand von ca. 0,8 m parallel zur Bohrlochachse um. Über diesen Ausbreitungsweg konnte die Flüssigkeit zum zweiten Ortungsbereich gelangen, der tiefer als Aufnehmerkranz 1 in einer Teufe (y-Koordinate) zwischen 12 m bis 13 m liegt. Die Ereignisse in diesem Bereich, der während des Refrac-Versuchs (blaue Punkte in Abbildung 50) deutlich aufgeweitet wurde, bilden ein relativ breiten, sichelförmigen Streifen.

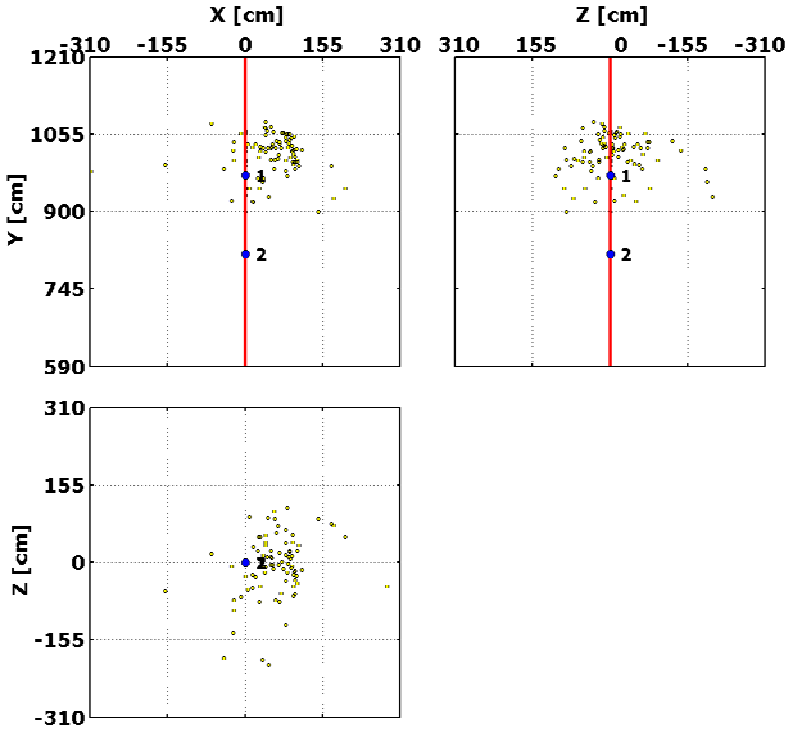

Abbildung 48 Ereignisse, die während des zweiten schnellen Frac-Versuchs in 9 m Teufe der Bohrung F2-1 geortet wurden, Projektion auf die drei Koordinatenebenen

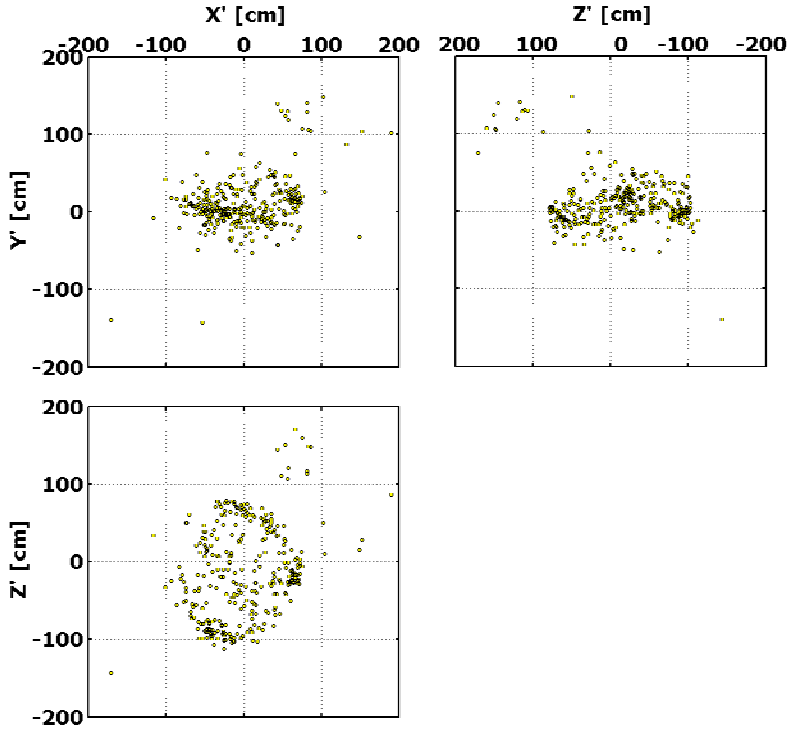

Abbildung 49 Ereignisse des Frac-Versuchs AnF2-1-4m-2.04 in 4 m Bohrlochteufe im gedrehten Koordinatensystem

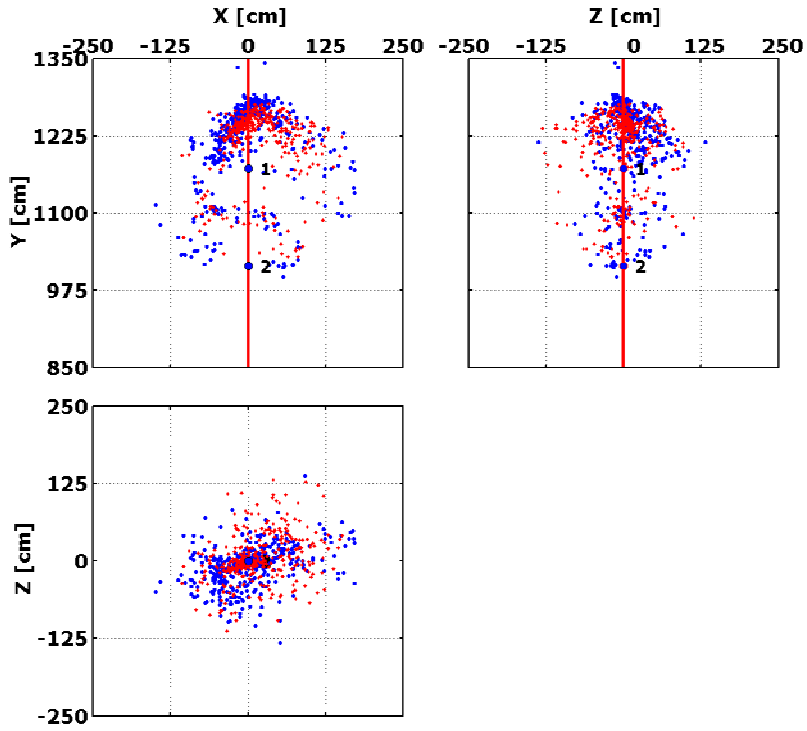

Abbildung 50 Ereignisse, die während des Frac-Versuchs in 11 m Teufe in Bohrung F2-1 geortet wurden, Projektion auf die drei Koordinatenebenen, Frac rot und Refrac blau

Bei dem Versuch in 7 m Bohrlochteufe konnten 248 Ereignisse (Frac- und Refrac-Versuch zusammen) geortet werden, die in Abbildung 51 in Projektion auf die drei Koordinatenebenen dargestellt sind. Ins Auge fällt sofort die in der x-y-Ebene und y-z-Ebene linienförmige Anordnung, die von der Injektionsstelle in etwa 7 m Teufe quer zur Bohrlochachse in negative x-und positive z-Richtung verläuft. Diese linienförmige Erscheinung ist eher auf ein Artefakt zurückzuführen. Artefakte können durch Einstreuungen elektrischer Art, die z.B. vom Einschalten von Elektromotoren und Leuchtstoffröhren oder ähnlichen Schaltvorgängen herrühren. Diese Störimpulse besitzen nach Filterung eine solche Form, dass außer den fast gleichzeitigen P-Einsätzen an allen Kanälen auch zufällig noch einige passende S-Einsätze angerissen werden. Dadurch liegen solche Ereignisse in axialer Richtung genau in der Mitte zwischen den beiden Aufnehmerkränzen. Die meisten anderen Ereignisse liegen eher wolkenartig verteilt in der Nähe von Aufnehmerkranz 1.

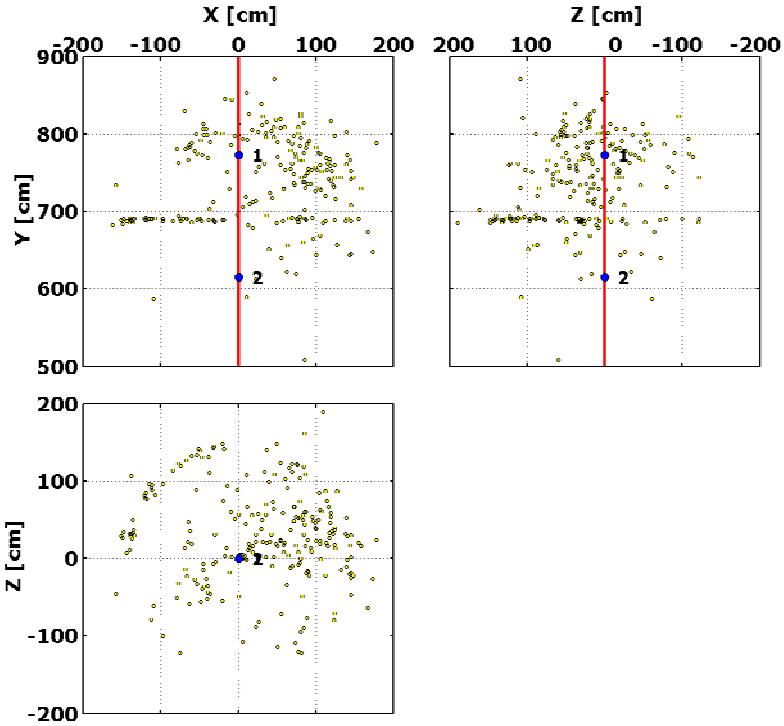

Abbildung 51 Ereignisse, die während des Frac-Versuchs in 7 m Teufe in Bohrung F2-1 geortet wurden, Projektion auf die drei Koordinatenebenen

7. Spannungssondierungen mit der Bohrlochschlitzmethode

7.1 Darstellung der Methode

Die Spannungssondierung mittels Bohrlochschlitzen wurde bereits im Vorläuferprojekt BARIAN eingesetzt und kam in BARIAN II wiederholt zur Anwendung. Die Methode ist in IfG (1995) methodisch ausführlich beschrieben. Die Messungen basieren auf einem Entlastungsverfahren ohne Überbohren und wurden von der Firma Q+S Consult durchgeführt.

Abbildung 52 Trennscheibe und Dehnungssensor als Detail der Bohrlochschlitzsonde

Mit einer druckluftbetriebenen Trennscheibe (Dicke ca. 1 mm) werden dabei in die Bohrlochkontur parallel zur Bohrlochachse Schlitze bis in eine Tiefe von etwa 20 mm gesägt. In Abbildung 52 sind die Trennscheibe und der Dehnungssensor zu erkennen. Der

Kontaktdehnungsgeber wird in einer Entfernung von etwa 6 mm neben dem Schlitz hydraulisch an die Bohrlochwand gepresst und während des Schlitzens kann somit die Entspannungsdeformation in tangentialer Richtung zur Kreiskontur gemessen werden. Durch den Schlitz wird die Tangentialspannung an der Bohrlochkontur vollständig aufgehoben und die sich einstellende Dehnung über den Sensor angezeigt. Die vollständige Entspannung der Bohrlochkontur im Bereich des Messsensors ab einer Schlitztiefe von 12 mm ist von der Herstellerfirma der Schlitzsonde INTERFELS nachgewiesen worden.
Die notwendigen Bohrlöcher besitzen Durchmesser zwischen 96 mm und 103 mm. Das bedeutet, für die Messung mussten keine neuen Bohrlöcher gestoßen und es konnte auf die schon vorhandenen und im Projekt BARIAN sondierten Hydrofrac-Bohrungen F1, F2 und F3 zurückgegriffen werden. Für die neuen Untersuchungen wurden in den Bohrlöchern benachbarte Bohrlochabschnitte zu den schon geschlitzten Bereichen ausgewählt.

Mit mehreren Wiederholungsschnitten entlang des Bohrlochumfanges in gleicher Bohrlochteufe, es sind mindestens drei Messwerte notwendig, und unter Voraussetzung elastischen Materialverhaltens sowie Homogenität und Isotropie ist es möglich, mittels einer Ausgleichsrechnung den ebenen Spannungstensor σ_x , σ_y und τ_{xy} bzw. σ_1 , σ_2 und die Hauptspannungsrichtungen in der Ebene quer zum Bohrloch in der entsprechenden Teufe zu berechnen. Bei drei senkrecht aufeinander stehenden Bohrungen lassen sich die ebenen Spannungstensoren zum räumlichen Spannungstensor zusammensetzen. Von dieser Möglichkeit wurde im vorliegenden Fall Gebrauch gemacht.

Der Vorteil des Messverfahrens besteht darin, dass in kurzer Zeit mehrere Schlitze gesägt werden können (ein Schlitz dauert etwa 1 Minute) und durch die nachfolgende Bewertung der Dehnungssignale unmittelbar vor Ort lassen sich Messfehler, z.B. infolge angeschnittener Inhomogenitäten, sofort erkennen und die Messung kann wiederholt werden.

Das ursprünglich zur Verfügung stehende elastische Stoffgesetz zur Berechnung der Spannungskomponenten aus den gemessenen Tangentialdeformationen konnte in vorwiegend elastisch reagierenden Gesteinen wie dem Hauptanhydrit sowie den anhydritischen und karbonatischen Zonen des Grauen Salztones verwendet werden und soll auch im vorliegenden Projekt zum Einsatz kommen. Eine Anwendung der Methode war im Vorhaben BARITON jedoch auch im Steinsalz unter Berücksichtigung einer zeitabhängigen Spannungsrelaxation an der Bohrlochkontur möglich (siehe IfG (1999)).

7.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Orientierung der 3 Anhydritbohrungen lässt sich angeben mit:

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

Die Bohrungen stehen nahezu senkrecht aufeinander und spannen ein rechtwinkliges Koordinatensystem auf. Die Messorte für die Schlitzversuche wurden im Ergebnis der Begutachtung der Bohrkerne sowie der Inspektion mit der Bohrlochkamera festgelegt. Als Auswahlkriterium kamen eine geringe Klüftigkeit bzw. ein hoher RQD-Index zur Anwendung.

Insgesamt wurden im Dezember 2002 67 Schlitzversuche (im Januar 2001 73 Versuche) durchgeführt, von denen 60 Tests (im Januar 2001 68 Tests) ausgewertet werden konnten. Für die Berechnung der Spannungen aus den Deformationen kamen auf Basis der gesteinsmechanischen Versuche in IfG (1995) ein Elastizitätsmodul von E = 50 GPa und eine Poissonzahl von ν = 0,26 zur Anwendung.
Die Beträge und Richtungen der in den Bohrungen außerhalb des Streckeneinflusses bestimmten Hauptspannungen sind für beide Messkampagnen in den Tabellen 4 und 5 bzw. in Abbildung 53 angegeben. Die Richtung der Spannungen wird analog zu den mit der Schallemissionsanalyse verwendeten Winkeln mit dem Azimutwinkel φ (in der Horizontalebene gemessen von Norden aus im Uhrzeigersinn) sowie mit dem Neigungswinkel ϑ (gemessen von der Horizontalebene nach unten) charakterisiert.

Teufe (m)	σ_1			σ_2			σ_3		
	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)
6,0	21,8	27	11	16,3	119	11	9,9	256	75
10,0	19,6	35	8	11,9	302	20	5,1	145	68
13,6	18,7	31	14	14,6	297	16	5,7	162	69

Tabelle 4 Beträge und Richtungen der in den Bohrungen F1, F2 und F3 mittels Bohrlochschlitzen im Januar 2001 ermittelten Hauptspannungen

Teufe (m)	σ_1			σ_2			σ_3		
	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)	Betrag (MPa)	φ (Grad)	ϑ (Grad)
8,0	24,8	33	10	17,2	301	10	9,8	168	75

Tabelle 5 Beträge und Richtungen der in den Bohrungen F1, F2 und F3 mittels Bohrlochschlitzen im Dezember 2002 ermittelten Hauptspannungen

Der Vergleich der ermittelten Hauptspannungen zeigt hinsichtlich der Beträge und Richtungen nur geringe Unterschiede. Lediglich im Bohrloch F3 wurden gegenüber Januar 2001 erhöhte Gebirgsspannungen registriert. Bezogen auf den dreidimensionalen Gebirgsspannungstensor ergibt sich daraus eine erhöhte Spannungsanisotropie, bedingt durch ein erhöhtes σ_1 bei praktisch gleichbleibendem σ_3. Die Orientierung der Hauptnormalspannungen blieb nahezu unverändert.

Versuchstechnisch bemerkenswert in der Bohrung F3 im Zusammenhang mit den erhöhten Spannungen waren ruckartige Änderungen des Dehnungssignals während des Schlitzsägens. Derartige Änderungen sind typisch für das Unterschneiden kleiner spannungsinduzierter Mikrorisse an der Bohrlochkontur. Die ruckartigen Änderungen wurden ausschließlich in den Quadranten der Bohrlochwandung registriert, in denen auf Grund des Gebirgsspannungszustandes hohe sekundäre Tangentialspannungen wirkten. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich die sekundären Spannungen an der Bohrlochwandung nahe an der Bruchfestigkeit des Anhydrits befanden oder diese sogar lokal überschritten haben („spalling“). Entsprechende Beobachtungen wurden vom Verfasser des Messberichtes Q+S Consult (2003) bei Schlitzsondenmessungen im URL Pinawa (Kanada) und im tiefliegenden Erzbergbau Australiens und Kanadas gemacht.

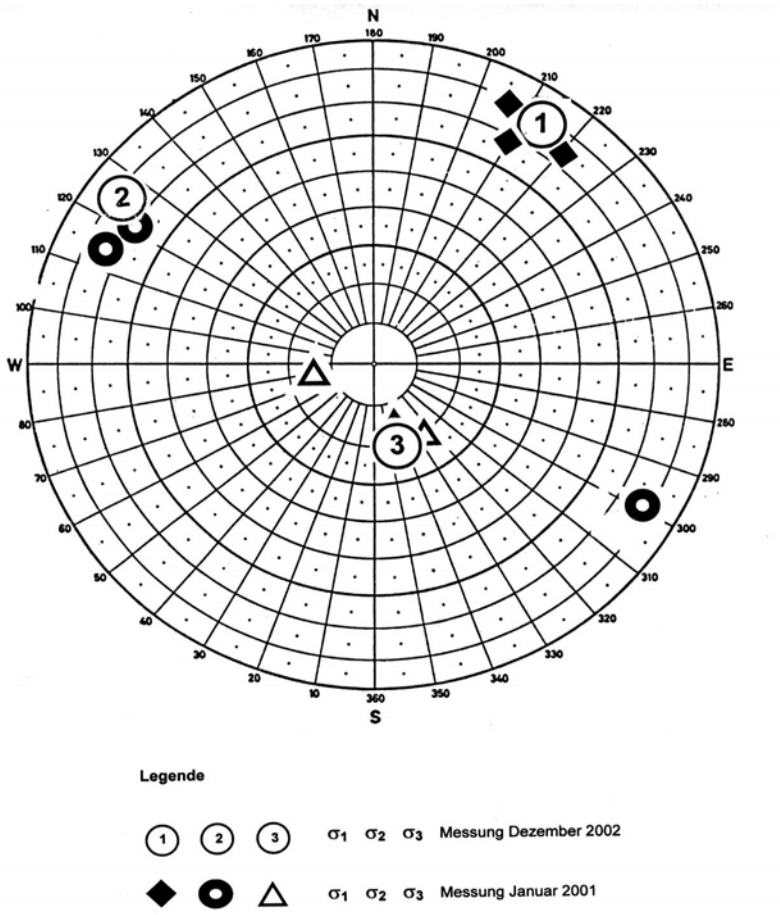

Abbildung 53 Richtung der in F1, F2 und F3 in beiden Kampagnen gemessenen Hauptspannungen

Das Verhältnis der Minimal- zur Maximalspannung weist grundsätzlich eine für Salinargesteine relativ deutliche Spannungsanisotropie aus. Im vergleichsweise zum Steinsalz festen und steifen Hauptanhydrit war dieser Spannungszustand jedoch zu erwarten und wird im vorliegenden Bericht auch noch mit gebirgsmechanischen Modellrechnungen zu belegen sein.

8. Begleitende Permeabilitätsmessungen im Steinsalz

8.1 Messmethode und Auswertebeziehung

Die Permeabilitätsuntersuchungen im Steinsalz wurden ergänzend zu den Spannungsmessungen in der Auffahrt zum Anhydritmessort mit dem Ziel durchgeführt, eventuelle Änderungen in der hydraulischen Dichtheit bei der Abbauannäherung zur Absicherung der Aussagen auch in diesem zum Anhydrit unmittelbar benachbarten Bereich nachzuweisen. Für die Messungen im Bohrloch F7 (siehe Abbildung 2) kam die neu entwickelte Hydrofrac-Sonde 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 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.

Zur Auswertung erfolgte eine Kurvenanpassung $p_{fit} = f(t)$ an die gemessene Druckabfallkurve und danach die Ableitung $\dot{p}_{fit}(t)$ dieser Funktion. Im abgeschlossenen Druckintervall kann es unter der Voraussetzung der technischen Dichtheit der Anlage bei gegebener Packerfunktion nur zu einem Druckabfall kommen, wenn sich das Fluid in den Poren des druckbeaufschlagten Untersuchungsbereiches ausbreitet, also eine Permeation stattfindet.
Die gesuchte Permeabilität K und Porosität ϕ lassen sich mit einem möglichst guten erneuten Fit (hohes Bestimmtheitsmaß) einer Funktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ an die Funktion $\dot{p}_{fit}(t)$ finden. Die Aufstellung von $\dot{p}_{Darcy}(t)$ basiert auf der Beziehung nach Darcy

$$\dot{V} = \frac{K}{\mu} \cdot A \cdot \frac{dp}{dl} \qquad (1)$$

K = Permeabilität

μ = dynamische Viskosität

A = durchströmte Fläche

dp/dl = Druckgradient über der Länge dl

Für den Versuch sollen folgende Voraussetzungen gelten:

- Konstante Permeabilität K und Porosität ϕ während der Messung.
- Die Kompressibilität des druckbeaufschlagten Systems K_S (Fluid, penetrierter Konturbereich und Equipment einschließlich aller Leitungen und der Packer) kann mittels $\Delta p/\Delta V$-Schleifen im Druckbereich der Permeabilitätsmessung ermittelt werden.
- Das Drucksystem ist nach außen geschlossen.

Die durchströmte Fläche entspricht an der Kontur r = R der Mantelfläche des abgepackerten Druckbereiches und vergrößert sich mit zunehmender Konturteufe l. Die Permeation reicht von r = R bis r = R + l.

Die nach (1) durchströmte Fläche ist

$$A = 2\pi \cdot r \cdot H$$
$$r = \text{Radius} \qquad (2)$$
$$H = \text{Höhe des Druckintervalls}$$

Mit (2) lässt sich Gleichung (1) umstellen in

$$dp = \frac{\dot{V}}{2\pi H} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \frac{dr}{r} \qquad (3)$$

(dl kann durch dr ersetzt werden) und durch Integration in den Grenzen R bis R+l folgt

$$p = \frac{\dot{V}}{2\pi H} \cdot \frac{\mu}{K} \cdot \ln\left(\frac{R+l}{R}\right) \qquad (4)$$

Das ist die nach p umgestellte Beziehung für den stationären Fluss um ein

druckbeaufschlagtes Bohrloch, die im folgenden sinngemäß für den instationären Fluss mit p(t) und $\dot{V}(t)$ verwendet wird.

Die beim Druckabfall Δp in den für das Fluid zugänglichen und zusammenhängenden Porenraum (ein Abströmen über die Packer wird nicht betrachtet) abströmende Fluidmenge ΔV füllt das Volumen

$$V = \pi\left[(R+l)^2 - R^2\right]\cdot H\cdot\phi \qquad (5)$$

Die Umstellung von (5) nach (R+l)/R und Einsetzen in (4) mit den Bedingungen

$$\dot{V}(t) = \dot{p}(t)\frac{V_0}{K_S} \text{ und} \qquad (6)$$

$$V(t) = (p_0 - p(t))\frac{V_0}{K_S} \qquad (7)$$

liefert eine Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ für den instationären Fluss in den zusammenhängenden Porenraum um ein Bohrloch, die in einem numerischen Suchverfahren an die Funktion $\dot{p}_{fit}(t)$ angenähert wird. Als freie Parameter werden dabei der Anfangsdruck p_0 der Druckabfallkurve, die Permeabilität K und die Porosität ϕ bestimmt. Das Bestimmtheitsmaß muss höher als 90 % liegen.

Die Porenraumfüllung erfolgt durch die Abströmung des Testfluids. Im Zuge der Wiederholungsmessungen werden Porenräume und Fissuren, aus denen seit der letzten Messung das Öl teilweise ausgepresst wurde, wieder bis zur Sättigung gefüllt und die Penetration in die bis dahin unbeeinflusste Gesteinsmatrix weitergeführt. Die berechneten Permeabilitäten sind deshalb untereinander vergleichbar.

Es ist generell anzumerken, dass im vorliegenden Projekt keine Grundsatzuntersuchungen zur Ermittlung der Gesteinspermeabilität, sondern Vergleichsmessungen in Abhängigkeit von einem sich ändernden Spannungszustand durchgeführt werden sollten. Der Begriff der Permeabilität ist deshalb streng genommen als spezieller standort- und verfahrensbezogener Strömungskennwert aufzufassen. Ein Vergleich mit anderen Literaturangaben sollte nur

unter Berücksichtigung der zugrundeliegenden Modellvorstellungen (räumliche oder ebene axialsymmetrische Fluidausbreitung) sowie der wesentlichen Parameter wie effektive Porosität, dynamische Viskosität des Fluids und Kompressibilität des Drucksystems erfolgen.

8.2 Darstellung der Ergebnisse

In Abbildung 54 ist zunächst die Übereinstimmung der Modellfunktion p_{Darcy} (t) mit der gemessenen Druckabfallkurve p (t) dargestellt. Der Versuch wurde im März 2000 im Bohrloch F7 in einer Stoßteufe von 8 m durchgeführt. Der Kurvenfit mit den Parametern

$K = 2 \cdot 10^{-23}\ m^2$

$\phi = 5$ ‰

$p_0 = 30$ bar

lieferte ein Bestimmtheitsmaß von 1,0. Als Systemkompressibilität konnte mittels $\Delta p/\Delta V$-Schleifen im Druckbereich der Permeabilitätsmessung ein Betrag K_S = 1,7 GPa ermittelt werden.

Die Auswertungen der Druckabfallkurven im März 2000, März 2001 und September 2003 in Abbildung 55 zeigen Erhöhungen in der Permeabilität von $2 \cdot 10^{-23}\ m^2$ bis auf $1 \cdot 10^{-20}\ m^2$. Die Porositäten lagen zwischen 1 und 5 ‰. Aus Vergleichsgründen wurden die Druckabfallkurven auf den Startwert normiert.
Eine Größenordnung der Permeabilität im Steinsalz mit ≤ 10^{-20} m² wird in der Literatur üblicherweise als „dicht“ bezeichnet und höhere Werte deuten eine beginnende Schädigung des Gefüges an. Der diesbezügliche Grenzwert von $1 \cdot 10^{-20}\ m^2$ im September 2003 sollte jedoch diesbezüglich unter Vorbehalt interpretiert werden. Die erhöhte Durchlässigkeit könnte auch auf die deutlich geringere Konturteufe gegenüber den anderen Messungen zurückzuführen sein. Eine systematische Erhöhung der Permeabilität mit dem Abbaufortschritt ist demzufolge nicht abzuleiten.

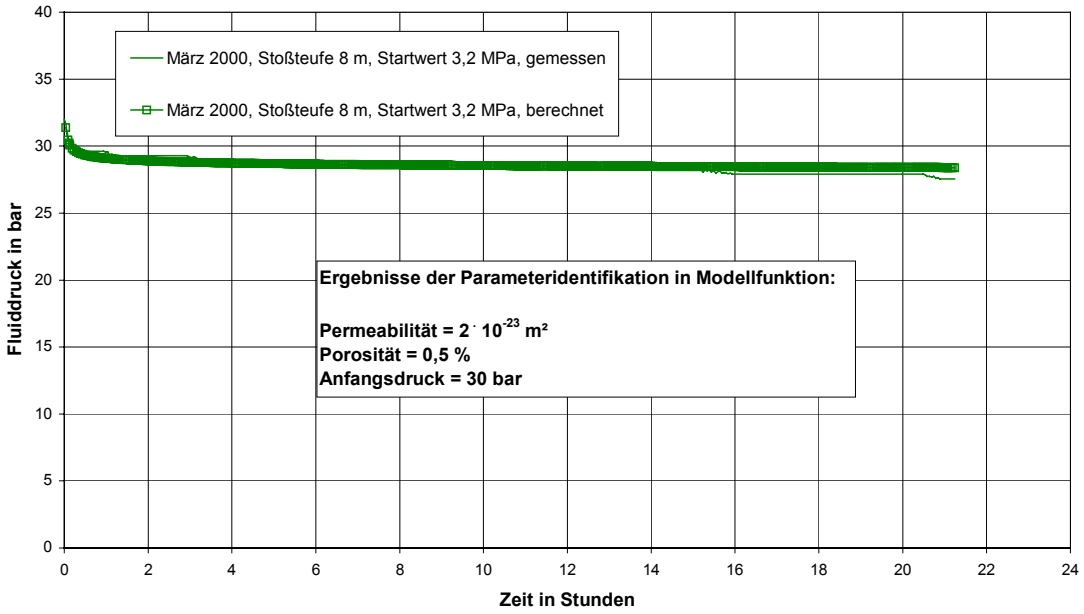

Abbildung 54 Vergleich der Modellfunktion mit der gemessenen Druckabfallkurve im Steinsalz im März 2000 (Stoßteufe 8 m)

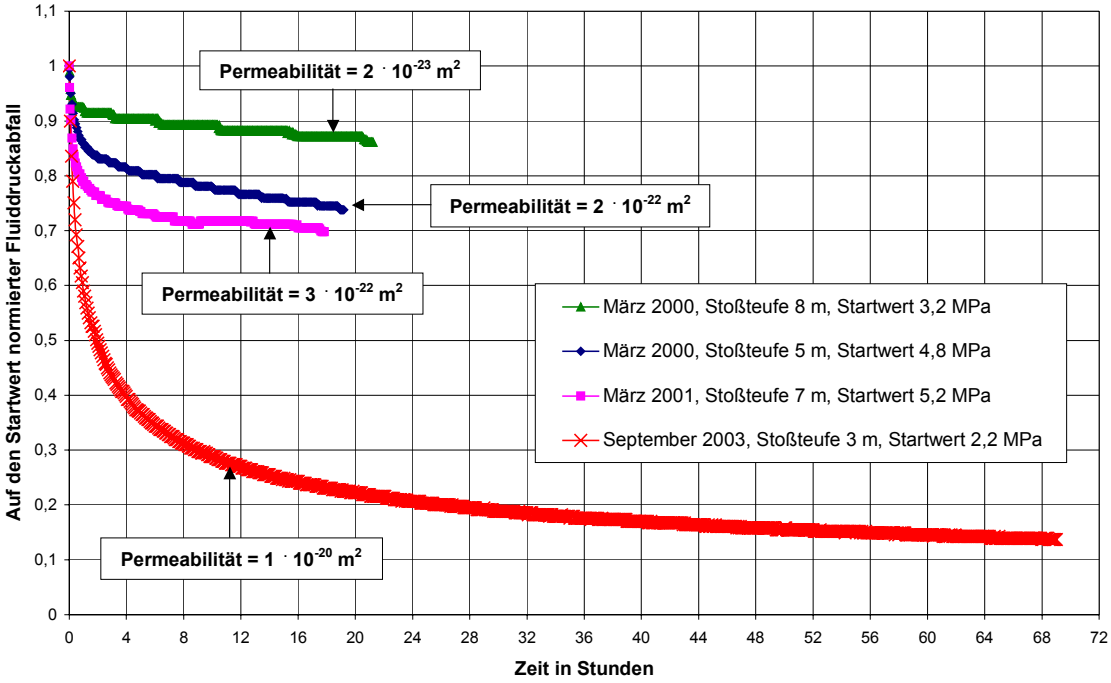

Abbildung 55 Permeabilitätsmessungen in der Steinsalzauffahrt

9. Ermittlung hydraulischer Kennwerte im Anhydrit

9.1 Untersuchung des kompakten und ungeklüfteten Anhydrits

Die Permeabilitätsmessungen im Anhydrit wurden in den Bohrlöchern F1 und F2 (Abbildung 2) mit dem Ziel durchgeführt, in Abhängigkeit von der Änderung des Spannungsfeldes eine Änderung der Durchlässigkeit im Anhydrit nachzuweisen. Die Ermittlung der Permeabilität erfolgte mit der oben beschriebenen Methode, wobei weiterhin ein dünnflüssiges Hydrauliköl mit einer dynamischen Viskosität von $4 \cdot 10^{-3}$ Pa·s, vergleichbar zur Viskosität der oftmals im Salinar eingeschlossenen natürlichen gesättigten Salzlösungen, und die Systemkompressibilität von 1,7 GPa verwendet wurden. Ein ursprünglicher Laugengehalt in der Gesteinsmatrix vor den Versuchen wird, wie im Steinsalz, ausgeschlossen.
Die Messungen fanden im homogenen Anhydrit sowie im Bereich einzelner mineralgefüllter Klüfte sowie bitumengefüllter Suturen statt. Offene Klüfte konnten nicht sondiert werden. Die Messzeiträume wurden bis zu mehreren Wochen verlängert. Der Begriff der Permeabilität ist, wie bereits oben ausgeführt, als spezieller standort- und verfahrensbezogener Strömungskennwert für die Wiederholungsmessungen aufzufassen.

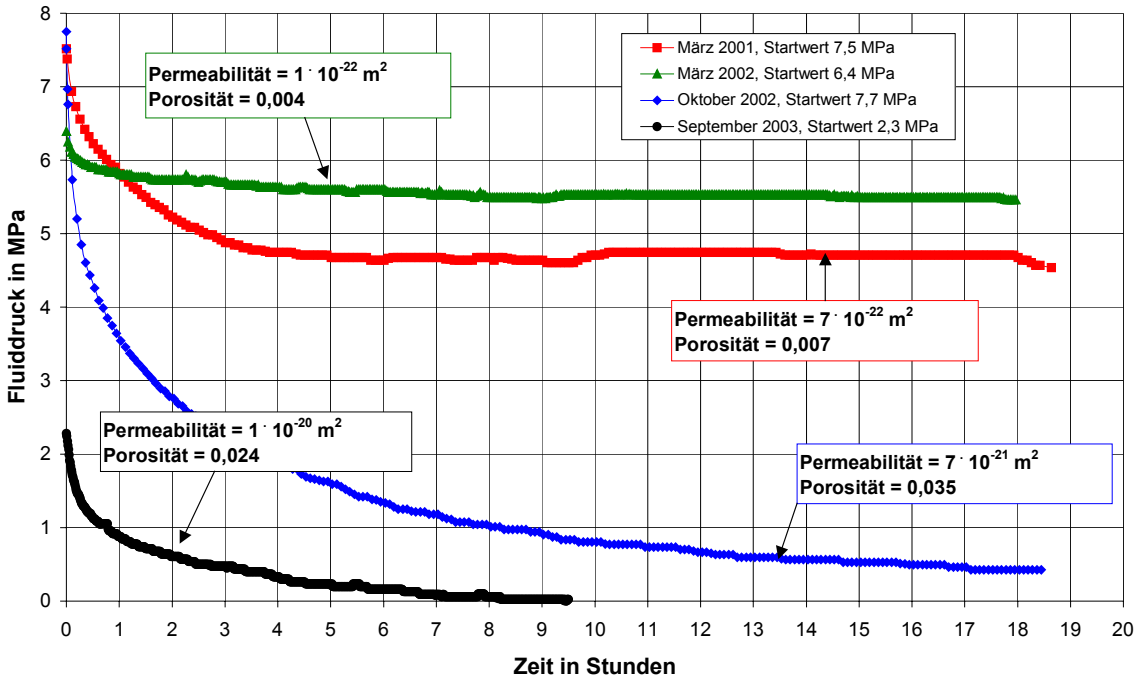

Abbildung 56 Druckverläufe im Bohrloch F2 in einer Stoßteufe von 5,1 m

In Abbildung 56 sind die Druckverläufe in der Bohrung F2 in einer Stoßteufe von 5,1 m

(Bohrlochteufe 13,0 m) zu sehen. In diesem Bohrlochabschnitt steht ein kompakter Anhydrit ohne Klüfte an und er wurde vom März 2001 bis zum September 2003 ausschließlich für die Wiederholungsmessungen genutzt. Die Kurvenanpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ 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 die in der Abbildung aufgeführten Permeabilitäten und Porositäten. Die Größenordnung der Permeabilitäten von minimal $1 \cdot 10^{-22}$ m² bis maximal $1 \cdot 10^{-20}$ m² ist mit den Wiederholungsmessungen im Steinsalz ab März 2000 vergleichbar und repräsentiert einen dichten Gebirgsabschnitt. Die mittels Parameteridentifikation bestimmten Porositäten lagen im Anhydrit im Oktober 2002 und September 2003 jedoch im Prozentbereich.
Im Unterschied zu den Messungen im Steinsalz in Abbildung 55 wurde immer wieder der gleiche Bohrlochabschnitt sondiert.

Der Befund einer deutlichen Abnahme der hydraulischen Dichtheit im Verlauf der Wiederholungsmessungen ist zunächst ein Einzelergebnis dieses Bohrlochabschnittes. Eine Bewertung kann erst nach der Darstellung aller Resultate erfolgen und zunächst soll in einem weiteren Beispiel untersucht werden, welche hydraulischen Parameter sich ergeben würden, wenn die Permeation nicht entlang des gesamten Druckintervalls, sondern nur in einer Einzelkluft stattfinden würde.

9.2 Diskussion einer Kluftströmung

In Abbildung 57 ist der Druckverlauf in der Bohrung F1 in einer Stoßteufe von 9,8 m (Bohrlochteufe 11,0 m) dargestellt. In dem Bohrlochabschnitt konnte mittels der Kamerabefahrung und Bohrkernbemusterung nicht eindeutig geklärt werden, ob in dem vorwiegend kompakten und ungeklüfteten Kern auch eine geschlossene Kluft, vergleichbar zur Ausbildung in Abbildung 27, aufgeschlossen ist. Bei der Kurvenanpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ an die Funktion $\dot{p}_{fit}(t)$ wurde deshalb neben der Höhe des Abströmintervalls von 0,5 m in einem zweiten Auswertungsschritt auch eine Höhe von 7 µm festgelegt. Das bedeutet, im druckbeaufschlagten Gebirgsbereich wird alternativ eine Permeation ausschließlich über eine diskrete Kluft mit dieser hydraulischen Öffnungsweite angenommen. Die ermittelte Permeabilität ergab sich dadurch signifikant höher mit $9 \cdot 10^{-16}$ m² bei einer Porosität von 100 % im Vergleich zu $6 \cdot 10^{-22}$ m² bei einer Porosität von 6 ‰. Die Modellfunktionen sind in beiden Fällen identisch.

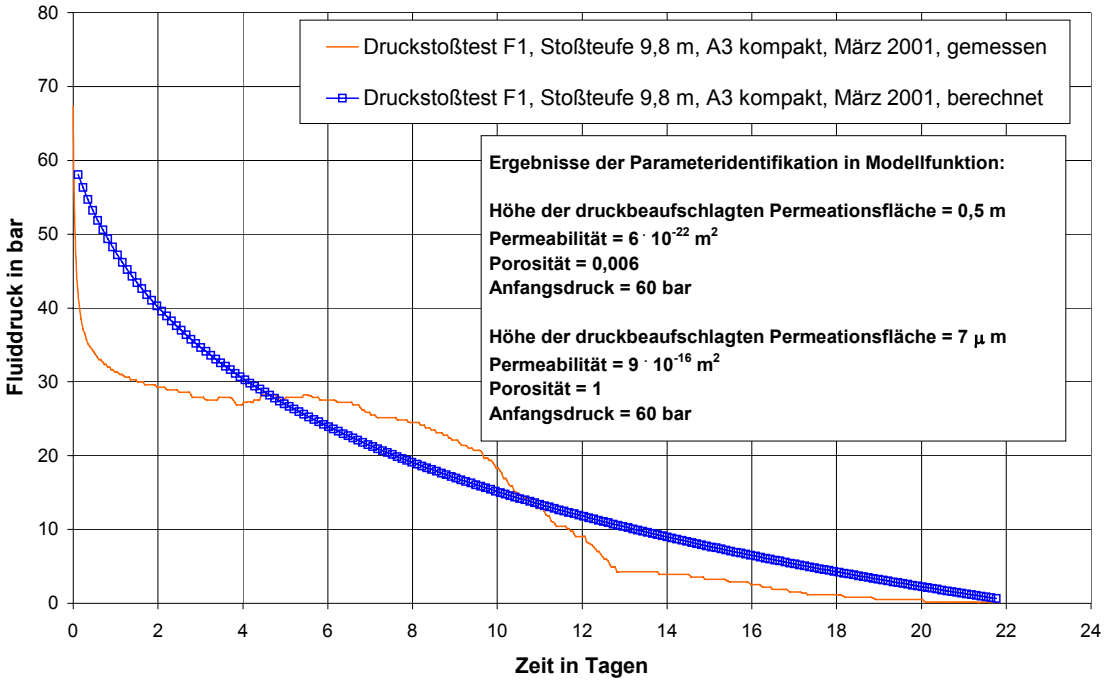

Abbildung 57 Anpassung der Modellfunktion im Bohrloch F1 in einer Stoßteufe von 9,8 m bei Vorgabe unterschiedlicher Druckintervallhöhen

Eine hydraulisch wirksame Permeationshöhe von 7 µm erscheint mit diesem geringen Wert als wenig plausibel, konnte jedoch in IfG (1999) sowohl in Laborversuchen nach dem Hydrofrac von Anhydritwürfeln, als auch in situ im Verlauf der Rissausbreitung nach dem Hydrofrac im Anhydrit ermittelt werden.

Infolge des Hydrofracs bildeten sich in den Anhydritproben verzweigte Rissscharen bzw. Einzelrisse. Die Einzelrisse wurden am häufigsten beobachtet (siehe Abbildung 58). Die Vermessung führte zu Öffnungsweiten von 5 bis 15 µm.

Die untertägige Öffnung eines Hydrofrac-Risses konnte in einer geringen Stoßteufe von 1,9 m mit hochempfindlichen Wegaufnehmern nachgewiesen werden. Dazu wurden 2 im Bauwesen übliche Metallstützen vor dem Anhydritstoß zwischen der Streckensohle und -firste verklemmt und daran 4 horizontal messende Wegaufnehmer in einer radialen Entfernung vom Bohrloch von 0,5 m und 2 weitere Wegaufnehmer in einer radialen Entfernung von 1 m befestigt. Die Anbindung zum Anhydritstoß erfolgte über Spreizhülsenanker, die etwa 30 cm im Stoß versenkt wurden. Bei der geringen Stoßteufe des Hydrofracs wurde von einer normalen Rissausbreitung (parallel zum Stoß) ausgegangen und erwartet, dass sich der Stoß geringfügig in Richtung der Metallstützen verschiebt.

Abbildung 58 Einzelriss in einer Anhydritprobe nach dem Hydrofrac (Hundertfache Vergrößerung, Druckmedium fluoreszierendes Öl)

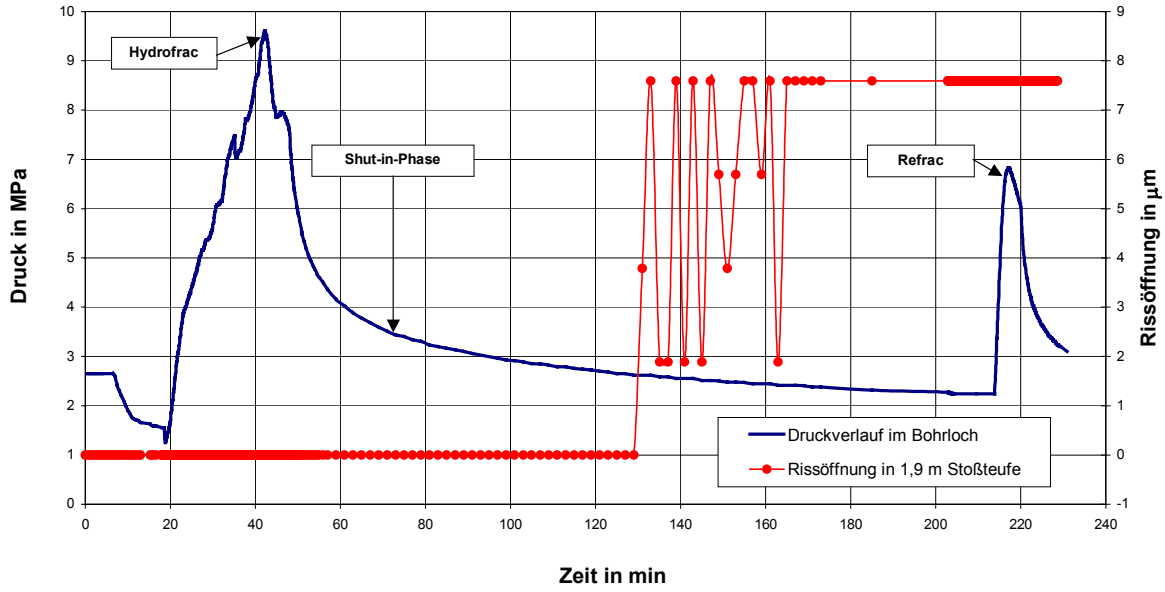

Abbildung 59 Hydrofrac-Versuch im Anhydrit in einer Stoßteufe von 1,9 m und Messung der dabei realisierten Rissöffnung

In Abbildung 59 ist zu erkennen, dass im Verlauf der Shut-in-Phase etwa 90 Minuten nach dem Hydrofrac an dem ersten Wegaufnehmer in einer radialen Entfernung vom Bohrloch von 0,5 m tatsächlich eine Rissöffnung nachweisbar ist, die nach dem Refrac einen endgültigen

Betrag von etwa 7 μm erreicht.

Auf die sich nach dem Hydrofrac in den Anhydritwürfeln ausgebildeten Risse und die in situ sondierten geschlossenen Klüfte wurde hinsichtlich ihres hydraulischen Verhaltens das kubische Fließgesetz (8) angewendet:

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

$q =$ Volumenstrom in der Kluft
$b =$ Kluftöffnung
$\mu =$ dynamische Viskosität
$p =$ Bohrlochinnendruck
$r_a, r_i =$ Außen – und Innenradius (8)

Das kubische Fließgesetz beschreibt den stationären Volumenstrom q einer laminaren Strömung zwischen zwei glatten, parallelen Platten mit konstanter hydraulischer Kluftöffnungsweite b. Diese Bedingungen treffen auf die natürlichen Anhydritklüfte in der Regel nicht zu, sondern es ist von unterschiedlichen Öffnungsweiten und Durchtrennungsgraden mit Kluftfüllungen sowie einer Kluftrauhigkeit auszugehen. Bezüglich der Konsequenzen bei der Abweichung vom Modell ist in Thüringer, Ch. (2002) z.B. ausgeführt, dass sich bei einem Anteil der Materialbrücken, bezogen auf die Kluftfläche, von mehr als 30 % die Durchflussraten um mindestens 2 Größenordungen verringern können. Die Konzentration auf bevorzugte Abflusskanäle durch Einschnürung des Fließquerschnittes (channeling) führt dort zu lokal höheren Strömungsgeschwindigkeiten und damit einem schnelleren Stofftransport als er durch die planparallele Strömung beschrieben wird. Bei den Würfelfracversuchen in IfG (1999) hat sich gezeigt, dass solche Materialbrücken nach der Rissbildung tatsächlich existierten. Die Rissfläche konnte erst nach der mechanischen Öffnung mittels eines Meisels freigelegt werden.

Die Anwendung der Reynoldszahl Re

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

$\bar{v}$ = mittlere Strömungsgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

b = hydraulische Kluftöffnungsweite in m

ν = kinematische Viskosität in $\frac{m^2}{s}$ (9)

führt bei der kinematischen Viskosität des verwendeten dünnflüssigen Hydrauliköls (Spindelöl) von $5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, der gemessenen Kluftöffnungsweite < 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 Breite von 1 m) jedoch 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 bezeichnet.
Wie in Abbildung 58 zu erkennen, ist die relative Kluftrauhigkeit (Verhältnis der Mikrorauhigkeit der Kluftoberfläche zur hydraulischen Öffnungsweite) hoch und es muss auf jeden Fall von einer nicht parallelen Strömung ausgegangen werden.

Trotz der diskutierten Abweichungen der tatsächlichen Verhältnisse von den idealen Modellannahmen wurde für die stationären Strömungsverhältnisse nach dem Hydrofrac in den Anhydritwürfeln (IfG (1999)) und die im Abschnitt 6.3 ermittelten Wertepaare der Injektionsrate q und dem Abströmwiderstand p am In-situ-Messort die Beziehung (8) zur Berechnung der diese Verhältnisse repräsentierenden hydraulischen Kluftöffnungsweiten angewandt. Bei der Interpretation muss berücksichtigt werden, dass die tatsächlichen Kluftöffnungsweiten bei einem signifikanten Anteil an Materialbrücken auch größer sein können. Die Ausführungen in Thüringer, Ch. (2002) zeigen aber, dass die Abweichungen in der Kluftöffnungsweite keine Größenordnungen erreichen.

Für die Laborversuche ergaben sich hydraulischen Kluftöffnungen zwischen 5 und 9 μm und für die In-situ-Versuche zwischen 3 und 7 μm. Der Mittelwert lag bei 7 μm. Für die In-situ-Versuche kam ein Innenradius r_i von 50,5 mm zur Anwendung und der Außenradius r_a wurde in Auswertung der Schallemissionsmessungen mit 1,5 m festgelegt. Die dynamische Viskosität μ betrug 4 mPas.
Die Ausführungen zeigen, dass der in Abbildung 57 verwendete Wert für eine hydraulisch

wirksame Kluftöffnung von 7 μm in seiner Größenordnung mit unterschiedlichen Verfahren belastbar begründet werden kann. Diese Öffnungsweite repräsentiert gefracte Anhydritrisse bzw. geschlossene In-situ-Klüfte nach einer stationären Fluiddurchströmung auf den rauen und nicht vollständig durchtrennten Kluftoberflächen.

Zur Berechnung der Kluftpermeabilitäten aus der Öffnungsweite sind in der Fachliteratur (siehe Thüringer, Ch. (2002)) folgende Beziehungen nach Hagen-Poiseuille (10), Louis (11) und Lomize (12) aufgeführt:

$$k = \frac{b^2}{12} \qquad (10)$$

b = hydraulische Kluftöffnung
k = Kluftpermeabilität nach Hagen – Poiseuille
relative Kluftrauhigkeit $\leq 0{,}032$

$$k = \frac{b^2}{12 \cdot \left[1 + 8{,}8 \cdot \left(\frac{mr}{2 \cdot b}\right)^{\frac{3}{2}}\right]} \qquad (11)$$

mr = Mikrorauhigkeit der Kluftoberfläche
b = hydraulische Kluftöffnung
k = Kluftpermeabilität nach Louis
$0{,}032 <$ relative Kluftrauhigkeit $\leq 0{,}1$

$$k = \frac{b^2}{12 \cdot \left[1 + 17 \cdot \left(\frac{mr}{2 \cdot b}\right)^{\frac{3}{2}}\right]} \qquad (12)$$

mr = Mikrorauhigkeit der Kluftoberfläche
b = hydraulische Kluftöffnung
k = Kluftpermeabilität nach Lomize
$0{,}1 <$ relative Kluftrauhigkeit ≤ 1

Die Beziehungen wurden gleichfalls für stationäre Volumenströme an künstlichen Trennflächen mit verschiedenen Rauhigkeiten aufgestellt und gelten auch nur für solche Bedingungen. Selbst bei einer Mikrorauhigkeit der Kluftoberfläche in der Größenordnung der hydraulischen Kluftöffnung (relative Kluftrauhigkeit = 1) würde sich bei Anwendung der Beziehung von Lomize unter Zugrundelegung einer Kluftöffnung von 7 μm noch ein sehr

hoher Betrag für die Kluftpermeabilität von $5{,}8 \cdot 10^{-13}$ m² ergeben, der mit den Druckstoßtests in situ nicht gemessen wurde. Es sind demzufolge die Schlussfolgerungen zu ziehen:

- In einem im Labor oder in situ erzeugten Hydrofracriss oder einer geschlossenen geologischen Trennfläche kann mittels des sich unter stationären Verhältnissen bei einer konstanten Permeationsrate einstellenden Bohrlochinnendruckes mit dem kubischen Fließgesetz eine hydraulisch wirksame Rissöffnungsweite von etwa 7 μm berechnet werden. Diese gilt für ein druckbeaufschlagtes Risssystem, in dem kein vollständiger Durchtrennungsgrad vorhanden sein muss. Auf Grund der rauen Rissoberfläche ist von einer nicht parallelen Strömung auszugehen, infolge der geringen Strömungsgeschwindigkeit liegt aber keine turbulente Strömung vor. Ohne Nachinjektion fällt der Bohrlochinnendruck unmittelbar auf Null, d.h. es ist keine primäre Dichtheit vorhanden.
- Die Rissöffnungsweite b wurde in dieser Größenordnung im Labor und in situ auch gemessen.
- Eine Berechnung der Kluftpermeabilität mit der Beziehung (10) nach Hagen-Poiseuille (glatte, parallele Platten) oder den entsprechenden Modifikationen unter Berücksichtigung der Rauhigkeit führt zu Permeabilitäten, die für Risssysteme gelten, die unter einem permanenten Fluidinnendruck stehen. Die berechnete Kluftpermeabilität ist wesentlich größer, als in einem zunächst innendruckfreien Risssystem mit einem kurzzeitigen Druckstoßtest ermittelt. Nach dem Druckstoß fällt infolge der fehlenden Nachverpressung der Fluidinnendruck mehr oder weniger schnell ab.
- Bei der Verwendung der Kluftpermeabilität (oder abgeleiteter Parameter wir der Transmissibilität) sind deshalb die zugrundeliegenden Versuchsbedingungen zu beachten. Streng genommen gelten die Parameter nur unter diesen Bedingungen.

9.3 Auswertung der Druckstoßtests in einer carnallitgefüllten Kluft

Diese Untersuchungen wurden im Bohrloch F2 in einer Stoßteufe von 2,7 m (Bohrlochteufe6,9 m) durchgeführt. Die carnallitgefüllte Kluft ist in Abbildung 32 zu erkennen. In den Abbildungen 60 und 61 sind wieder die Ergebnisse zweier Parameteridentifikationen, zunächst unter der Annahme der Permeation entlang des gesamten druckbeaufschlagten Bereiches und in einem zweiten Schritt unter Voraussetzung der Permeation nur in der etwa 1 mm starken Carnallitkluft, dargestellt.

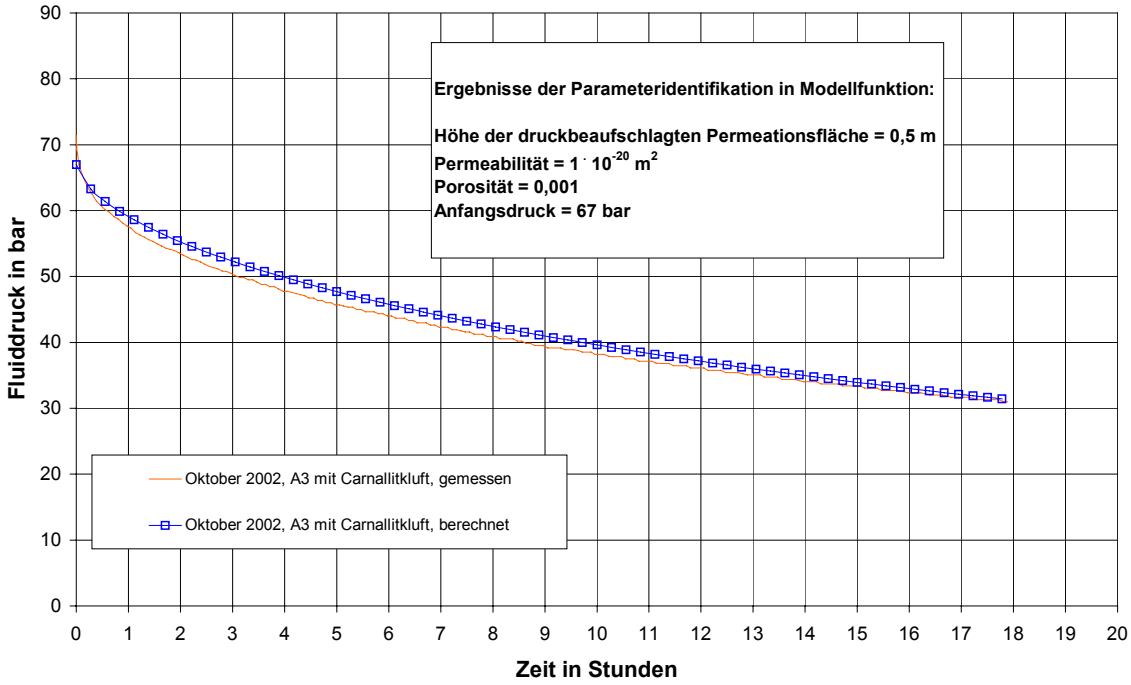

Abbildung 60 Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 0,5 m

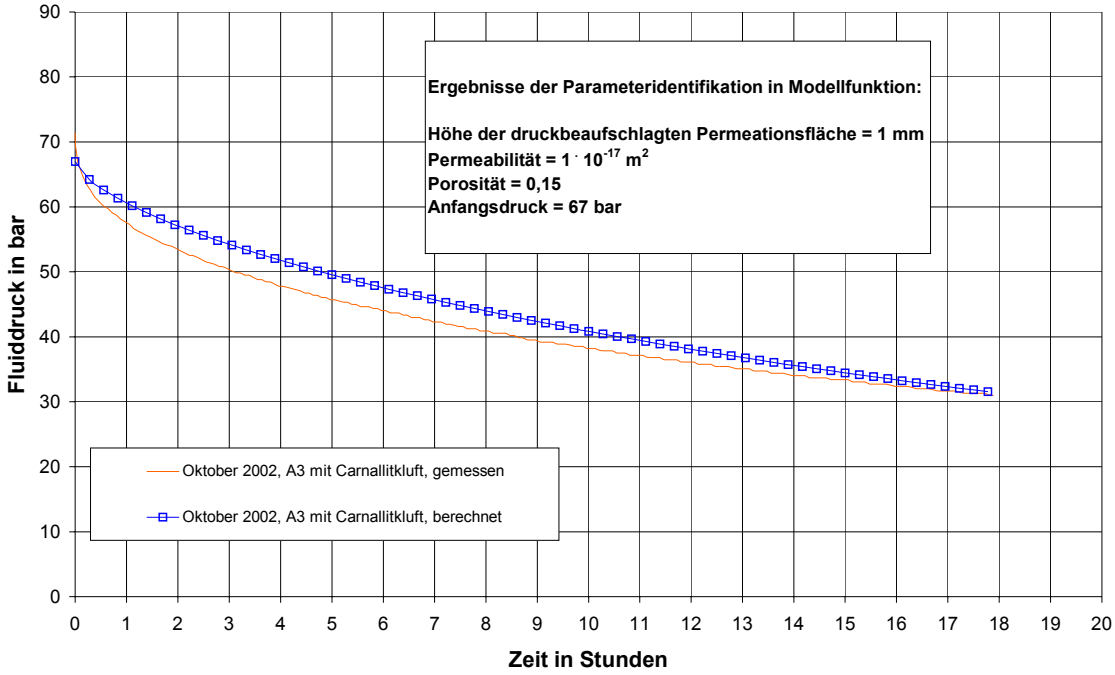

Abbildung 61 Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, H = 1 mm

Die Kurvenanpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ 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 %. Die Modellfits an die Druckabfallkurven sind in beiden Fällen gut.

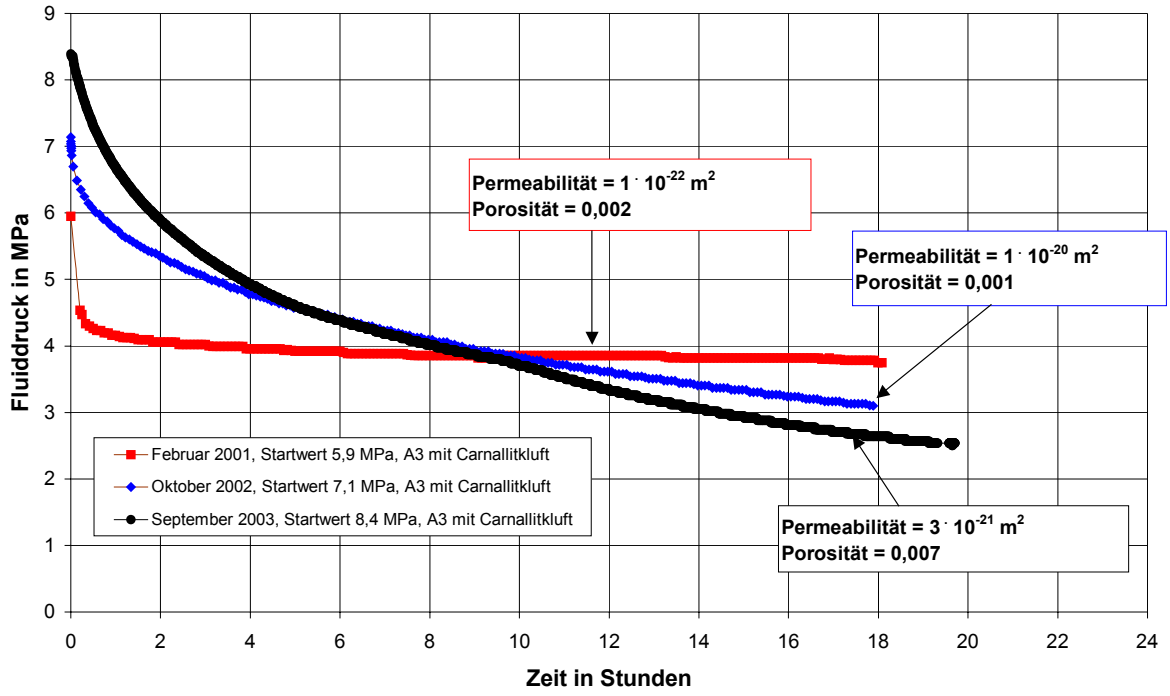

Abbildung 62 Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, zeitliche Entwicklung der Permeabilität bei einer Höhe des Permeationsintervalls von 0,5 m

Die zeitliche Entwicklung der ermittelten Permeabilitäten vom Februar 2001 bis zum September 2003 ist in den Abbildungen 62 und 63 dargestellt. Die Parameteridentifikation erfolgte bei Annahme der Fluidpermeation entlang der gesamten Druckintervallhöhe von 0,5 m bzw. bei Voraussetzung der Permeation ausschließlich in der mit Carnallit gefüllten diskreten Einzelkluft mit einer Öffnungsweite von 1 mm. Im Verlauf der Wiederholungsmessungen ist keine Zunahme der Permeabilitäten wie im gleichen Bohrloch in einer Stoßteufe von 5,1 m in Abbildung 56 zu erkennen.

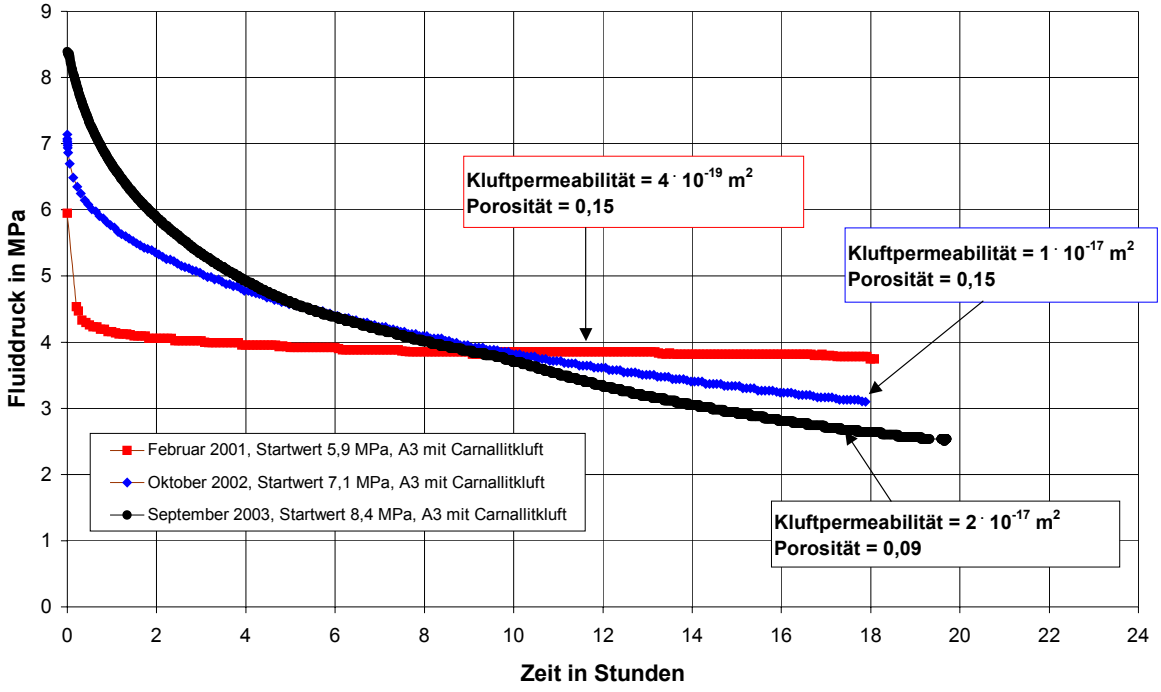

Abbildung 63 Bohrloch F2 in Stoßteufe 2,7 m, Kluft mit Carnallitfüllung, zeitliche Entwicklung der Permeabilität bei einer Höhe des Permeationsintervalls von 1 mm

In dem Messzeitraum von 2,5 Jahren sind mittlere Gebirgspermeabilitäten von $1 \cdot 10^{-22}$ m² bis $1 \cdot 10^{-19}$ m² bei Porositäten von 1 bis 7 ‰ bzw. Permeabilitäten in der Kluft von $4 \cdot 10^{-19}$ m² bis $2 \cdot 10^{-17}$ m² bei Porositäten von 9 bis 15 % in der Carnallitfüllung nachweisbar.

9.4 Auswertung der Druckstoßtests im Bereich bitumengefüllter Suturen

Eine letzte Ermittlung der Permeabilitäten in Wiederholungsmessungen erfolgte im Bohrloch F1 in einer Stoßteufe von 6,7 m (Bohrlochteufe 7,5 m). Im genannten Bohrlochabschnitt stehen Anhydritbereiche mit bitumengefüllten Suturen (siehe Abbildung 64) an. Die Entstehung von Suturen im Anhydritgefüge ist auf Umkristallisationen und Kompaktionen während der frühen Genese zurückzuführen. Sie bilden mechanische Inhomogenitätsbereiche und lassen verringerte Gebirgsdichtheiten vermuten. Die zeitliche Entwicklung der ermittelten Permeabilitäten vom Februar 2001 bis zum September 2003 ist in den Abbildungen 65 und 66 dargestellt. Die Parameteridentifikation erfolgte bei Annahme der Fluidpermeation entlang der gesamten Druckintervallhöhe von 0,5 m bzw. bei

einer

Abbildung 64 Bitumengefüllte Drucksuturen im Bohrkern F1, Stoßteufe 7 m

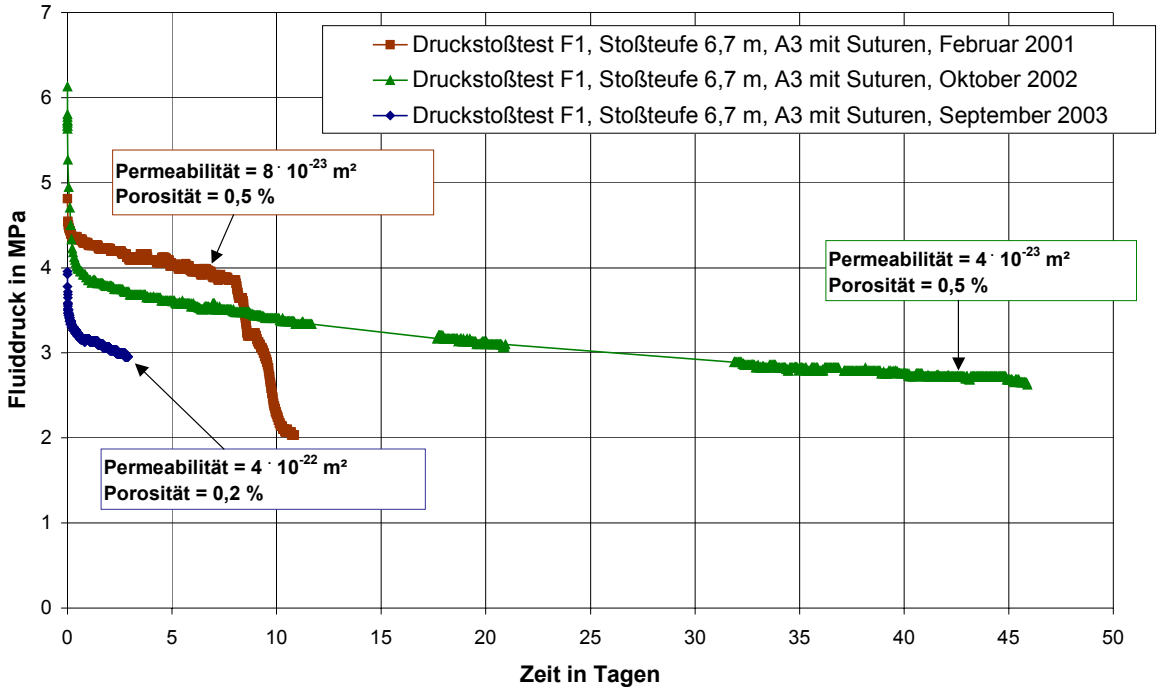

Abbildung 65 Bohrloch F1 in Stoßteufe 6,7 m, A3 mit Drucksuturen, H = 0,5 m

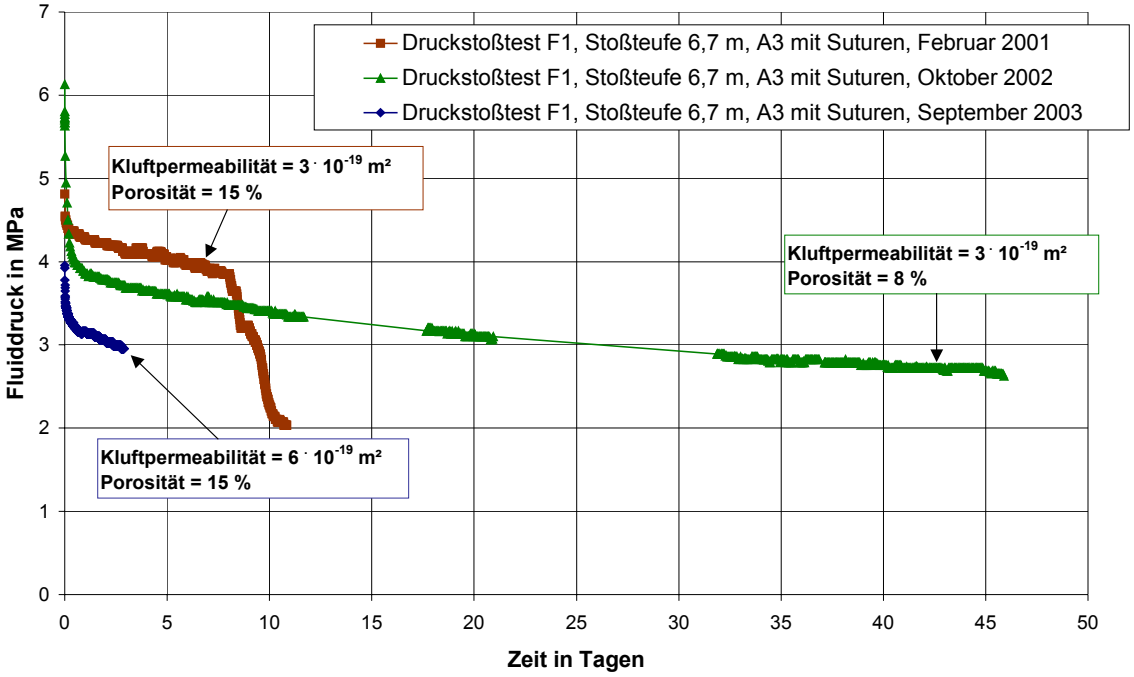

Abbildung 66 Bohrloch F1 in Stoßteufe 6,7 m, A3 mit Drucksuturen, H = 1 mm

Voraussetzung der Permeation ausschließlich in den Suturen mit einer integralen Öffnungsweite von 1 mm. Die Gebirgspermeabilität (Permeation entlang der gesamten Druckintervallhöhe) erhöhte sich in dem Messzeitraum von 2,5 Jahren um etwa eine Größenordnung von $8 \cdot 10^{-23}$ m² auf $4 \cdot 10^{-22}$ m² bei Porositäten von 2 bis 5 ‰ bzw. bei einem ausschließlichen Bezug auf die Drucksuturen ergeben sich nahezu konstante Permeabilitäten von $3 \cdot 10^{-19}$ m² bis $6 \cdot 10^{-19}$ m² bei Porositäten von 8 bis 15 %. Der Untersuchungsbereich zeigte sich als sehr dicht und die ursprünglich vermutete erhöhte Durchlässigkeit konnte nicht bestätigt werden.

Im Verlauf der Wiederholungsmessungen war keine belastbare Zunahme der Permeabilitäten zu erkennen.

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

10.1 Simulation der instationären Permeation nach einem Druckstoßtest

Im Abschnitt 8.1 wurde eine Methode vorgestellt, bei der aus dem Druckabfall in der Shut-in-Phase nach einem Druckstoßtest unter Verwendung einer Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ die Permeabilität K und die Porosität ϕ ermittelt werden konnten. Die Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ 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 Kompressibilität 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 der Druckabfall Δp entsprechend der Systemkompressibilität K_S einem Fluidvolumen ΔV entspricht, welches in den zusammenhängenden Porenraum entlang des Druckintervalls abströmen kann.

Zur Überprüfung dieses Prozesses wurde in dem in Abbildung 67 dargestellten mechanisch/hydraulisch gekoppelten Rechenmodell eines druckbeaufschlagten Bohrloches mit dem Programm FLAC (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. Der Bohrlochradius beträgt 50,5 mm und die Druckintervallhöhe 0,5 m. Mit dem Rechenmodell wurde der Druckverlauf eines Versuches im Steinsalz (Bohrloch F7, März 2000, Stoßteufe 8 m) nachvollzogen. Entsprechend Abbildung 54 führt die Anpassung der Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ zu einer berechneten Permeabilität von $2 \cdot 10^{-23}$ m² bei einer Porosität von 5 ‰.

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.

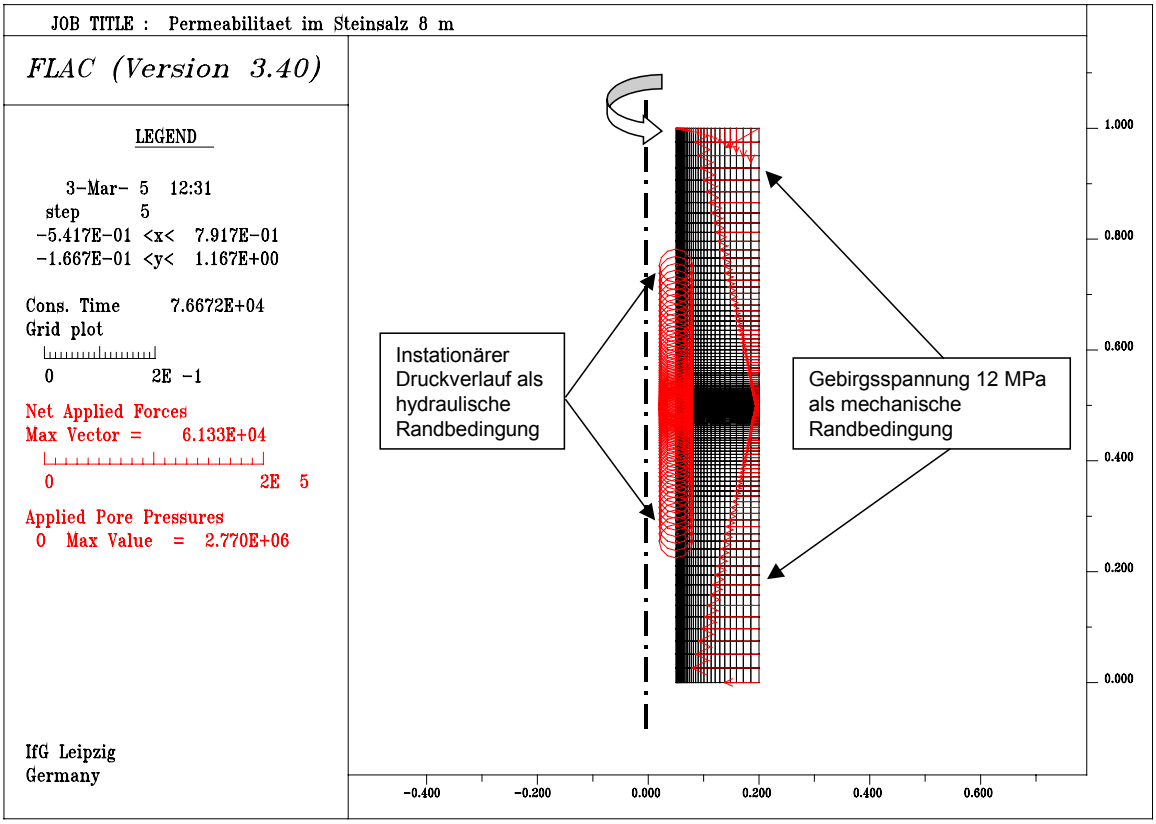

Abbildung 67 Rechenmodell eines druckbeaufschlagten Bohrloches Ø 101 mm

Entsprechend der Fitfunktion (13) fiel der Bohrlochinnendruck in 76.450 s um 2,39 bar. Das Bestimmtheitsmaß berechnete sich mit 1,0.

$$p_{fit}(t) = a - b \cdot \sqrt{\frac{t}{t^*}}$$

$$a = 30{,}09 \text{ bar} \qquad (13)$$
$$b = 8{,}65 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$$
$$t^* = 1 \text{ s}$$
$$t \text{ in s}$$

Der Kompressionsmodul K_S des druckbeaufschlagten Systems betrug 1,7 GPa und die Dichte des Fluids 1.300 kg/m³. Die Ausgangsporosität wurde mit 5 ‰ bei einer Sättigung des Porenraumes von Null vorgegeben. Mit (14) lässt sich aus dem Druckabfall Δp von 0,239 MPa ein in die Matrix penetrierendes Volumen ΔV mit 0,46 cm^3 berechnen.

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{K_S} \cdot V_0$$
$$\Delta p = 0{,}239\ \text{MPa} \qquad (14)$$
$$K_S = 1700\ \text{MPa}$$
$$V_0 = 3250\ \text{cm}^3$$

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 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 cm³. Damit ist der mit der Modellfunktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ gefundene Betrag von $2 \cdot 10^{-23}$ m² bestätigt.

Die Modellrechnungen wurden exemplarisch für unterschiedliche Permeabilitätsversuche bei Voraussetzung der Abströmung entlang des gesamten Druckintervalls und ausschließlich in singulären Klüften wiederholt und bestätigten in allen Fällen die vorgenommenen Auswertungen.

10.2 Berechnung axialsymmetrischer stationärer Strömungsverhältnisse in der Gesteinsmatrix bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen

Die Zielstellung der folgenden Modellrechnungen bestand in der Simulation einer vollständigen Permeation und der Einstellung stationärer Strömungsverhältnisse im Permeationsgebiet. Da diese Bedingungen nur in den im Projekt BARITON (IfG 1999) durchgeführten Gesteinswürfeln nach dem Hydrofrac erreicht wurden, ergeben sich die in Abbildung 68 dargestellten Modellabmessungen. Der Steinsalzwürfel wurde mit einem Zylinder äquivalenter Abmessungen mit einer Höhe von 10 cm und einem Radius von 5 cm abgebildet. Der Bohrlochradius beträgt 8 mm und die Höhe des Druckintervalls 40 mm.

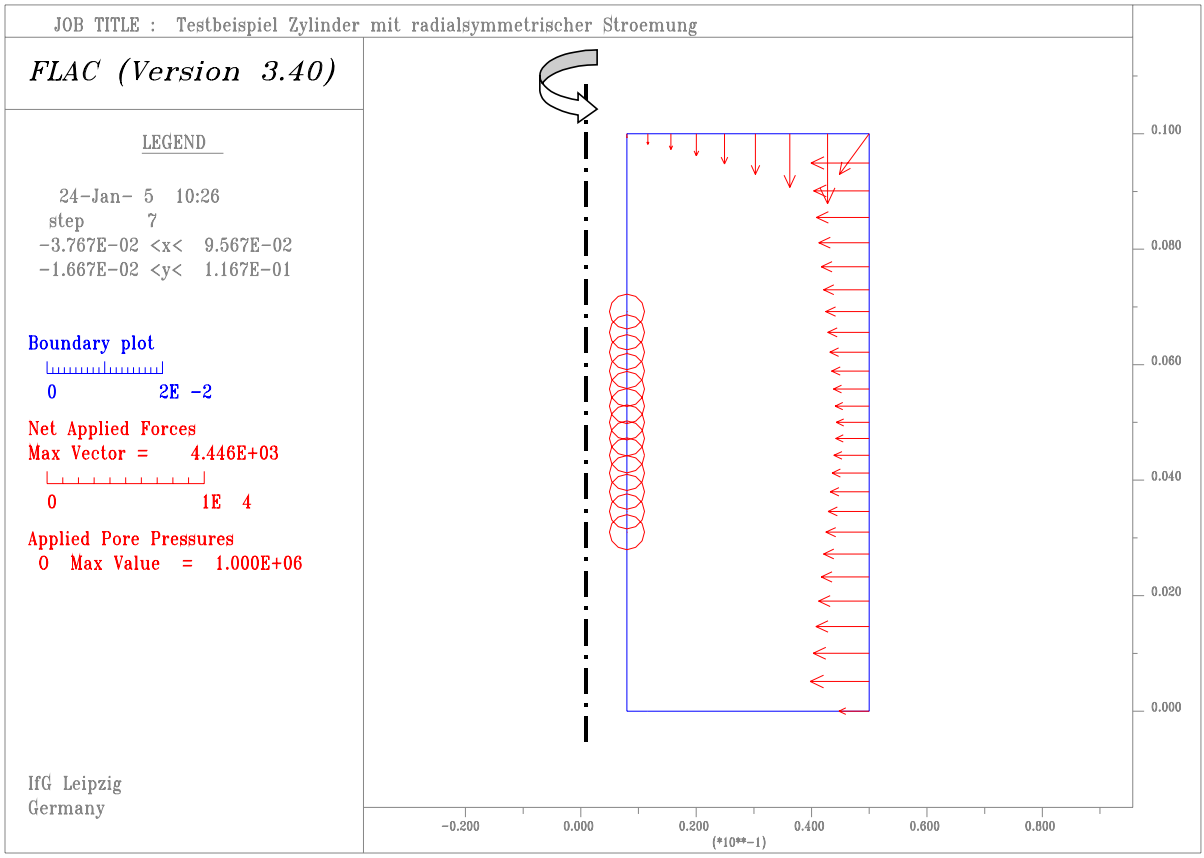

Abbildung 68 Axialsymmetrisches Modell einer Gesteinsprobe im Laborversuch

Die Permeation entlang der gesamten Druckintervallhöhe wurde in der Steinsalzprobe mit einem Kompressionsmodul von 17 GPa, einem Schermodul von 10 GPa und einer Dichte von 2.200 kg/m³ berechnet. Die Vorgabe der äußeren mechanischen Druckrandbedingungen erfolgte gemäß der Laborversuche mit 15 MPa. Das Rechenmodell bestand aus 208 Elementen.

Der Kompressionsmodul K_S des druckbeaufschlagten Systems betrug 1,7 GPa, die Dichte des Fluids 1.300 kg/m³ und die dynamische Viskosität 4 mPa·s. Die Ausgangsporosität wurde mit 2 % bei einer Sättigung des Porenraumes von 95 % vorgegeben. Die Sättigung wurde so hoch angesetzt, da die Durchströmungsversuche nach dem Hydrofrac mit einer länger dauernden Nachverpressung durchgeführt wurden. Die Matrixpermeabilität wurde in IfG (1999) mit einem Mittelwert von $1{,}2 \cdot 10^{-15}$ m² bestimmt. Bei einem konstanten Bohrlochinnendruck von 1 MPa lässt sich mit (15) für den stationären Zustand eine konstante Volumenrate von $4 \cdot 10^{-8}$ m³/s (0,14 l/h) berechnen.

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

Q = Volumenstrom in der Gesteinsmatrix
K = Matrixpermeabilität
μ = dynamische Viskosität
H = Druckintervallhöhe
p = Bohrlochinnendruck
r_a, r_i = Außen – und Innenradius

(15)

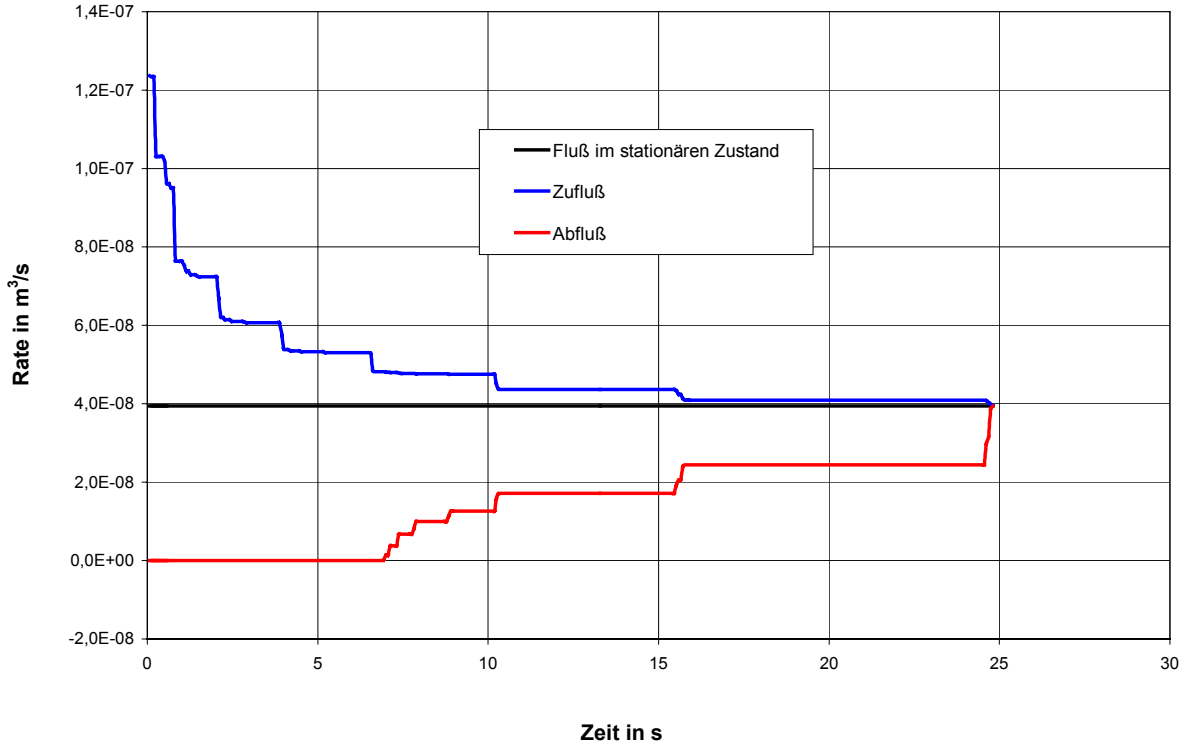

Abbildung 69 Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bei einer Flüssigkeitsrandbedingung von 1 MPa

In Abbildung 69 sind die Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate im Vergleich zum stationären Zustand dargestellt. Im Rechenprogramm FLAC lassen sich diese Bilanzen mit Subroutinen, bezogen auf die Netzknotenpunkte, berechen. Der stationäre Gleichgewichtszustand Zufluss = Abfluss wird nach etwa 25 Sekunden erreicht. Das entspricht den Laborbeobachtungen. In Abbildung 70 sind die stationäre

Porendruckverteilung von 1 MPa am Druckintervall bis Null an der Außenseite der Probe und die Fließvektoren dargestellt.

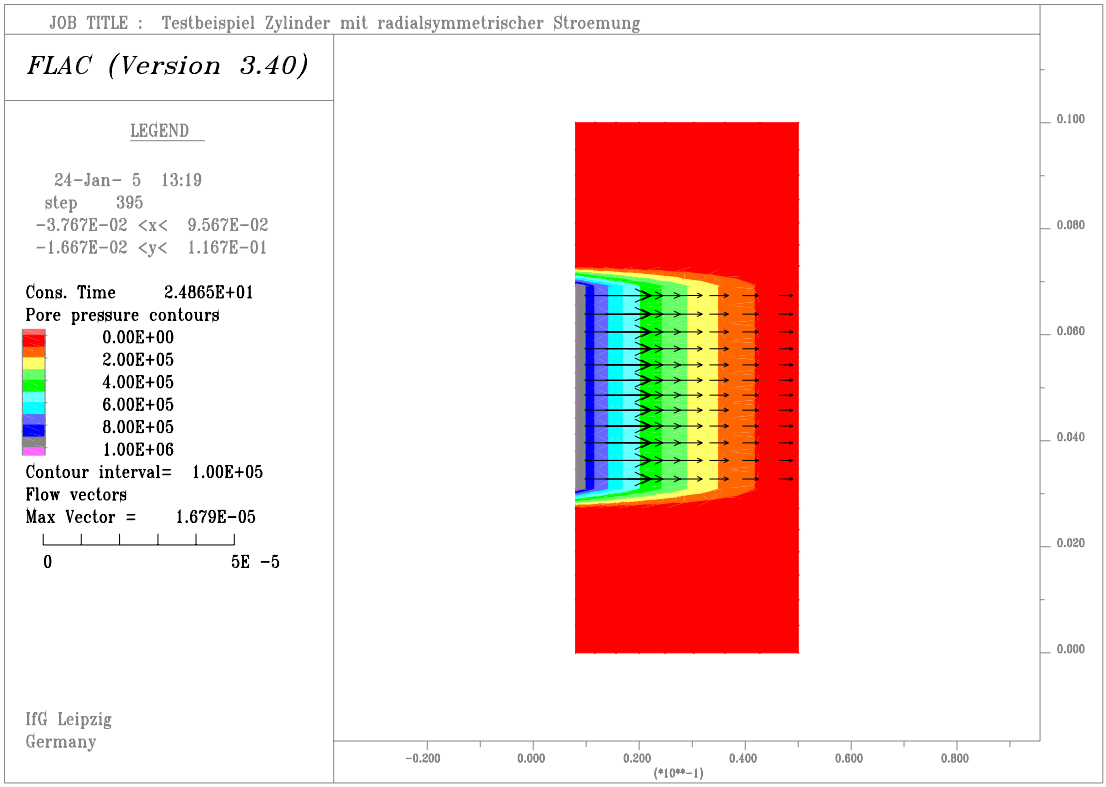

Abbildung 70 Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einer Flüssigkeitsrandbedingung von 1 MPa

In einer inversen Modellierung ist es gleichfalls möglich, eine konstante Volumenrate von $4 \cdot 10^{-8}$ m³/s entlang der Höhe des Druckintervalls vorzugeben und den im stationären Zustand sich einstellenden Bohrlochinnendruck zu berechnen. Entsprechend Abbildung 71 stellt sich dieser, wie theoretisch erwartet, mit 1 MPa ein. Die Zeitdauer bis zum stationären Zustand betragt etwa 30 Sekunden. Im Rechenmodell wurden nur die Randbedingungen modifiziert, alle anderen Parameter blieben unverändert.

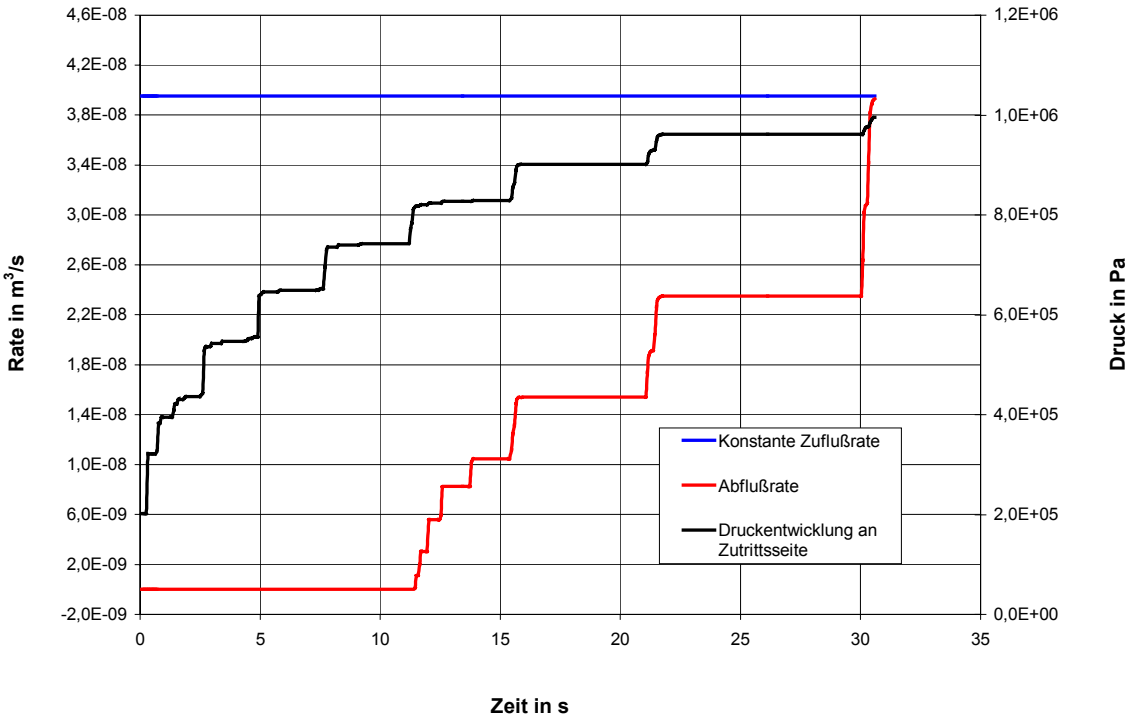

Abbildung 71 Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bei einer Flüssigkeitsrandbedingung von $4 \cdot 10^{-8}$ m³/s

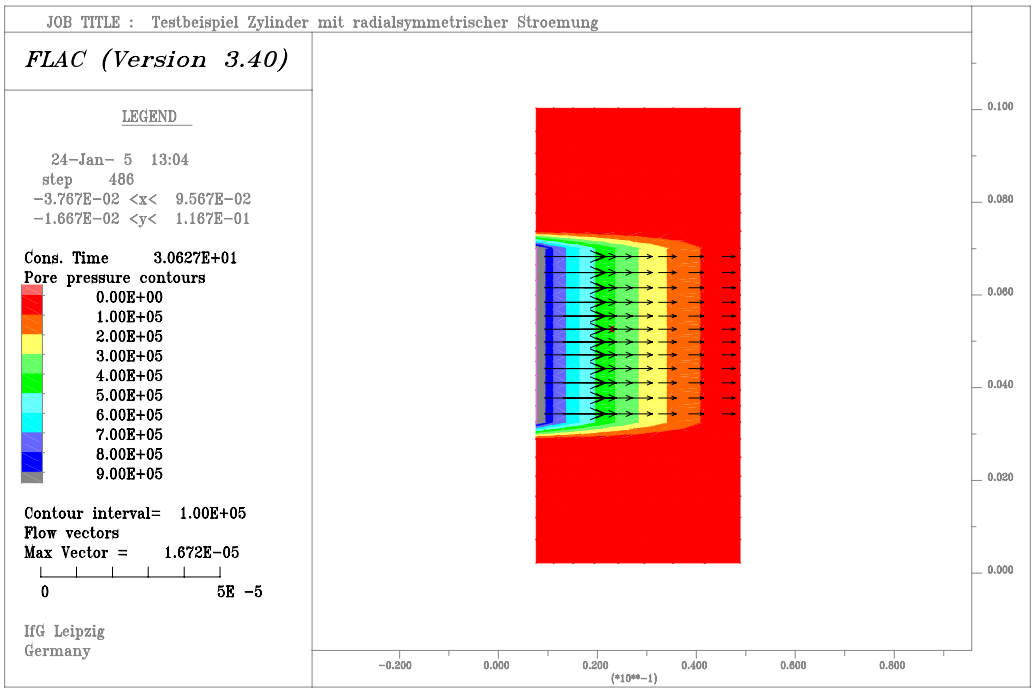

Abbildung 72 Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einer Flüssigkeitsrandbedingung von $4 \cdot 10^{-8}$ m³/s

10.3 Berechnung einer stationären parallelen Kluftströmung bei unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen

Die Berechnung stationärer Strömungsverhältnisse in einem Anhydritriss nach dem Hydrofrac erfolgte ebenfalls in Bezug auf die in IfG (1999) durchgeführten Laborversuche an Gesteinswürfeln. In Abbildung 73 ist ein entsprechender Anhydritwürfel mit den Kantenlängen von 10 cm dargestellt. Der Bohrungsradius beträgt wie oben 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.

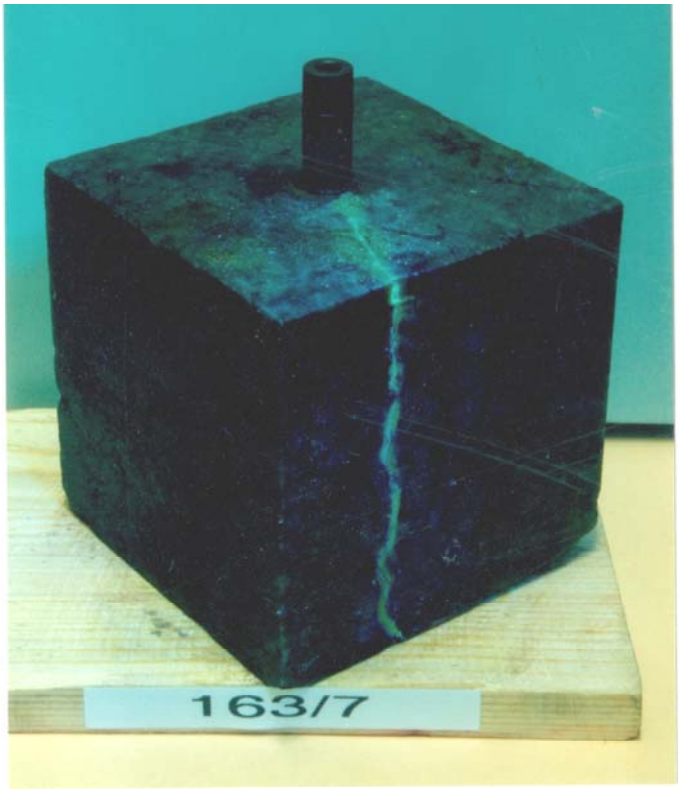

Abbildung 73 Gefracter Anhydritwürfel mit Längsriss entlang der Bohrung

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 (Te Kamp, L.; Konietzky, H. (1996)). Bei der gekoppelten Berechnung einer Fluidströmung in einer Kluft bestimmen die wirkenden Spannungen und Steifigkeiten die Kluftöffnung und damit die Kluftpermeabilität. Im vorliegenden Vorhaben wird ausschließlich auf Einzelklüfte im

Anhydrit, wie sie sich entsprechend Abbildung 73 typischerweise ausbildeten, Bezug genommen. Die grundlegende Idee entsprechend Te Kamp, L.; Konietzky, H. (1996) bestand darin, die für die hydraulische Rechnung gemäß (16) wesentliche Kluftöffnungsweite b in jedem Rechenschritt in Abhängigkeit vom Kluftwasserdruck und der wirkenden Normalspannung zur Kluft zu berechnen. Bei dieser Berechnung besitzt die Kluftsteifigkeit eine signifikante Bedeutung, wie in den nachfolgenden Untersuchungen noch belegt wird.

$$q = \frac{b^3}{12 \cdot \mu} \cdot a \cdot \frac{p}{L}$$

$q =$ Volumenstrom in der Kluft
$b =$ Kluftöffnung
$\mu =$ dynamische Viskosität
$a =$ Kluftbreite
$p =$ Bohrlochinnendruck
$L =$ Klufttiefe in Richtung des Druckgradienten (16)

Der Fluiddruck p wirkt als Innendruck in der fluidgefüllten Kluft und damit der Normalspannung entgegen. Die dadurch bedingte Kluftöffnung b kann entlang L leicht differieren. Die aktuelle Kluftporosität ergibt sich im Rechengang aus der relativen Änderung der Kluftöffnungsweite, bezogen auf die Ausgangsporosität. Die Ausgangswerte für die Kluftporositäten werden gemäß der Laborbefunde vorgegeben.

Die FISH-Routine besteht aus fünf Programmteilen mit folgenden Aufgaben:

- Kluft.fkt: Definition der Klüfte mit den benötigten Variablen und Feldern. Eine gleichzeitige Matrixströmung ist ebenfalls berechenbar.
- 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

Am IfG Leipzig wurde das Programm anhand einfacher Verständnismodelle getestet und mit eigenen Laborversuchen verglichen. Die Resultate sind beispielhaft in der Veröffentlichung Konietzky, H.; Te Kamp, L.; Kamlot, P. (1999) aufgeführt.

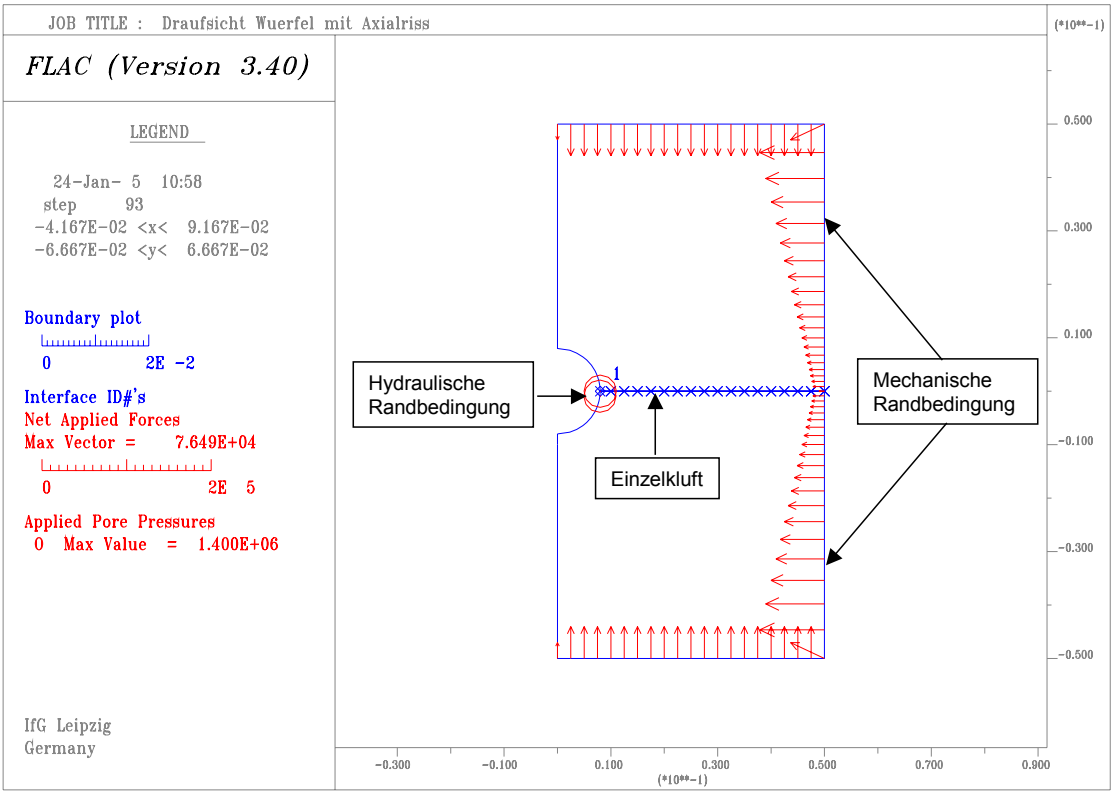

Abbildung 74 Rechenmodell für die Kluftströmungsrechnungen (Horizontalschnitt durch einen Anhydritwürfel

In Abbildung 74 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 bzw. die hydraulischen Druckrandbedingungen an der Kluft als Bohrlochinnendruck oder Injektionsrate.

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 %.

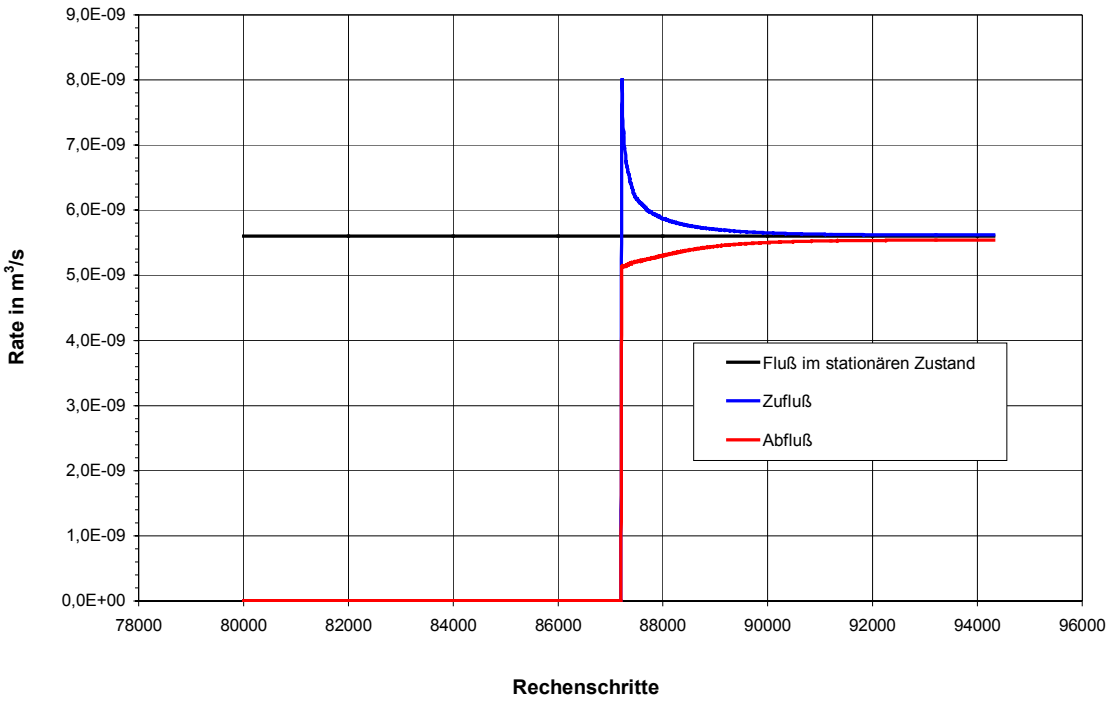

Abbildung 75 Volumenbilanzen der Zufluss- und Abflussrate bei einem Innendruck an der Kluft von 1,5 MPa

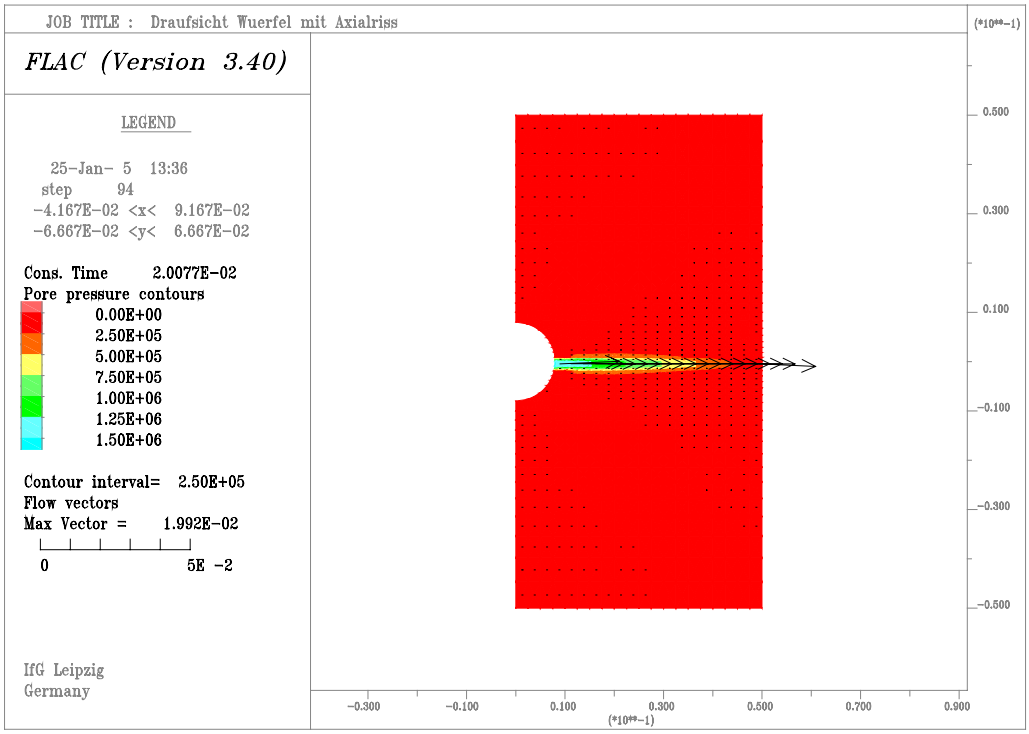

Abbildung 76 Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einem Innendruck an der Kluft von 1,5 MPa

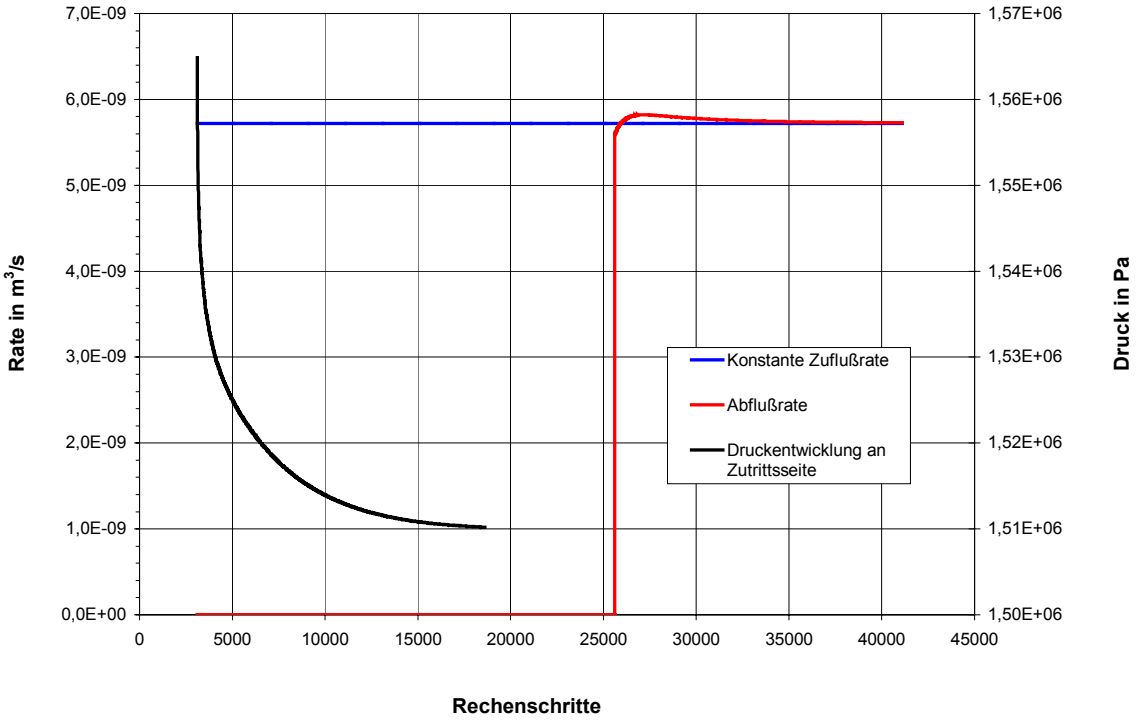

Abbildung 77 Volumenbilanzen bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}7 \cdot 10^{-9}$ m³/s

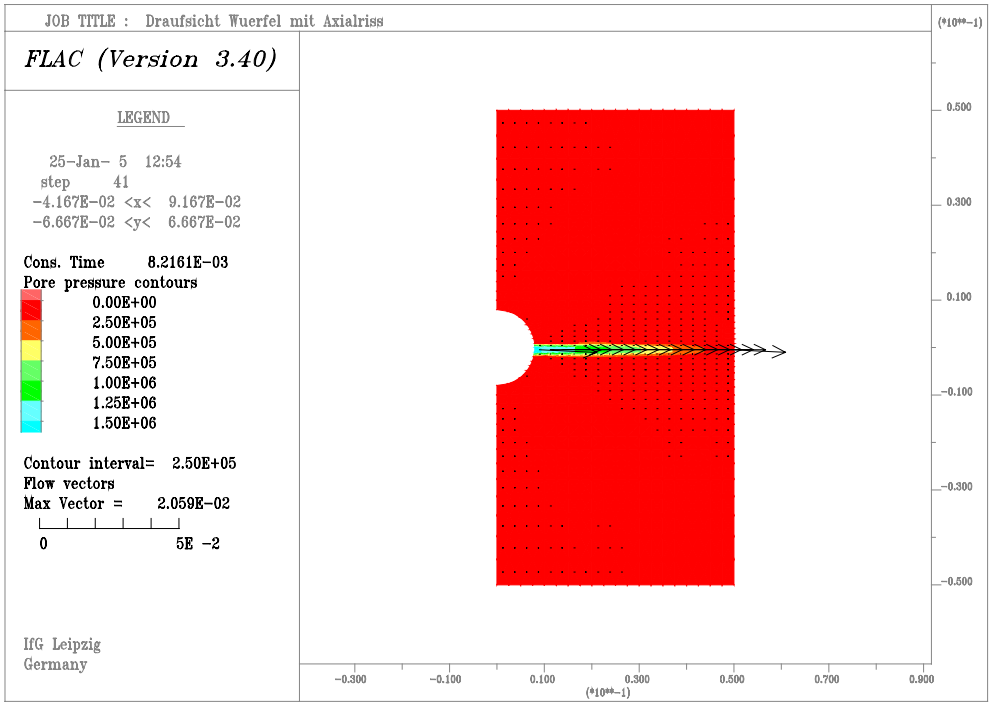

Abbildung 78 Stationäre Porendruckverteilung und Fließvektoren bei einer Zuflussrate an der Kluft von $5{,}7 \cdot 10^{-9}$ m³/s

In den Abbildungen 75 und 76 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 (16) bei einer Kluftbreite von 40 mm (senkrecht zur Modellebene) und einer Klufttiefe entlang L von 42 mm mit einem Wert von $5{,}6 \cdot 10^{-9}$ m³/s (0,48 l/d). An der Kluft wirkt ein konstanter Bohrlochinnendruck von 1,5 MPa. In der inversen Modellierung führt die nahezu gleiche Zutrittsrate an der Kluft von $5{,}7 \cdot 10^{-9}$ m³/s (0,49 l/d) im stationären Zustand zu einem Bohrlochinnendruck an der Kluft von 1,51 MPa (Abbildungen 77 und 78.

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 lassen sich jedoch auch die Interaktionen der Poreninnendrücke mit der Kluftöffnung abbilden. An der Eintrittsseite war die Kluftöffnung generell gegenüber dem Ausgangswert von 7 μm erweitert und an der Austrittsseite nahezu unverändert. Der Einfluss der Kluftsteifigkeit auf die Öffnungsweite wird im folgenden Kapitel untersucht.

10.4 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 (sekundäre Permeabilität) die primäre Leitfähigkeit des Gesteins um mehrere Größenordnungen übersteigt. Die Fluidzuführung kann dabei auf wenige singuläre Klüfte beschränkt sein.
Weiterhin wird geschlussfolgert, dass turbulente Strömungen bei den meisten hydrogeologischen Problemstellungen nicht signifikant sind, die Kluftrauhigkeit jedoch eine nicht parallele Strömung verursacht.
Die Rissöffnung bzw. Kluftdeformierbarkeit in Abhängigkeit von den wirkenden Spannungen (Gebirgsspannung normal zur Kluft und Fluidinnendruck) kann bei den

Kluftströmungsprozessen signifikant sein und sollte in mechanisch/hydraulisch gekoppelten Modellrechnungen simuliert werden können.
Diese Ausführungen stimmen mit den im Projekt BARIAN gewonnenen Resultaten der Labor- und In-situ-Versuche überein, bei denen ein deutlicher Unterschied in der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen den primär dichten Klüften im natürlichen Einspannungszustand im Gebirge und den geöffneten Klüften bzw. Hydrofracrissen nach einer Durchströmung gefunden wurde.

Zur Untersuchung des Einflusses der Normalspannung zur Kluft und in Weiterführung der Modellrechnungen aus dem letzten Kapitel wurde das in Abbildung 74 dargestellte Rechenmodell verwendet und ein in IfG (1999) beschriebener Versuch an einem Anhydritwürfel nachgerechnet. Im Druckintervall des Würfels wurde dazu nach dem Hydrofrac und der Rissbildung (siehe Abbildung 73) 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 79 dargestellt.

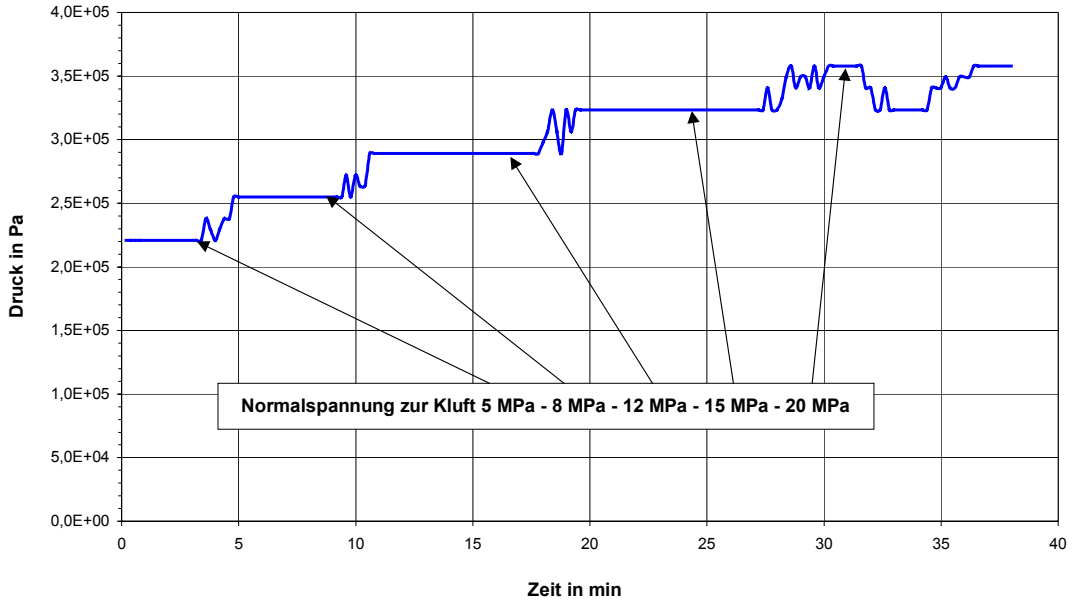

Abbildung 79 Abströmwiderstand in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung (Laborversuch)

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 (13), 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 gering und nur mit einer hohen Kluftsteifigkeit abzubilden. Die Normalsteifigkeit k_n wurde entsprechend FLAC (1998) mit der Beziehung (17) berechnet.

$$k_n = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \qquad (17)$$

$K = \text{Kompressionsmodul}$

$G = \text{Schermodul}$

$\Delta z_{min} = \text{minimale Elementbreite an der Kluft}$

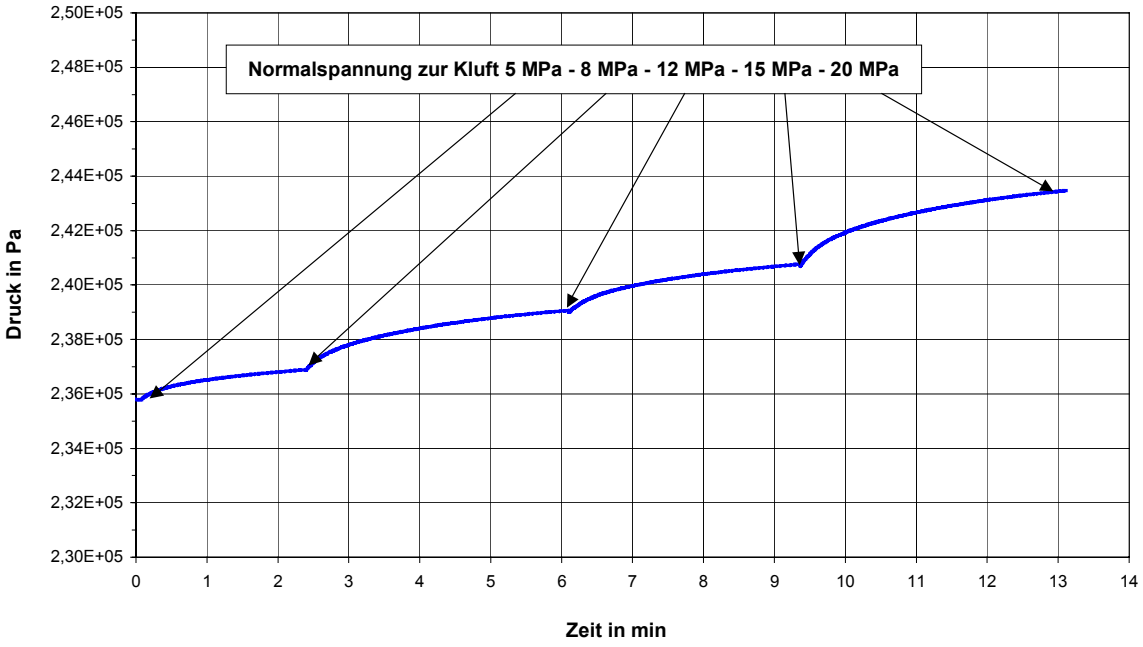

Abbildung 80 Berechnung des Abströmwiderstandes in einer Anhydritkluft bei konstanter Injektionsrate von 20 ml/h und steigender Normalspannung

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 Kluftsteifigkeit von $8 \cdot 10^7$ MPa/m. Mit diesem Betrag konnte die gemessene Erhöhung

näherungsweise nachvollzogen werden (siehe Abbildung 80). Bei kleineren Kluftsteifigkeiten 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.

11. Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse

Im vorliegenden Abschlußbericht des Vorhabens BARIAN II, welches unter dem Kennzeichen 02 E 9582 vom BMWA vom 01.03.2002 bis zum 30.06.2004 gefördert wurde, sollte zur Quantifizierung des "Anhydritszenarios" untersucht werden, welche gebirgsmechanischen Reaktionen (Spannungs- und Deformationsänderungen) und in der Folge welche Änderungen der hydraulischen Parameter sich im Hauptanhydrit in Abhängigkeit von der Näherung einer Abbaufront einstellen. 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. Der Anhydrit mit seinen Klüften in unterschiedlicher Ausbildung (Öffnungsweite, Erstreckung, Salzfüllung) muss als Schwachstelle in der geologischen Barriere angesehen werden, die vorrangig zu analysieren und zu bewerten ist.

Zur Untersuchung der Problematik wurde der von einer Strecke aufgeschlossene Hauptanhydrit hinsichtlich der Kluftausbildungen charakterisiert. Dafür standen die Kerne aus den Untersuchungsbohrungen zur Verfügung und wurden Bohrlochkamerabefahrungen durchgeführt. In einzelnen Messkampagnen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt erfolgten Spannungssondierungen mit unterschiedlichen Messverfahren und Permeabilitäts-messungen. Zur Unterstützung und Absicherung der Resultate wurden gleichartige Untersuchungen auch im unmittelbar zum Anhydrit benachbarten Steinsalz durchgeführt. In der Steinsalzstrecke erfolgten darüber hinaus im gesamten Projektzeitraum Konvergenzmessungen.

Die Zielstellung der begleitenden Modellrechnungen bestand in der Berechnung der Strömungsprozesse durch die Gesteinsmatrix und durch singuläre Klüfte. Die dabei ermittelten hydraulischen Drücke und Fließraten wurden mit den Messwerten verglichen.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte mittels der Streckenkonvergenzmessungen im Steinsalz 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.

Für die Spannungssondierungen im Steinsalz und Anhydrit wurden neuartige Mess- und Auswerteverfahren getestet. Dies betrifft insbesondere die Bestimmung eines konstanten Strömungswiderstandes im gefracten Steinsalzbereich bzw. in Riss- und Kluftzonen im Anhydrit bei konstanter Verpressrate der verwendeten Hochdrucklaborpumpe als Kennwert für die minimale Hauptspannung.
Die Identifizierung von σ_{min} über den Abströmwiderstand war nur beim Steinsalz und im ungeklüfteten Anhydrit nach der Hydrofrac-Risserzeugung erfolgreich. Vor den Hydrofrac-Versuchen existierte eine primäre Dichtheit. Die nach der Einstellung des Druckgleichgewichtes zur minimalen Gebirgsspannung auftretenden Fluidpermeationen lassen sich mit einer geringen Nachverpressung kompensieren, wobei die Einstellung dieses Druckwertes von der Verpressrate beim Steinsalz kaum und im Anhydrit stärker beeinflusst wird. Dieser Unterschied wird beim Steinsalz auf den großen Permeationsbereich entlang des gesamten Druckintervalls im Vergleich zum begrenzten Permeationsbereich in einem singulären Anhydritriss zurückgeführt.
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. Aus diesem Kennwert lässt sich entsprechend des kubischen Fließgesetzes für stationäre Verhältnisse die hydraulisch aktive Kluftöffnungsweite berechnen, die aufgrund der natürlichen Bedingungen in den Anhydritklüften mit unterschiedlichen Öffnungsweiten, Durchtrennungsgraden, Mineralfüllungen und Rauhigkeiten jedoch nur in der Größenordnung gesichert ist.

In den Wiederholungsmessungen in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt konnten weder bzgl. der minimalen Druckeinspannung im homogenen Gestein noch bzgl. der Abströmwiderstände in den Klüften signifikante Änderungen der Beträge zugeordnet werden. Wie schon die Modellrechnungen im Projekt BARIAN vermuten ließen, waren die verfahrensspezifischen Messwertstreuungen von etwa 10 % höher als die hervorgerufenen Spannungsänderungen bzw. Einwirkungen auf die Kluftöffnungsweiten.
Die Änderung der Richtung der beim Hydrofrac bestimmten minimalen Gebirgsspannung wurde im Steinsalz in 5 Messkampagnen vom März 2000 bis zum Februar 2004 verfolgt. Es war eine mittlere Tendenz zu kleineren Azimuten von etwa 52° auf etwa 34°, also eine Drehung der Minimalspannungsrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn nach Norden, festzustellen. Die Einfallwinkel in einer Stoßteufe > 4 m lagen zwischen 30° und 45°. Diese Spannungsrichtung wird offensichtlich vorwiegend von der Hohlraumwirkung der Zufahrtstrecken verursacht. Die Abbaueinwirkung war marginal.
Da sich bei wiederholten Hydrofracmessungen im Anhydrit die Flüssigkeit eher in den vorhandenen Rissen und Klüften ausbreitet, als das eine Rissneubildung entsteht, wurde hier auf eine wiederholte SE-Ortung mit dem Abbaufortschritt verzichtet. Im Bereich der sekundären Spannungsfelder um die untertägigen Strecken und Abbaukammern ist im allgemeinen nicht davon auszugehen, dass die geogen angelegten natürlichen Klüfte nach dem sekundären Spannungsfeld der Hohlräume ausgerichtet sind.

Die Schallemissionsmessungen im Steinsalz und Anhydrit zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der Ortungsverteilung um die Injektionsbohrung. Bei den Frac-Versuchen im Steinsalz sind die Ortungen auf deutlichen Flächen auszumachen. Die Flächen werden im allgemeinen so scharf abgebildet, dass der Rissnormalenvektor und damit die Orientierung der minimalen Hauptspannung eindeutig bestimmt werden kann. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich im Anhydrit nur bei den Frac-Versuchen in der vertikalen Bohrung F3 im Projekt BARIAN. Jedoch sind im Anhydrit die Rissflächen durch wesentlich weniger Ortungen belegt und besitzen deutlich geringere Ausdehnungen. Bei allen Versuchen mit eindeutigen Rissflächen entsteht der Riss am Injektionsintervall und breitet 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 sind.
In den horizontalen Bohrungen im Anhydrit deuten dagegen die Beobachtungen darauf hin, dass die Ereignisse nicht auf die Bildung neuer makroskopischer Risse im Anhydrit zurückzuführen sind, sondern eher auf ein Aufreißen von Materialbrücken in schon

vorhandenen Hydrofrac-Rissen und 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 Ergebnisse der Langzeitversuche über mehrere Tage zeigen, dass es mittels der SE-Ortungen gelungen ist, die Ausbreitung der Flüssigkeitsfront entlang vorhandener Risse und Klüfte im Anhydrit bzw. die Ausdehnung des Permeationsbereiches um die Injektionsstelle zu verfolgen. Zur Erhöhung der Ortungsausbeute wurde während der langsamen Verpressung in periodischen Abständen die Injektionsrate stoßartig erhöht.
Die SE-Ortungen während der Langzeitversuche lagen zumeist in Schwerpunkten weit außerhalb der Injektionsstelle. Diesen Schwerpunkten sind entsprechend der Kernbemusterung natürliche Klüfte zuzuordnen. Die Flüssigkeit muss demnach von der Injektionsstelle aus durch das undichte Gestein zu der Kluft penetriert sein. Der wirkende Bohrlochinnendruck zeigt, dass die Klüfte noch eine gewisse „Restdichtigkeit“ aufweisen. Die in diesen Fällen beobachtete „wolkenartige“ Verteilung der Ortungen ist auf Verästelungen der Klüfte zurückzuführen.

Der Vergleich der mittels Bohrlochschlitzen ermittelten Hauptspannungen zeigt hinsichtlich der Beträge und Richtungen nur geringe Unterschiede. Lediglich im Bohrloch F3 wurden gegenüber Januar 2001 erhöhte Gebirgsspannungen registriert. Bezogen auf den dreidimensionalen Gebirgsspannungstensor ergibt sich daraus eine erhöhte Spannungsanisotropie, bedingt durch ein erhöhtes σ_1 bei praktisch gleichbleibendem σ_3. Die Beobachtungen beim Schlitzen im Bohrloch F3 deuteten darauf hin, dass sich die sekundären Spannungen an der Bohrlochwandung nahe an der Bruchfestigkeit des Anhydrits befanden oder diese sogar lokal überschritten haben („spalling“). Die Orientierung der Hauptnormalspannungen blieb nahezu unverändert.

Die Permeabilitätsmessungen fanden neben begleitenden Messungen im Steinsalz im Anhydrit in einem ungeklüfteten Bereich, in einer carnallitgefüllten Kluft und in Zonen bitumengefüllter Suturen statt. Zur Auswertung erfolgte eine Kurvenanpassung $p_{fit} = f(t)$ an die gemessenen Druckabfallkurven und danach die Ableitung $\dot{p}_{fit}(t)$ dieser Funktion. Die gesuchte Permeabilität K und Porosität ϕ lassen sich in einem numerischen Suchverfahren beim Kurvenfit einer Funktion $\dot{p}_{Darcy}(t)$ an die Funktion $\dot{p}_{fit}(t)$ finden. Entsprechend der

Modellvorstellung findet ein instationärer Fluss in den zusammenhängenden Porenraum um das Bohrloch entlang der gesamten Höhe des druckbeaufschlagten Bohrlochintervalls statt. Ein Umströmen der Packer wird dabei ausgeschlossen. Als wesentlicher Parameter für die Auswertung muss die Kompressibilität des druckbeaufschlagten Systems bekannt sein.

Die Auswertungen der Druckabfallkurven im Steinsalz führen zu Permeabilitäten ≤ 10^{-20} m², die in der Literatur üblicherweise als „dicht“ bezeichnet werden. Eine systematische Erhöhung der Permeabilität mit dem Abbaufortschritt ist nicht abzuleiten.

Die Größenordnung der Permeabilitäten im kompakten und ungeklüfteten Anhydrit von minimal $1 \cdot 10^{-22}$ m² bis maximal $1 \cdot 10^{-20}$ m² ist mit den Wiederholungsmessungen im Steinsalz vergleichbar und repräsentiert gleichfalls einen dichten Gebirgsabschnitt. Da im sondierten Bohrlochabschnitt nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob ein Abströmen nicht auch über eine geschlossene Kluft stattfand, wurde bei der Permeabilitätsermittlung in einem separaten Schritt auch eine Höhe des Abströmintervalls von 7 μm betrachtet. Diese hydraulisch wirksame Kluftöffnung von 7 μm kann mit unterschiedlichen Verfahren (Vermessung der Hydrofrac-Rissöffnung in Laborproben, Rissöffnungsmessungen während eines Hydrofracs in situ, Anwendung des kubischen Fließgesetzes auf stationäre Strömungsvorgänge in gefracten Laborproben und natürlichen Klüften in situ) belastbar begründet werden. Bei Voraussetzung der Permeation ausschließlich über eine diskrete Kluft mit einer hydraulischen Öffnungsweite von 7 μm ergibt sich eine signifikant höhere Permeabilität von $9 \cdot 10^{-16}$ m² mit einer Porosität von 100 % im Vergleich zu $6 \cdot 10^{-22}$ m² mit einer Porosität von 6 ‰ bei einer Permeation über die Druckintervallhöhe von 0,5 m und Verwendung der gleichen Druckkurve.

In einer carnallitgefüllten Kluft konnten in einem Messzeitraum von 2,5 Jahren mittlere Gebirgspermeabilitäten von $1 \cdot 10^{-22}$ m² bis $1 \cdot 10^{-19}$ m² bei Porositäten von 1 bis 7 ‰ bzw. Permeabilitäten in der diskreten Kluft mit einer Öffnungsweite von 1 mm von $4 \cdot 10^{-19}$ m² bis $2 \cdot 10^{-17}$ m² bei Porositäten von 9 bis 15 % ermittelt werden.

In einem Bohrlochbereich mit bitumengefüllten Suturen erhöhte sich im Messzeitraum von 2,5 Jahren die Gebirgspermeabilität (Permeation entlang der gesamten Druckintervallhöhe) um etwa eine Größenordnung von $8 \cdot 10^{-23}$ m² auf $4 \cdot 10^{-22}$ m² bei Porositäten von 2 bis 5 ‰ bzw. bei einem ausschließlichen Bezug auf die hydraulische Öffnung der Drucksuturen von etwa 1 mm ergaben sich nahezu konstante Permeabilitäten von $3 \cdot 10^{-19}$ m² bis $6 \cdot 10^{-19}$ m² bei Porositäten von 8 bis 15 %. Der Untersuchungsbereich zeigte sich als sehr dicht und die ursprünglich vermutete erhöhte Durchlässigkeit konnte nicht bestätigt werden.

Für alle Permeabilitätsmessungen im untersuchten Anhydrit muss zusammenfassend die Schlussfolgerung gezogen werden, dass keine belastbare Veränderung der Permeabilitäten in Abhängigkeit vom Abbaufortschritt zu erkennen ist.
Die durchgeführten Fallstudien zu den hydraulisch aktiven Höhen der Permeationszonen weisen auf die Notwendigkeit zusätzlicher Befunde, z.B. mittels der Schallemissionsmessungen oder auf der Basis von Bohrlochinspektionen, hin.

Mit mechanisch/hydraulisch gekoppelten Modellrechnungen wurde zunächst untersucht, ob die beim Druckabfall in der Shut-in-Phase nach dem Druckstoßtest im Bohrloch vorausgesetzte Permeation in den effektiven Porenraum entlang des Druckintervalls nachvollzogen werden kann. Mit programmierten Subroutinen zur Berechnung der in die Porenräume der Gesteinsmatrix eintretenden Fluidvolumen in der Zeitdauer des Druckabfalls konnten die mittels der Systemkompressibilität bilanzierten Permeationsvolumen bestätigt werden. Damit ist die Anwendbarkeit dieser neuartigen Methode zur Permeabilitäts- und Porositätsbestimmung aus instationären Druckverläufen belegt.
Mit weiteren gekoppelten Modellrechnungen wurden die in Laborversuchen erreichten stationären Strömungsverhältnisse in Steinsalz- und Anhydritwürfeln nach der Hydrofracrissbildung simuliert. Der Gleichgewichtzustand Zufluss = Abfluss konnte im Steinsalz, wie beobachtet, nach 25 bis 30 s berechnet werden. Als hydraulische Randbedingung an der Bohrlochkontur sind dabei Innendrücke oder Volumenraten verwendbar. Für die Modellierung der Strömungsprozesse in den singulären Anhydritklüften wurde ein speziell für das Anhydritprojekt entwickeltes FLAC-Programm verwendet. Auch damit war es möglich, die stationären Strömungsverhältnisse in den Anhydritklüften bei an der Kluft wirkenden Innendrücken oder Injektionsraten nachzuvollziehen. Es zeigte sich, dass eine Erhöhung der Normalspannung zur Kluft von 5 MPa auf den vierfachen Betrag nur eine Verringerung der Kluftöffnung von 13 μm auf 11 μm bewirkte. Damit ist nachvollziehbar, dass die in situ durch den Steinsalzabbau verursachten wesentlich geringeren Spannungserhöhungen um 30 % keine messtechnisch nachweisbaren Änderungen der Kluftpermeabilitäten bewirken konnten.
Mit dem validierten Rechenprogramm liegt ein Werkzeug vor, mit dem die für die Kluftströmungen signifikanten Kluftöffnungsweiten in Abhängigkeit von den wirkenden Flüssigkeitsinnendrücken und Gebirgsspannungen berechnet werden können. Die Kluftsteifigkeiten im Anhydrit sind so hoch, dass keine Veränderung der primär vorhandenen Kluftöffnungen durch die Abbauannäherung zu erwarten war.

12. Schlussfolgerungen für das Anhydritszenario

Zusammenfassend kann aus den vorgelegten Untersuchungsergebnissen zur Barrierewirkung des Hauptanhydrits die Schlussfolgerung gezogen werden, dass auch in den potentiellen hydraulischen Schwachstellen der geologischen Barriere (geschlossene und mit Sekundärkristallisationen gefüllte Klüfte, bitumengefüllte Drucksuturen) eine primäre Dichtheit, vergleichbar zum ungeklüfteten Anhydrit und zum Steinsalz, nachweisbar war. Auch die in Folge des Gewinnungsbergbaus verursachten langsamen Spannungsänderungen bewirkten keine Änderung dieser primären Dichtheit (schnell ablaufende dynamische Vorgänge wurden nicht betrachtet).
Die hydraulische Leitfähigkeit von natürlichen Klüften und mittels Hydrofrac erzeugten Rissen unter einer permanenten Druckbeaufschlagung ist wesentlich größer und lässt sich mit dem kubischen Fließgesetz beschreiben, wobei die Kluftrauhigkeit, unterschiedliche Kluftöffnungen und der nicht vollständige Durchtrennungsgrad Abweichungen vom Fließgesetz verursachen und nur eine größenordnungsmäßige Prognose zulassen.
Einen entscheidenden Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit besitzt in beiden Fällen die Einspannung des Anhydrits. So ist grundsätzlich in Richtung der bergmännischen Hohlräume ein hydraulischer Gradient für Strömungsprozesse gegeben.

Da in einem Endlager nicht auszuschließen ist, dass infolge der Entspannung in der Nähe von bergmännischen Auffahrungen die Klüfte geöffnet werden und eine ursprünglich vorhandene Dichtheit verloren geht, könnten in der Folge im Salzgebirge eingeschlossene salinare Lösungen in Richtung der Hohlräume zutreten. Mit einer geologischen und geophysikalischen Vorerkundung sollte deshalb ein Aufschluss der Anhydritschichten vermieden werden, d.h. der natürliche Gebirgseinspannungszustand erhalten bleiben. Wenn das nicht gelingt, steht aber nicht die generelle Barrierenwirksamkeit in Frage. Mit Zutritten hochmineralisierter Lösungen ist beim Steinsalzbergbau immer zu rechnen und in den meisten Fällen sind die Zutritte auf Grund ihrer geringen Mengen für den Betriebsablauf unproblematisch. Eine Entstehung von Wegsamkeiten bis zur Biosphäre und der Zufluss von Wässern ist bei dem im Vergleich zum Gewinnungsbergbau in einem Endlager geringen Auffahrungsgrad unwahrscheinlich, muss aber standortbezogen untersucht werden.
Die Wegsamkeiten im Anhydrit sind in einem solchen Fall auf singuläre Klüfte bzw. Kluftscharen begrenzt und in der Betriebsphase kann mit technischen Maßnahmen der Separierung und Abdämmung die hydraulische Verbindung zu den Abfällen begrenzt werden.

Auch bei einem theoretischen Kontakt von salinaren Lösungen mit den Abfällen in der Nachbetriebsphase ist im dann vollständig versetzten Bergwerk die Hohlraumkonvergenz so gering, dass eine Verpressung von kontaminierte Lösungsmengen in die Biosphäre, die das Schutzziel überschreiten könnten, als gleichfalls unwahrscheinlich prognostiziert wird. Die Schutzzieleinhaltung ist mit gebirgsmechanischen Berechnungen des Konvergenzprozesses in der Nachbetriebsphase unter Berücksichtigung von Rückhalte- und Verdünnungseffekten für die Nuklide zu belegen.

Im übrigen stellt die Ausbildung von singulären Transportwegen im Anhydrit ein hypothetisches Szenario unter ungünstigen Umständen dar, während bei den Endlagerkonzepten im Tonstein oder im kristallinen Gebirge solche Transportwege zum Normalfall gehören. Das Anhydritszenario bei der Endlagerung im Salzgestein sollte deshalb auch im Vergleich mit den anderen europäischen Endlagerkonzepten relativiert und nicht a priori vorausgesetzt werden. Es ist zu prüfen, ob die Bedingungen am konkreten Standort mit seinen spezifischen Randbedingungen und Einwirkungen überhaupt gegeben sind. Die vorliegenden Resultate liefern einen Beitrag zu den notwendigen Verfahren und Kriterien.

Literaturverzeichnis

IfG (1999): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON),
BMBF-Abschlußbericht 02 E 8755, August 1999

IfG (2002): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN),
BMWi-Abschlußbericht 02 E 9158, August 2002

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

IfG (1995): Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton (ANTON),
BMBF-Abschlußbericht 02 E 8241 in 3 Bänden, August 1995

Q+S Consult (2003): Spannungsmessungen mit der Bohrlochschlitzsonde im Steinsalzwerk Bernburg - Folgemessung Dezember 2002, Messbericht 0013 vom Februar 2003

Thüringer, Ch. (2002): Untersuchungen zum Gastransport im ungesättigten, geklüftet-porösen Festgestein, Universität Karlsruhe, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften, Dissertation 06.02.2002

FLAC (1998): Version 3.4, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota

Te Kamp, L.; Konietzky, H. (1996): Modellierung der Kluftwasserströmung im Programmsystem Flac, Bericht an das IfG Leipzig, Gelsenkirchen, Juni 1996

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

Bawden, W. F.; et al: 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