



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

**Untersuchung der  
Barrierewirksamkeit  
des Gesteinsverbandes  
Steinsalz/Anhydrit/  
Salzton (BARITON)**



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

**Untersuchung der  
Barrierewirksamkeit  
des Gesteinsverbandes  
Steinsalz/Anhydrit/  
Salzton (BARITON)**

Abschlußbericht

Dieter Flach  
Rüdiger Miehle  
Klaus Wieczorek  
Ulrich Zimmer

Januar 2000

**Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02E 8765 gefördert.

Die Arbeit wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

**GRS - 160  
ISBN 3-931995-25-9**

**Deskriptoren:**

Felsformation, Hydraulik, Mechanik, Programmierung, Salz, Schallüberwachung, Seismik

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchung von natürlichen Kluft- und Schwächezonen im Grenzbereich Hauptanhydrit/Steinsalz mit weiterentwickelten geophysikalischen Erkundungsmethoden</b> .....	<b>7</b>
2.1	Schallemissionsmessungen im nahen Umfeld der Versuchskammer (25 kHz) .....	7
2.1.1	Installation des Stationsnetzwerkes .....	7
2.1.2	Bestimmung der Einsatzzeiten mit Hilfe neuronaler Netze (Ereignisortung).....	8
2.1.3	Messungen und Ergebnisse.....	10
2.1.4	Auswertung und Interpretation der Schallemissionsmessungen .....	13
2.2	Schallemissionsmessungen an der Oberfläche der Versuchskammer (100 kHz) .....	15
2.2.1	Installation der Meßstationen .....	15
2.2.2	Messungen und Ergebnisse.....	16
2.2.3	Auswertung und Interpretation .....	18
2.3	Geoelektrische Messungen.....	19
2.3.1	Geoelektrische Sondierung.....	19
2.3.2	Inversion der Meßdaten .....	20
2.3.3	Geoelektrisches Profil in der Meßkammer .....	21
2.3.4	In-situ-Wiederholungsmessungen.....	22
2.3.5	Kalibriermessungen im Labor .....	24
<b>3</b>	<b>Mechanische Eigenschaften des Anhydrits</b> .....	<b>26</b>
3.1	Bereitstellung von Algorithmen zur seismischen 3D-Erkundung .....	26
3.1.1	Weiterentwicklung vorhandener Auswerteprogramme .....	26
3.1.2	Seismische Tomographie.....	27
3.2	Ultraschallmessungen.....	34

3.3	Ultraschallmessungen an Anhydrit-Probekörpern unter Belastung .....	39
3.3.1	Temperatureinfluß auf die Ultraschallgeschwindigkeiten.....	39
3.3.2	Einfluß mechanischer Belastung auf die Ultraschallgeschwindigkeiten.....	40
3.4	Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem E-Modul.....	41
3.4.1	Bestimmung der Elastizitätsmoduli .....	41
3.4.2	Ergebnisse zum statischen E-Modul.....	43
3.4.3	Ergebnisse zum dynamischen Elastizitätsmodul.....	55
<b>4</b>	<b>Hydraulische Eigenschaften des Anhydrits unter Belastung.....</b>	<b>56</b>
4.1	Gas-Permeabilitätsmessungen an Anhydrit-Probekörpern.....	56
4.1.1	Abhängigkeit der Permeabilität von thermischer Belastung .....	58
4.1.2	Abhängigkeit der Permeabilität von mechanischer Belastung.....	59
4.1.3	Bestimmung der Permeabilität unter In-situ-Spannungsbedingungen.....	63
4.2	In-situ-Permeabilitätsmessungen mit Gas und Flüssigkeit .....	65
4.2.1	Versuchsort .....	68
4.2.2	Gasinjektionstests.....	69
4.2.3	Flüssigkeitsinjektionstests.....	72
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlußfolgerungen.....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>78</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>79</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>83</b>

## Kurzfassung

Nachdem in dem vorangegangenen FuE-Projekt ANTON (BMBF-FKZ 02 E 8765 0) im wesentlichen die geologische Ausbildung des zur Salinarabfolge gehörenden Hauptanhydrits und Grauen Salztons, die gesteinsmechanischen Eigenschaften sowie die bei der Freilegung eintretenden Hohlraumkonvergenzen und Spannungsumlagerungen ermittelt wurden, bestand der Schwerpunkt des hier dargestellten FuE-Vorhabens BARITON in der Schaffung eines standortunabhängigen Instrumentariums zur Untersuchung und Bewertung der Barrierewirksamkeit der Anhydrit- und Salztenschichten.

Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf das gesteinsmechanische Verhalten der Klüfte im Anhydrit als „Schwachstelle“ im Gebirge gerichtet. Über eine mechanische Bewertung hinausgehend sollten auch Methoden und Kriterien für die Beurteilung mechanisch-hydraulisch gekoppelter Prozesse entwickelt werden. Für die gebirgsmechanischen Untersuchungen der natürlichen Kluft- und Schwächezonen im Grenzbereich Hauptanhydrit/Steinsalz wurden weiterentwickelte geophysikalische Erkundungsmethoden angewandt, die von einem Laborprogramm begleitet wurden, in dem das mechanische und hydraulische Verhalten von Anhydrit aufgrund von Mikrorißbildung untersucht wurde.

Während der seismischen Überwachung (Frequenzbereich bis 25 kHz) einer potentiellen Schwächezone im Übergangsbereich von Steinsalz zu Anhydrit im Nahbereich der Versuchskammer verringerten sich die Schallemissionen, nachdem die in der Nähe befindlichen Abbaugelände in entferntere Grubenbereiche verlagert worden waren. Die Schallemissionen kamen nach Einstellung dieser Aktivitäten fast vollständig zum Erliegen. Demnach dürfte es sich um eine induzierte Seismizität aufgrund bergbaulicher Tätigkeit in der Nähe des Untersuchungsgebietes gehandelt haben. Dieses Ergebnis läßt den Schluß zu, daß sich die Barrierewirksamkeit der untersuchten Schwächezone nicht weiter ändern oder gar verschlechtern wird, nachdem die Schallemissionsaktivität drastisch zurückgegangen war und es keine Hinweise auf die Entstehung neuer Mikrorisse gegeben hatte.

Die seismischen Messungen bis 100 kHz in der Auflockerungszone, einer weiteren Schwächezone, bestätigen, daß diese Zone 3 Jahre nach der Erstellung des Versuchsfeldes nur noch geringfügig aktiv war (gleichbleibend 3 - 4 Ereignisse pro Tag) und bis in eine Tiefe von 1 - 2 m reichte. Dieses Ergebnis korreliert gut mit dem Ergebnis der geoelektrischen Messungen. Eine Bestätigung, daß die Auflockerung nicht kontinuierlich fortschreitet, liefern

auch die Dauerstandsversuche. Die 6-monatige Dauerbelastung bei 20 MPa verursachte im Anhydrit keine signifikante Mikrorißbildung, wodurch die Permeabilität hätte deutlich ansteigen und die Bruchfestigkeit abnehmen können.

Die sich ergebende Aktivität schwankt um einen Mittelwert von ca. 6 - 7 Ereignissen/7h. Es gibt jedoch auch Tage mit 15 Ereignissen/7h bzw. nur 1 Ereignis/7h. Eine Korrelation mit bergbaulicher Tätigkeit ist nicht zu erkennen. Es ist auffällig, daß nach Tagen mit erhöhten Aktivitäten meistens Tage mit besonders niedriger Aktivität folgen. Durch die Bildung von Mikrorissen werden lokale Spannungsunterschiede im Gestein abgebaut. Je mehr Risse auftreten, desto größer ist die abgebaute Spannungsdifferenz. Nimmt man an, daß sich diese Spannungsunterschiede kontinuierlich aufbauen, so ist einsichtig, daß nach Perioden besonders hoher Aktivität eine längere Zeit zum erneuten Aufbau von genügend hohen Spannungsdifferenzen verstreichen muß, als in Zeiten durchschnittlicher Aktivität. Nicht geklärt ist dadurch allerdings die Frage, warum die Schallemissionsaktivität überhaupt an manchen Tagen deutlich erhöht ist.

Das Ziel der geoelektrischen Messungen war erstens die Bestimmung eines für intakten Anhydrit charakteristischen In-situ-Widerstandswertes sowie zweitens die Abgrenzung der geoelektrisch wirksamen Auflockerungszone und die Quantifizierung der Wassergehalte in den verschiedenen Gebirgsbereichen. Um die Entwicklung der Auflockerungszone in der Versuchskammer, die im Anhydrit aufgefahren wurde, zu untersuchen, wurden drei geoelektrische Messungen in zeitlichen Abständen durchgeführt. Zwischen der ersten und zweiten Messung änderte sich die Widerstandsverteilung nur leicht, während zwischen der zweiten und dritten Messung keine Veränderung festzustellen war. Die Ergebnisse im elastischen Anhydrit zeigen, daß die Auflockerungszone bis in eine Tiefe von 1 - 2 m reicht und sich nach einer relativ kurzen Zeit nicht mehr signifikant ändert.

Für die Auswertung der passiven und aktiven seismischen Signale nach seismologischen bzw. tomographischen Auswerteverfahren war geplant, die entsprechenden Auswerteprogramme basierend auf vorhandenen Programmen weiter zu entwickeln oder, wenn das nicht möglich war, neu zu entwickeln.

Die Neuentwicklung bezog sich auf die Programmierung tomographischer Auswerteverfahren. Es wurden mehrere 2D-Algorithmen zur Anwendung der aktiven seismischen Laufzeittomographie programmiert und getestet. Dreidimensionale Abschätzungen sind durch die Montage mehrerer zweidimensionaler Schnitte möglich.

Die Weiterentwicklung bestehender Programme bezog sich hauptsächlich auf die Verbesserung der Auswertesoftware zur Analyse der Schallemissionen. Angestrebt wurde ein automatisches Auswertesystem, welches die Bestimmung der Einsatzzeiten sowie der Herdparameter automatisch durchführte. Wesentlicher Bestandteil eines solchen Auswertesystems ist die automatische Bestimmung der Einsatzzeiten. Die in Bernburg registrierten Ereignisse wiesen allerdings in der Regel ein so geringes Signal-/ Noise-Verhältnis auf, daß auch durch die Anwendung neuronaler Netze keine automatische Ereignisortung vorgenommen werden konnte.

Diese Arbeiten wurden aus Effektivitätsgründen übrigens nicht weiter verfolgt, da in Zukunft das Programmpaket HYPERION der Fa. ESG zur Verfügung steht, das bereits käuflich erworben wurde. Mit diesem Programm ist sowohl die Visualisierung als auch die vollständige Auswertung seismischer Signale nach seismologischen Auswerteverfahren möglich.

Das im Labor durchgeführte Versuchsprogramm diente vor allem dazu, die Kenntnisse über das mechanische und hydraulische Verhalten von Anhydrit unter mechanischer und thermischer Belastung zu erweitern.

An zylindrischen Proben wurden durch Vermessen und Wiegen Gesamtdichten zwischen  $2752 \text{ kg/m}^3$  und  $2939 \text{ kg/m}^3$  bestimmt. Zur Ermittlung der Longitudinalgeschwindigkeiten zwischen  $5520 \text{ m/s}$  und  $6018 \text{ m/s}$  wurden die Proben in radialer Richtung in 1-Grad-Schritten an 4 Ebenen durchschallt. Die Gaspermeabilität konnte mit Stickstoff bei einem hydrostatischen Spannungszustand von  $5 \text{ MPa}$  bestimmt werden. Der maximale Einpreßdruck betrug  $2 \text{ MPa}$ . Die Permeabilität schwankte zwischen  $1.1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  und  $1.6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ .

Die Untersuchungen zum Einfluß einer thermischen Beanspruchung von Anhydritproben auf die Durchlässigkeit zeigten eine deutliche Permeabilitätserhöhung, was mit einer thermisch induzierten Mikrorißbildung mit Bildung bevorzugter Fließwege in Fließrichtung erklärt werden kann. Bei einer zweiten Probe war keine Permeabilitätserhöhung feststellbar. Da aber auch hier eine Verringerung der Schallgeschwindigkeiten bei Durchschallungsversuchen zu verzeichnen war, was auf eine Schädigung der mechanischen Integrität hinweist, besteht die Möglichkeit, daß eine thermisch induzierte Mikrorißbildung vorzugsweise nicht zu Fließwegen in Durchflußrichtung geführt hat.



Die Untersuchungen zur Abhängigkeit vom Differenzdruck ergaben, daß mit zunehmender Druckdifferenz zwischen Einspann- und Injektionsdruck die Permeabilität abnahm, was auf ein Schließen von Fließwegen aufgrund der Druckdifferenz hinweist. Bei konstantem Differenzdruck von 1 MPa wurde eine Messung zur Korrektur des Gleitströmungseffektes nach Klinkenberg vorgenommen. Die so korrigierte Permeabilität betrug  $7.4 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ .

Weitere wichtige Ergebnisse der Labormessungen sind: Die P-Wellengeschwindigkeiten zeigen richtungs- und ortsabhängige Anisotropie-Effekte. Bei kurzzeitiger einaxialer Belastung bis 70 MPa nahmen die P-Wellengeschwindigkeiten ab. Eine Zunahme der Permeabilitäten fand nur teilweise statt. Eine 6-monatige Dauerbelastung von 2 Anhydritproben ergab eine deutliche Permeabilitätssteigerung von 3 Größenordnungen. Die Schallgeschwindigkeiten haben in beiden Fällen ebenfalls zugenommen.

Der Mittelwert der mit Stickstoff ermittelten Permeabilitäten lag für die Bernburger Anhydritproben bei  $2.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  und für die Pöthener Anhydritproben bei  $4.6 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ . Da auch die einzelnen Meßwerte für den Pöthener Anhydrit generell niedriger lagen, kann dies als Bestätigung für eine Tiefenabhängigkeit der Permeabilität angesehen werden.

Der allgemein zu beobachtende Trend, daß bei zunehmender Belastung der statische E-Modul abnimmt (bis 7 %), konnte nicht bei allen Proben beobachtet werden. Nicht eindeutige Versuchsbedingungen könnten hierfür ein Grund sein. Der dynamische E-Modul liegt um etwa 10 % höher als der statische. Eine leichte Abnahme des dynamischen E-Moduls ist erst dann zu verzeichnen, wenn die Belastung, bei der zusätzliche Mikrorisse entstehen, überschritten wird. Sie betrug bei den untersuchten Proben ca. 44 MPa.

Ferner wurden Gasinjektionstests zur Bestimmung der Permeabilität des Steinsalzes, des Anhydrits, des Übergangsbereiches zwischen Steinsalz und Anhydrit und einer gefüllten Kluft durchgeführt. Bei sämtlichen In-situ-Permeabilitätsmessungen wurden während der Einschlußphase Druckabfälle registriert, die im Bereich der Undichtheit der Apparatur lagen. Eine Messung, bei der während der Injektionsphase kein Druckaufbau möglich war, was zunächst einer hohen Durchlässigkeit der schwarzen Tonlage im Übergangsbereich zwischen Salz und Anhydrit zugeschrieben wurde, stellte sich bei einer Wiederholungsmessung als Fehlmessung heraus. Bei sämtlichen Messungen wurde die Permeabilität für Gas mit  $< 10^{-21} \text{ m}^2$  abgeschätzt. Wie bei den Gaspermeabilitätsmessungen wurden bei den Permeabilitätsmessungen mit Lauge die Permeabilitäten mit  $< 10^{-21} \text{ m}^2$  abgeschätzt.

Insgesamt liegen im Ergebnis des abgeschlossenen FuE-Vorhabens Untersuchungsmethoden (Meßausrüstungen, Rechenprogramme) sowie Bewertungsverfahren und -kriterien vor, mit denen die Barrierewirksamkeit der geologischen Schichten Anhydrit und Salzton beurteilt werden kann. Die Verfahren werden im laufenden Vorhaben BARIAN (FKZ 02 E 9168 9) optimiert und in geklüfteten Anhydritstrukturen eingesetzt, die infolge eines Abbaueinflusses unter erhöhte Gebirgsspannungen gelangen.

Die vorgelegten Ergebnisse zeigen die entscheidende Abhängigkeit der Barrierewirkung des Anhydrits vom mechanischen und hydraulischen Kluffverhalten, wobei die Kluffpermeabilität insbesondere von der Gebirgsspannung normal zur Kluff beeinflusst wird. Die entsprechenden Integritätsbewertungen sind deshalb immer differenziert standortbezogen in Bezug zu den geologischen und bergbaulichen Bedingungen vorzunehmen.

## **1 Einleitung**

Das Vorhaben wurde im Verbund mit dem Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig durchgeführt. Die GRS war dabei für Schallemissionsmessungen im Auffahrungsbereich der Anhydritkammer am WQ 13 in der Grube Bernburg, für Permeabilitätsmessungen in der alten Hauptförderstrecke im Steinsalz und Anhydrit sowie für begleitende Laboruntersuchungen verantwortlich. Am IfG Leipzig wurden eine neue Hydrofracsonde mit integrierter Schallemissionsrißortung entwickelt und gebaut, Spannungen und Hohlraumkonvergenzen im Steinsalz und Anhydrit analysiert, Würfelfracversuche im Labor sowie Kluftpermeabilitätsbestimmungen im Labor und in-situ durchgeführt sowie die Labor- und In-situ-Untersuchungen mit numerischen Modellrechnungen nachvollzogen.

Die Bearbeitung erfolgte bei beiden Einrichtungen fachlich und kalkulatorisch eigenverantwortlich (bei der GRS unter dem Förderkennzeichen 02 E 8765).

Von den Mitarbeitern beider Einrichtungen wurde bereits gemeinsam das Vorhaben "Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton" (Förderkennzeichen 02 E 8452 und 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. Im Ergebnis dieses Vorhabens wurden die für eine Bewertung der geologischen Barrierefunktion charakteristischen Stoffeigenschaften der Gesteine Anhydrit und Salzton mittels Labor- und In-situ-Versuchen bestimmt und geeignete Verfahren zu ihrer Ermittlung erprobt.

Das hier vorgelegte Vorhaben geht über eine mechanische Bewertung der Barrierewirkung von Anhydrit und Salzton hinaus und berücksichtigt auch das hydraulische Verhalten insbesondere der Anhydritklüfte bzw. gebirgsmechanisch/hydraulisch gekoppelte Erscheinungen. Zur Gewährleistung der Sicherheit eines Endlagers im Salinar ist der Nachweis der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz-Anhydrit-Salzton in inhomogenen Gebirgsbereichen eines Endlagers zu erbringen bzw. die Prognose der Bedingungen für ein Versagenszenario eines Zuflusses/Austrittes über die kompetenten Horizonte Anhydrit/Salzton erforderlich. In dem Vorhaben sollen, unter Benutzung der in dem oben genannten Thema gewonnenen Einzelstoffdaten und Einzelbeobachtungen sowie der Weiterentwicklung der Meßverfahren, die in das Wirtsgestein eingeschalteten Horizonte Anhydrit und Salzton in ihrer Verbundwirkung mit dem Steinsalz untersucht und allgemein belastbare

Bedingungen und Kriterien für die Gewährleistung der Integrität dieses Schichtpaketes ermittelt werden.

Die In-situ-Untersuchungen konzentrierten sich in Weiternutzung des bestehenden Versuchsortes auf die Grube Bernburg der Kali und Salz GmbH. Als Vertragspartner mit der Kali und Salz GmbH, Werk Bernburg, trat das IfG auf. Es schloß einen Vertrag über die Nutzung des Versuchsortes bzw. über die durch die Grube zu erbringenden Leistungen, plante alle in der Grube Bernburg durchzuführenden Untersuchungen und rechnete die in der Grube anfallenden Arbeiten zum Betreiben des Versuchsortes ab.

In der Grube Bernburg sind neben Steinsalz Hauptanhydrit A3 und Grauer Salzton T3 in der Normalabfolge der Zechsteinformation Bestandteil der Salinarfolge. Daher ist bei der Bewertung der geologischen Barriere nicht nur das geomechanische Verhalten von Steinsalz, in dem sich die Einlagerungshohlräume befinden werden, sondern auch das Verbundverhalten des gesamten Gesteinsverbandes, einer Wechselfolge aus Salzgesteinen, für den sicheren Einschluß von Bedeutung.

Während Steinsalz bei Belastung, d.h. solange die untertägigen Hohlräume existieren, die Fähigkeit zur bruchlosen Deformation ohne Integritätsverlust besitzt, sind bei Anhydrit und Salzton größere Deformationen meist mit der Aktivierung natürlicher Klüfte bzw. mit Rißbildungen verbunden. Aus vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist bekannt, daß es durch Kriechprozesse im Steinsalz zu Lastumverlagerungen auf die harten Einschlüsse wie Anhydrit und Salzton kommt. Sie führen im Hohlraumkonturbereich zu Zugspannungen bzw. im eingespannten Gebirgskörper zu hohen Druckspannungen, die Risse und Wegsamkeiten hervorrufen können.

Liegen die Einlagerungshohlräume im Steinsalz hinreichend weit von Anhydrit- und Salztonschichten entfernt, so ist in diesen Fällen die Integrität der mächtigen Steinsalzschutzschicht als geologische Barriere gegeben. Da jedoch bei den in vielen Fällen gegebenen geologischen Bedingungen und Salinarstrukturen Hohlraumwirkungen auf die nichthalitischen Horizonte bzw. den Verbund a priori nicht auszuschließen sind, müssen diese Hohlraumwirkungen und die sich aus eventuell veränderten Durchlässigkeiten von Anhydrit und Salzton ergebenden Konsequenzen für die Barrierewirksamkeit des Verbundsystems Steinsalz/Anhydrit/Salzton durch entsprechende Untersuchungen erfaßt und belegt werden.

Die genannten Sachverhalte sind qualitativ bekannt und in dem vorlaufenden Vorhaben an zwei Standorten weitgehend erfaßt worden durch:

- Messung der Festigkeit von Anhydrit und Salzton an Proben im Labor bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen (80 °C),
- In-situ-Bestimmung des Spannungszustandes in den Anhydrit- und Salztonschichten im Nahbereich der Meßorte,
- In-situ-Bestimmung des Deformationsverhaltens von Anhydrit und Salzton unter den natürlichen Bedingungen sowie bei der Hohlraum-auffahrung,
- Bestimmung der geoelektrischen Parameter im Normalzustand mit Labor- und In-situ-Messungen,
- Bestimmung der Durchlässigkeit der Anhydrit- und Salztonschichten im Normalzustand der Versuchsorte.

Die letztgenannten für die Charakterisierung der Durchlässigkeit der Anhydrit- und Salztonschichten sehr wesentlichen Messungen führten allerdings wegen der geringen Klüftigkeit an den Meßorten sowie für die Erfassung geringer Durchlässigkeitswerte ungeeigneter Meßapparaturen nicht zu ausreichend belastbaren Ergebnissen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann ausgesagt werden, daß sich an den Standorten im Südharz in der Grube Volkenroda/Pöthen und in Sachsen-Anhalt in der Steinsalzgrube Bernburg die untersuchten Schichten des A3 und T3 mit Ausnahme der mittleren Zonen des T3 als sehr kompakt und wenig bis nicht zerklüftet mit sehr geringer Permeabilität darstellen. Aufgrund der geringen Festigkeit reagieren die mittleren Schichten des T3 bei einem Aufschluß mit Brucherscheinungen im Konturbereich. Im Gebirgsverband bei allseitiger Einspannung wurden sie primär jedoch auch als dicht und unversehrt angetroffen.

Die Klüftigkeit und Durchlässigkeit von Anhydrit und Salzton wächst mit dem Grad der Beanspruchung, die diese Schichten im Laufe der Entwicklungsgeschichte (Tektonik) oder durch gebirgsmechanische Einwirkungen (Hohlräume) erfahren. Generell fehlen für Prognose-rechnungen für einen beliebigen Standort quantitative Kenntnisse des Spannungs-Durchläs-

sigkeitsverhaltens im Verbund von Steinsalz/Anhydrit/Salzton. Diese sind jedoch von entscheidender Bedeutung.

Bei großen Deformationen des Gebirgsverbandes, wie sie beim Schließen der Einlagerungshohlräume über lange Zeiten auftreten, ist im Anhydrit und Salzton mit sehr großen Spannungsakkumulationen und in der Folge mit Brucherscheinungen zu rechnen, so daß prinzipiell von einer Klüftigkeit und Durchlässigkeit dieser Schichten auszugehen ist. Eine systematische Untersuchung der Bedingungen, unter denen eine signifikante Beeinflussung des Verhaltens der Anhydrit/Salztonschichten von Fall zu Fall, sowohl in Richtung auf Erhaltung wie auch in Richtung von Beeinträchtigung der Barriereigenschaften zu erwarten sind, steht noch aus. Nicht zuletzt wegen des ungeklärten Zusammenhanges zwischen Klüftigkeit und Durchlässigkeit von Hauptanhydrit und Salzton sind Prognosen für die Zukunft noch nicht möglich.

Die Schwerpunkte der Arbeiten der GRS im beantragten Vorhaben waren deshalb:

- Erkundung einer potentiellen Schwächezone im Übergangsbereich von Steinsalz und Anhydrit mit seismischen und geoelektrischen Verfahren und Beurteilung ihrer Effektivität.
- Geoelektrische Wiederholungsmessungen zur Beurteilung des zeitlichen Verlaufs der Auflockerungszone im Anhydrit.
- Beurteilung der momentanen Barrierewirkung des Übergangsbereichs zwischen Steinsalz und Anhydrit.
- Beurteilung der Entwicklung der Barrierewirksamkeit einer Anhydrit-Steinsalz-Grenze.
- Bereitstellung von Algorithmen zur dreidimensionalen seismischen Erkundung von gesteinsphysikalischen Eigenschaften in einer komplexen geologischen Situation im Salzgestein, Modellierung der Auswirkungen des regionalen Spannungsfeldes.
- Durchführung von Permeabilitätsmessungen im Übergangsbereich von Steinsalz zu Anhydrit unter Einbeziehung von Klüften.

Die Schwerpunkte der Arbeiten des IfG im beantragten Vorhaben waren:

- Bau und Erprobung einer neuen Hydrofracsonde mit integrierter Schallemissionsrißortung.
- Bestimmung des Zusammenhanges zwischen Klüftigkeit, Durchlässigkeit und Spannungszustand. Hier sollen Risse durch hydraulische Aufreißversuche definiert erzeugt sowie die Durchlässigkeit und das Ausbreitungsverhalten von Flüssigkeiten in den gefracten Anhydrit- und Salztonschichten durch Labor- und In-situ-Messungen bestimmt werden.
- Entwicklung eines Rechenmodells zur Beschreibung des Deformations/Spannungs- sowie Durchlässigkeitsverhaltens geklüfteter Gebirgsbereiche.
- In-situ-Messungen zur Validierung des Rechenmodells.

Eine Voraussetzung für die Bearbeitung des komplexen und umfangreichen FuE-Vorhabens bestand darin, erforderliche Meßausrüstungen und -methoden zu entwickeln. Sie wurden in der Vorhabenslaufzeit erprobt und in Abhängigkeit von der Anwendbarkeit weiter entwickelt bzw. neu konzipiert. Auf allen drei grundlegenden Arbeitsgebieten der gebirgsmechanischen Nachweisführung (Laborversuche, In-situ-Messungen und Modellrechnungen) waren dazu Neu- bzw. Weiterentwicklungen erforderlich.

Zur Lösung wurden folgende Arbeitspakete und Teiluntersuchungen festgelegt (nur GRS-Arbeitspakete):

- Erkundung von Schwächezonen im Übergangsbereich Na2-Anhydrit.
- Beurteilung der Barrierewirksamkeit einer Na2-A3-Grenze.
- Bereitstellung von Algorithmen zur seismischen 3-D-Erkundung.
- Beschreibung des Einflusses verschiedener Rißsysteme auf die Barrierewirksamkeit des Na2-A3-Verbandes.
- Beurteilung der Barrierefunktion des Gebirges.
- Untersuchung der Flüssigkeitsausbreitung auf natürlichen und künstlichen Rißflächen.

Es wurden In-situ-Messungen durchgeführt, die von einem umfangreichen Laborprogramm zur Interpretation der Feldmessungen begleitet wurden. Mit dem Laborprogramm wurde ferner das Ziel verfolgt, die Kenntnisse über das mechanische und hydraulische Verhalten des Anhydrits unter mechanischer und thermischer Belastung zu erweitern.

Eine Voraussetzung für die Bearbeitung des komplexen und umfangreichen FuE-Vorhabens bestand darin, erforderliche Meßausrüstungen und -methoden zu entwickeln. Sie wurden in der Vorhabenslaufzeit erprobt und in Abhängigkeit von der Anwendbarkeit weiterentwickelt bzw. neu konzipiert, indem Entwicklungen von anderen Forschungseinrichtungen übernommen werden. Auf allen drei grundlegenden Arbeitsgebieten der gebirgsmechanischen Nachweisführung (Laborversuche, In-situ-Messungen und Modellrechnungen) waren dazu Neu- bzw. Weiterentwicklungen erforderlich.

Die nachfolgenden Untersuchungs- und Ergebnisdarstellungen sind entsprechend den oben genannten Arbeitsschwerpunkten gegliedert.



## **2            Untersuchung von natürlichen Kluft- und Schwächezonen im Grenzbereich Hauptanhydrit/Steinsalz mit weiterentwickelten geophysikalischen Erkundungsmethoden**

### **2.1           Schallemissionsmessungen im nahen Umfeld der Versuchskammer (25 kHz)**

Seit Anfang 1994 wurden um eine Versuchskammer im Anhydrit des Salzbergwerks Bernburg Schallemissionsmessungen zur Beurteilung der Langzeitstandfestigkeit von Hohlräumen durchgeführt. Bis 1995 wurde nur eine sehr geringe seismische Aktivität im Bereich der Versuchskammer gemessen. Aus diesem Grunde wurden die Schallemissionsmessungen erst nach einer Unterbrechung im Frühjahr 1996 wieder aufgenommen, nachdem die Registrierdauer auf 24 h/Tag ausgedehnt worden war.

Das Ziel dieser Messungen war eine Vergrößerung der Datenbasis, um eine gesichere statistische Beurteilung der Schallemissionsaktivität abgeben zu können. Ferner sollen die registrierten Ereignisse benutzt werden, um die unmittelbare Umgebung des Versuchsortes mit der Methode des „passive seismic imaging“ die Verteilung der P-Wellengeschwindigkeiten genauer zu erkunden.

#### **2.1.1           Installation des Stationsnetzwerkes**

Der Versuchsort im Salzbergwerk Bernburg liegt im Bereich eines Wartungsplatzes an der Grenze zwischen Hauptanhydrit (A3) und Steinsalz. Zur Messung der Schallemissionsaktivität sind um die Versuchskammer im Anhydrit insgesamt 10 Drei-Komponenten-Stationen verteilt, die in einem Frequenzbereich bis ca. 20 kHz die durch entstehende Minirisse frei werdenden Schallwellen registrieren. Eine genauere Beschreibung des Versuchsortes und der Lage der Sonden findet man bei /FLA 95/.

### **2.1.2 Bestimmung der Einsatzzeiten mit Hilfe neuronaler Netze (Ereignisortung)**

Es ist nicht ungewöhnlich, daß Schallemissionen in großer Anzahl (mehrere hundert Ereignisse pro Tag) auftreten. Um diese Datenmenge bewältigen zu können, ist eine Automatisierung der Datenaufbereitung notwendig.

Bei der Auswertung der Schallemissionen am Versuchsort im Bernburger Anhydrit bedeutet dies:

1. Umsetzen der Rohdaten in universelle ASCII-Daten.
2. Bestimmung der Einsatzzeiten.
3. Ortung der Ereignisherde.
4. Abschätzung der Herdparameter.

Bei Beginn des Projektes waren Programme zur Durchführung der Schritte 1, 3 und 4 aus früheren Arbeiten vorhanden. Die Einsatzzeiten wurden bisher per Hand interaktiv am Bildschirm festgelegt. Um die gesamte Vorauswertung zu automatisieren wurde versucht, ein Programm zur automatischen Bestimmung der Einsatzzeiten zu implementieren.

Im Rahmen einer Kooperation mit der TU Clausthal wurden unabhängig von dem laufenden Projekt in einer Diplomarbeit Vergleiche zwischen verschiedenen Algorithmen durchgeführt. Untersucht wurden dabei Variation der Kurzzeit/Langzeit-Algorithmen und als neuer Ansatz die Ortung mit Hilfe neuronaler Netze.

Da die Schallemissionen aus dem Bernburger Array ein relativ schlechtes Signal/Noise-Verhältnis aufwiesen, konnten die konventionellen Kurzzeit/Langzeit-Algorithmen nicht eingesetzt werden. Aus diesem Grund wurde versucht, die Einsatzzeiten mit Hilfe eines speziell trainierten neuronalen Netzes zu bestimmen. Zunächst wird festgelegt, welche Merkmale der seismischen Spur im neuronalen Netz berücksichtigt werden sollen (z.B. Amplitude, Phase, Frequenz vor und nach der Einsatzzeit). Danach wird die Geometrie des neuronalen Netzes festgelegt. Neben einer Ein- und einer Ausgabeschicht besteht ein neuronales Netz aus einer oder mehreren Schichten verdeckter Neuronen. Aufgrund der erwähnten Diplomarbeit wird für das vorliegende Problem der Einsatzerkennung auf eine verdeckte Schicht mit

10 Neuronen gewählt. Der Aufbau eines funktionsfähigen neuronalen Netzes gliedert sich in drei Schritte:

1. Erzeugung von Lernmustern.
2. Trainieren des Netzes.
3. Anwendung des Netzes.

Bei der Erzeugung von Lernmustern werden an typischen Exemplaren der Daten die Einsatzzeiten (per Hand) bestimmt und die vom neuronalen Netz zu untersuchenden Merkmale extrahiert. In der Trainingsphase werden diese Lernmuster dazu benutzt, die Wichtungsfaktoren zwischen den Neuronen aufzubauen. Bei der Anwendung klassifiziert dann das neuronale Netz selbständig die Eingabedaten in die Ausgabemuster. Konkret bedeutet dies, daß jeder Zeitpunkt einer seismischen Spur darauf hin untersucht wird, ob er die Einsatzzeit darstellt oder nicht.

Die Vorteile neuronaler Netze liegen in ihrer Lernfähigkeit. Mit Hilfe geeigneter Lernmuster kann ein neuronales Netz unterschiedlichste Muster erkennen. Ein Nachteil liegt einerseits in der manchmal schwierigen Auswahl geeigneter Merkmale und schwerwiegender in der Subjektivität bei der Auswahl der Trainingsdaten. Darüber hinaus kann eine hohe Variation der Trainingsdatenqualität das Netz derart überfordern, so daß keine sinnvollen Klassifizierungen mehr vorgenommen werden können. Nicht zuletzt hat auch die Geometrie des Netzes Auswirkungen auf die Ergebnisse.

Etwa 100 Seismogramme aus einem früheren Projekt wurden als sogenannte Lernmuster für das neuronale Netz verwandt. Zu diesem Zweck wurden aus den Seismogrammen jeweils 3 Merkmale bestimmt, die sich auf einen vorher festgelegten Zeitpunkt bezogen: Merkmal 1 beschreibt die Energieänderung in einem größeren Fenster vor und nach dem Zeitpunkt. Merkmal 2 erfaßt die Energieänderung am Zeitpunkt und Merkmal 3 stellt die Energieänderung in einem kleinen Fenster um den Zeitpunkt dar.

Mit den Merkmalen der Musterdaten wurde das neuronale Netz trainiert. Vor der eigentlichen Anwendung auf die Daten aus dem Projekt wurden die automatisch ermittelten Einsatzzeiten überprüft, um die Güte des trainierten Netzes zu testen. Dabei stellte sich heraus,

daß das Netz nicht in der Lage war, die visuell bestimmten Einsatzzeiten näherungsweise zu reproduzieren.

Der Grund für das Versagen der Einsatzerkennung mit dem neuronalen Netz liegt in der stark schwankenden Qualität der Schallemissionsdaten. Überwiegend zeigen die Daten ein so schlechtes Signal-Noise-Verhältnis, daß eine genaue Einsatzerkennung auch optisch sehr schwierig ist. Nur in wenigen Fällen ist die Erkennung unproblematisch. Außerdem kam es durch die allgemeine Bergwerksunruhe oft zu Fehltriggerungen mit sehr niederfrequenten Schwingungen (Fahrzeuge), die das neuronale Netz nicht einordnen und verarbeiten konnte. Daher war an diesem speziellen Versuchsort eine automatische Einsatzbestimmung leider nicht möglich.

### **2.1.3 Messungen und Ergebnisse**

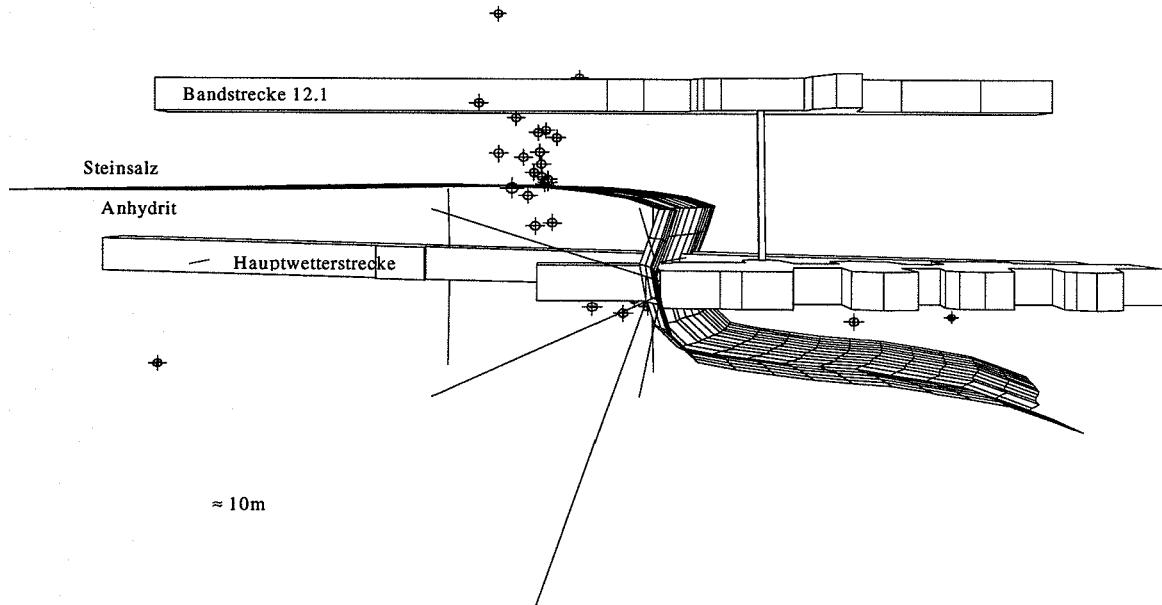
#### *Ergebnisse bis 1996*

Die seismischen Messungen in den Jahren 1994 - 1996 ließen im Bereich des Übergangs zwischen Steinsalz und Anhydrit eine aktive Schwächezone vermuten, die sich durch zahlreiche Schallemissionen aufgrund von Rißbildungen abzeichnete. Die damaligen Ergebnisse sind in den Abbildungen 2.1 und 2.2 dargestellt.

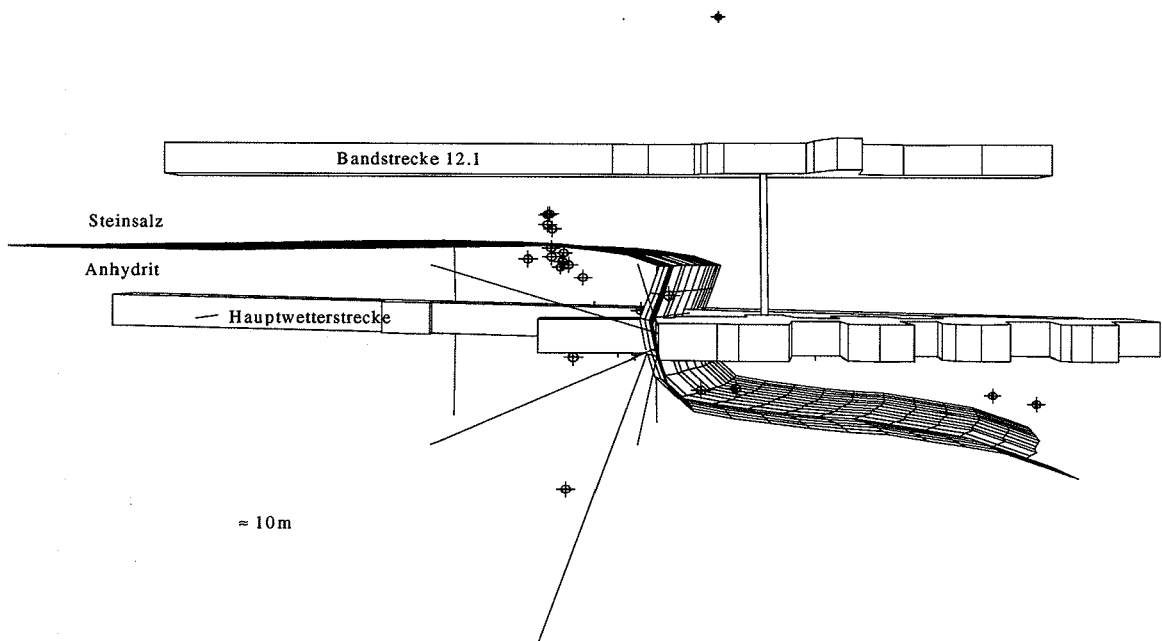
Zwischen der Hauptwetterstrecke und der Bandstrecke 12.1 ist eine Zone erhöhter Schallemissionsaktivität erkennbar. Mit den Registrierungen 1996 sollte u.a. geklärt werden, ob es sich bei dieser Zone um ein Gebiet handelt, in dem sich generell vermehrt Mikrorisse bilden und dadurch die Permeabilität in diesem Bereich dauerhaft erhöhen.

#### *Ergebnisse 1996*

Zur genaueren Bestimmung der allgemeinen Schallemissionsaktivität und speziell zur Erkundung der potentiellen Schwächezone wurde das Meßintervall der Anlage von 7 h auf 24 h erhöht. Bei früheren Registrierungen war es immer mal wieder zu tagelangen Datenausfällen durch das massenhafte Auftreten von Fehltriggerungen bei erhöhter Bergwerksunruhe gekommen. Da eine tägliche Wartung der Anlage durch örtliches Personal aus betrieblichen Gründen nicht möglich war, mußte eine Datenfernverbindung von einem Braun-



**Abb. 2.1** Versuchsort im Bernburger Anhydrit mit Bohrungen, Steinsalz/Anhydrit-Grenze und Schallemissionen **vor** der Auffahrung der Versuchskammer.



**Abb. 2.2** Versuchsort im Bernburger Anhydrit mit Bohrungen, Steinsalz/Anhydrit-Grenze und Schallemissionen **nach** der Auffahrung der Versuchskammer.

schweiger Rechner zum Steuerrechner der Anlage Untertage aufgebaut werden. Durch eine tägliche Statuskontrolle und Datenübertragung via Telephonleitung war es danach möglich, die Ausfallzeiten aufgrund von Fehltriggerungen auf wenige Stunden zu minimieren.

Nachdem die Anlage 1995 größtenteils inaktiv war, wurde Anfang 1996 mit den notwendigen Umrüstungen begonnen. Die Modifizierung der Anlage und der Aufbau der Datenverbindung war bis April 1996 weitestgehend abgeschlossen. Bevor mit den eigentlichen Registrierungen im 24-h-Betrieb begonnen wurde, wurden die Triggerschwellen der Anlage aufgrund von Erfahrungen aus früheren Registrierungen herabgesetzt und somit die allgemeine Empfindlichkeit der Anlage deutlich erhöht. Nachdem mit diesen neuen Einstellungen bis Juli 1996 erfolgreich im 7-h-Betrieb (nur während der Nachtstunden) registriert worden war, wurde die Anlage noch im Juli 1996 auf den 24-h-Betrieb umgestellt.

Da das Registrierfenster und die Empfindlichkeit der Datenerfassungsanlage vergrößert worden waren, wurde mit mehr Ereignissen als in den Jahren 1993-1995 gerechnet. Schon nach den ersten Wochen der Registrierung zeichnete sich jedoch eine geringere tägliche Anzahl von Schallemissionen ab, die darüber hinaus noch äußerst schwach waren. Tatsächlich wurden die Schallemissionen fast ausschließlich an einer Sonde (Sonde 6) empfangen. Gegenüber den anderen Sonden ist diese Sonde besonders fest an das Gebirge gekoppelt, da sie durch nachfallendes Bohrklein regelrecht im Bohrloch zementiert wurde.

Da zur Ortung und Bestimmung der Herdparameter Registrierungen an mindestens 6 Sonden notwendig sind, konnten diese Bearbeitungsschritte nicht durchgeführt werden. Eine ähnlich feste Ankopplung der anderen Sonden kann durch deren Konstruktion, die auf die Rückgewinnung der Sonden ausgelegt ist, nicht erreicht werden. Eine Zementierung der Sonden in den Bohrlöchern würde zwar die Ankopplung wesentlich verbessern, ist aber aufgrund des Stückpreises der Sonden von ca. 10 TDM nicht möglich.

Mit wenigen Ausfällen wurde das Schallemissionsarray von April bis Ende November 1996 betrieben. Ab Juli 1996 wurden die Registrierungen darüber hinaus rund um die Uhr durchgeführt.

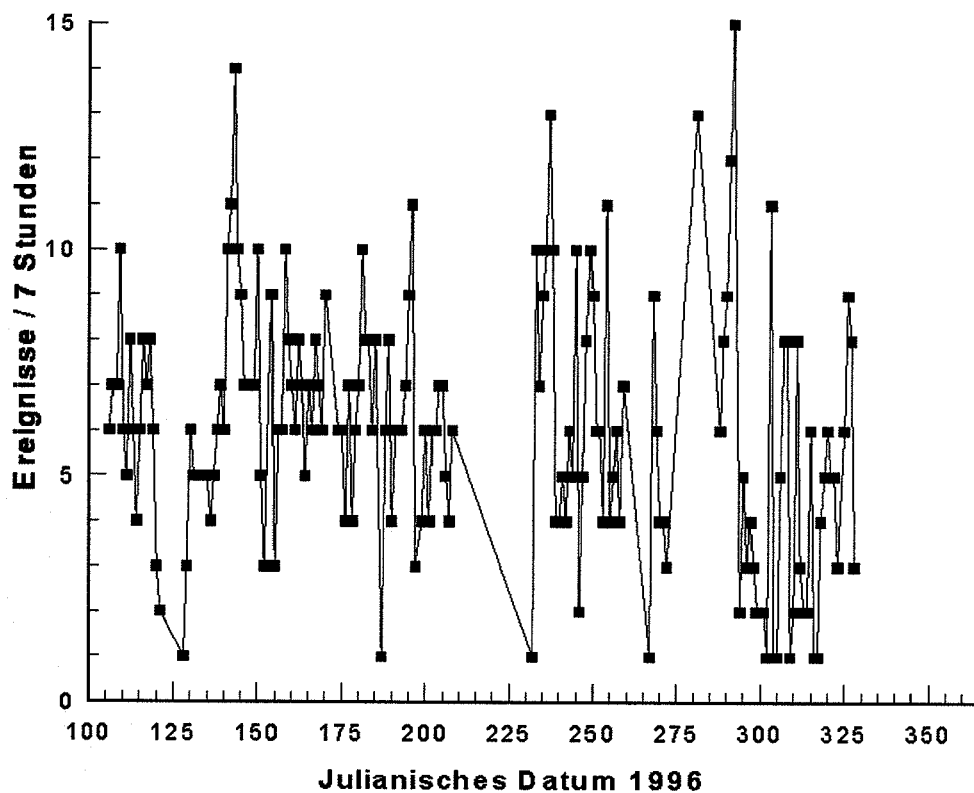
#### 2.1.4 Auswertung und Interpretation der Schallemissionsmessungen

Wie bereits erwähnt, wurden lediglich an Sonde 6, die durch herabfallendes Bohrklein besonders fest an das Gebirge gekoppelt war, Schallemissionen registriert. Ihre Energie war offenbar so gering, daß keine Schallemissionen an den übrigen Sonden wegen schlechterer Ankopplung empfangen werden konnten. Die Reichweite der Registrierungen ist begrenzt. Eine Ortung des Entstehungsortes der Mikrorisse ist nicht möglich.

In Abbildung 2.3 ist die Schallemissionsaktivität, wie sie an dieser Sonde (Nr. 6) registriert wurde, dargestellt. Um die neuen Ergebnisse mit den früheren Messungen vergleichen zu können, wurde die Schallemissionsaktivität auf ein Zeitintervall von 7h/Tag umgerechnet.

Die sich ergebende Aktivitätskurve zeigt Schwankungen um einen Mittelwert von ca. 6 - 7 Ereignissen / 7h. Vereinzelt sind Spitzenaktivitäten bis 15 Ereignisse / 7h bzw. Tage deutlich geringerer Aktivität von durchschnittlich ein Ereignis / 7h zu erkennen. Eine Korrelation von Schallemissionsaktivitäten mit Aktivitäten im Bergwerk ist nicht zu erkennen. Es ist auffällig, daß nach Tagen mit erhöhter Aktivitäten meistens Tage mit besonders niedriger Aktivität folgen. Durch die Bildung von Minirissen werden lokale Spannungsunterschiede im Gestein abgebaut. Je mehr Risse auftreten, desto größer ist die abgebaute Spannungsdifferenz. Nimmt man an, daß sich diese Spannungsunterschiede kontinuierlich aufbauen, so ist einsichtig, daß nach Perioden besonders hoher Aktivität eine längere Zeit zum erneuten Aufbau von genügend hohen Spannungsdifferenzen verstreichen muß, als in Zeiten durchschnittlicher Aktivität. Nicht geklärt ist dadurch allerdings die Frage, warum die Schallemissionsaktivität überhaupt an manchen Tagen deutlich erhöht ist.

Über den Registrierzeitraum von 8 Monaten (April '96 - Nov. '96) zeigt sich mit Ausnahme einzelner Tage eine gleichbleibende durchschnittliche Schallemissionsaktivität. Da seit der Auffahrung des Versuchsortes zu diesem Zeitpunkt mehr als 3 Jahre vergangen waren, scheint es sich bei dieser Aktivität um einen Langzeiteffekt zu handeln, der von dem Auffahrtvorgang selbst unabhängig ist. Selbst mehrere Jahre nach der Auffahrung des Hohlraums kommt es immer wieder zur Bildung kleinster Risse im Anhydrit. Dieser Effekt scheint auch nach längerer Zeit nicht abzuklingen.



**Abb. 2.3** Schallemissionsaktivität an der Sonde 6 (bezogen auf ein Meßintervall von 7 Stunden / Tag).

Die allgemeine Abnahme der Schallemissionsaktivität um den Versuchsort herum und insbesondere im Bereich der potentiellen Schwächezone läßt sich allenfalls mit der Verlagerung der aktiven Abbaugebiete im Bergwerk erklären. Während in den Zeiten 1993 bis 1995 aktive Feldbereiche in unmittelbarer Umgebung des Versuchsortes lagen, waren diese 1996 bereits weitergewandert und befinden sich in über 2 km Entfernung. Demnach wurden die früher registrierten Schallemissionen durch die nahegelegenen Abbautätigkeiten verursacht. Aufgrund der aktuellen Spannungs- und Festigkeitsverteilungen in diesem Bereich konzentrierten sich diese Ereignisse in einem Gebiet, das als potentielle Schwächezone gedeutet wurde. Da das Auftreten von Schallemissionen an die Entstehung von Mikrorissen gebunden ist, ist in dieser Zone sicherlich die Permeabilität gegenüber dem intakten Gebirge erhöht. Sie stellt jedoch nicht eine natürliche Schwächezone dar sondern wurde durch die dortige Kombination von Anhydritklippe und Hohlraumauffahrung erzeugt.



## **2.2 Schallemissionsmessungen an der Oberfläche der Versuchskammer (100 kHz)**

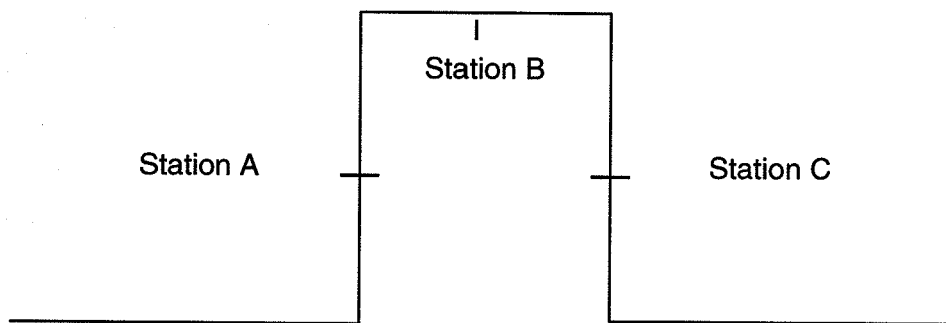
Während der Registrierung der niederfrequenten Schallemissionen bis 1996 wurden an dem Versuchsort im Bernburger Anhydrit nur relativ wenige Ereignisse verzeichnet. Ein Grund dafür könnten der Abbau von elastischen Spannungen durch das vermehrte Auftreten kleinerer Ereignisse mit einem Gehalt an höheren Frequenzen sein. Um diese Hypothese zu prüfen, wurde mit Hilfe von zwei Drei-Komponenten-Stationen der höhere Frequenzbereich bis ca. 100 kHz im Zeitraum von Anfang November 1996 bis Ende Januar 1997 überwacht.

### **2.2.1 Installation der Meßstationen**

#### *Funktionsweise der Sonden*

Die beiden Stationen bestehen aus jeweils drei einzelnen Aufnehmern für elastische Wellen mit einem Frequenzgehalt bis ca. 100 kHz. Diese drei Aufnehmer sind auf einer 10 cm · 10 cm großen Trägerplatte so angebracht, daß ihre Registrierrichtungen senkrecht zueinander stehen. Zur Befestigung dieser Platten am Gebirge wird eine ähnliche Platte an das Gestein zementiert. Mittels vier Verschraubungen wird dann die Trägerplatte mit den Aufnehmern darauf befestigt. Ein Kopplungsmittel zwischen den beiden Platten sorgt für eine verbesserte akustische Verbindung der Aufnehmer an das Gebirge. Der Vorteil dieser Befestigungsmethode liegt in der Rückholbarkeit der (relativ teuren) Aufnehmer, ohne wesentliche Einbußen in der Ankopplung hinnehmen zu müssen.

Die Aufnehmer sind mit einem Transientenrekorder verbunden, der über eine IEEE-Schnittstelle an einen Rechner angeschlossen wurde. Mit Hilfe eines speziellen Steuerungsprogramms wurden die vom Transientenrekorder registrierten Daten automatisch ausgelesen, so daß eine beinahe lückenlose Aufzeichnung während des gesamten Registrierzeitraums möglich war. Insgesamt wurden die beiden Drei-Komponenten-Stationen an drei unterschiedlichen Orten im Bereich der Nische im Bernburger Anhydrit eingesetzt. Während der ersten 6 Wochen (Anfang November 1996 bis Mitte Dezember 1996) wurde an der linken Nischenseite sowie an der Ortsbrust registriert. Noch vor dem Jahreswechsel wurde die eine Station von der linken auf die rechte Nischenseite versetzt. Die zweite Station registrierte während der gesamten Zeit an der Ortsbrust (s. Abb. 2.4).

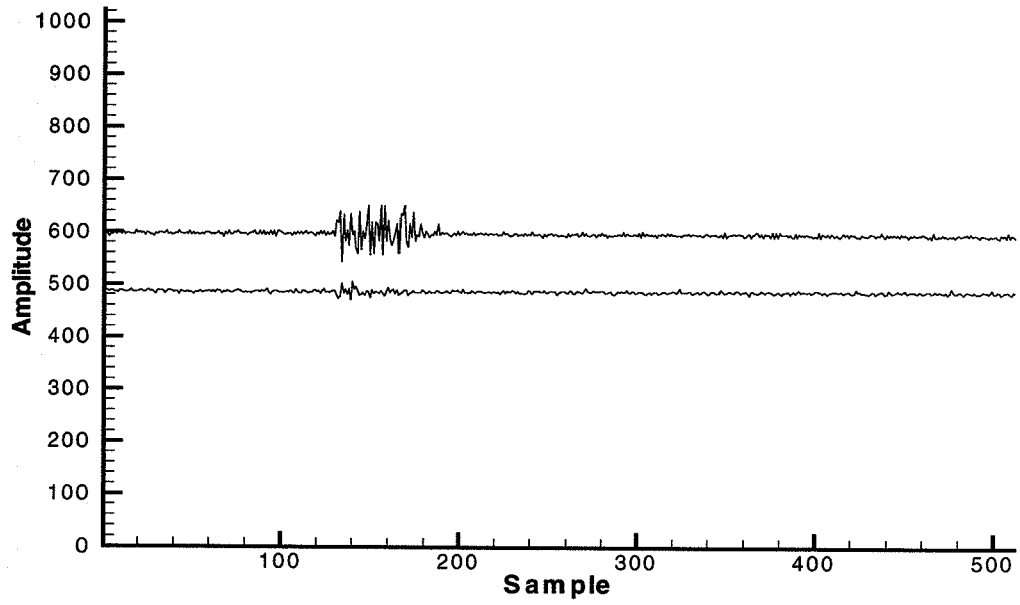


**Abb. 2.4** Skizze der Nische im Bernburger Anhydrit mit den Meßorten der hochfrequenten Schallemissionsmessungen.

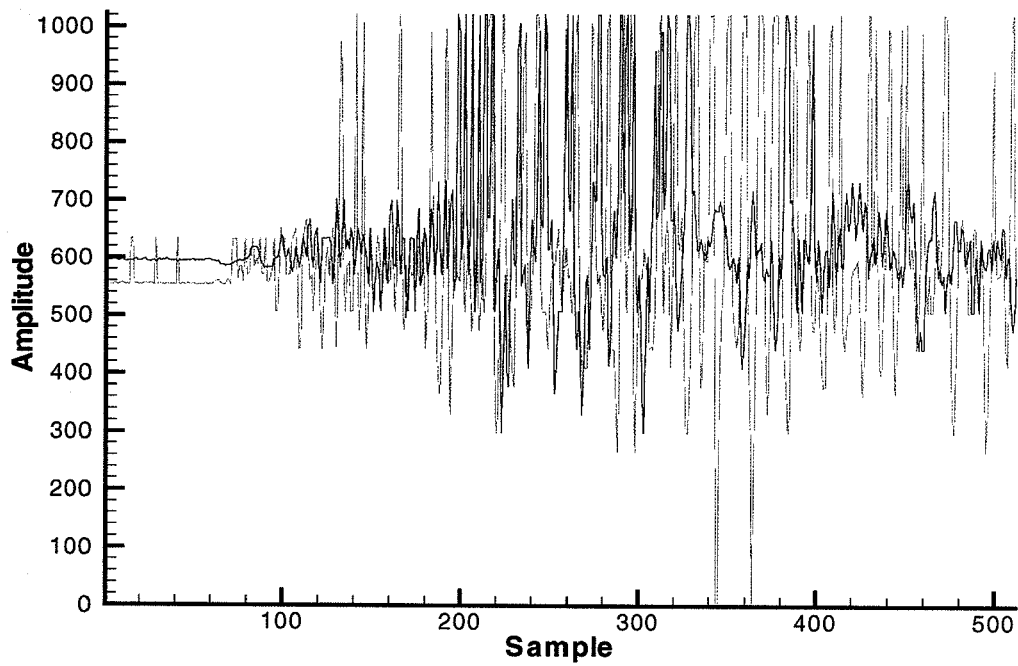
### 2.2.2 Messungen und Ergebnisse

Während des Versuchszeitraums wurden im Verlauf von 16 Wochen mehrere hundert Ereignisse an den verschiedenen Stationen registriert. Da die Dämpfung elastischer Wellen im Gestein proportional mit der Frequenz wächst, ist die Eindringtiefe der Messung geringer als bei den niederfrequenten Messungen. Der Ursprung der registrierten Ereignisse ist daher in der Umgebung von wenigen Metern um die Station. Trotzdem wurden im Vergleich zu den niederfrequenten Messungen zahlreiche Ereignisse registriert. Auch mehrere Jahre nach der Auffahrung der Nische kommt es immer wieder zu Ribbildungen und damit Auflockerungen im Streckensaum. Dies widerspricht der früheren Interpretation der niederfrequenten Registrierungen und den Extensometermessungen sowie Modellrechnungen des IfG-Leipzig, die keine Auflockerungen vermuten ließen. Anscheinend verursacht die Entstehung der zahlreichen kleinen Risse im Streckensaum keinen meßbaren Extensometereffekt. Auch die Modellrechnungen lieferten bisher keinen Hinweis auf die gemessene, zumindest lokale, Überschreitung der Festigkeitsgrenzen des Anhydrits.

Die registrierten Schallemissionen zeigen zum Teil eine sehr unterschiedliche Charakteristik. Ein paar typische Registrierungen sind in den Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellt. Grob lassen sich die Ereignisse in seltene starke und häufige schwache Ereignisse unterscheiden. Auch die generelle Aktivität ist nicht an allen Meßorten gleich. Die meisten Ereignisse wurden an der Station C gemessen. An der Station A wurden weniger Ereignisse gemessen, während an der Station B fast keine Ereignisse empfangen wurden.



**Abb. 2.5** Typisches Ereignis mit geringer Energie.



**Abb. 2.6** Typisches Ereignis mit großer Energie.

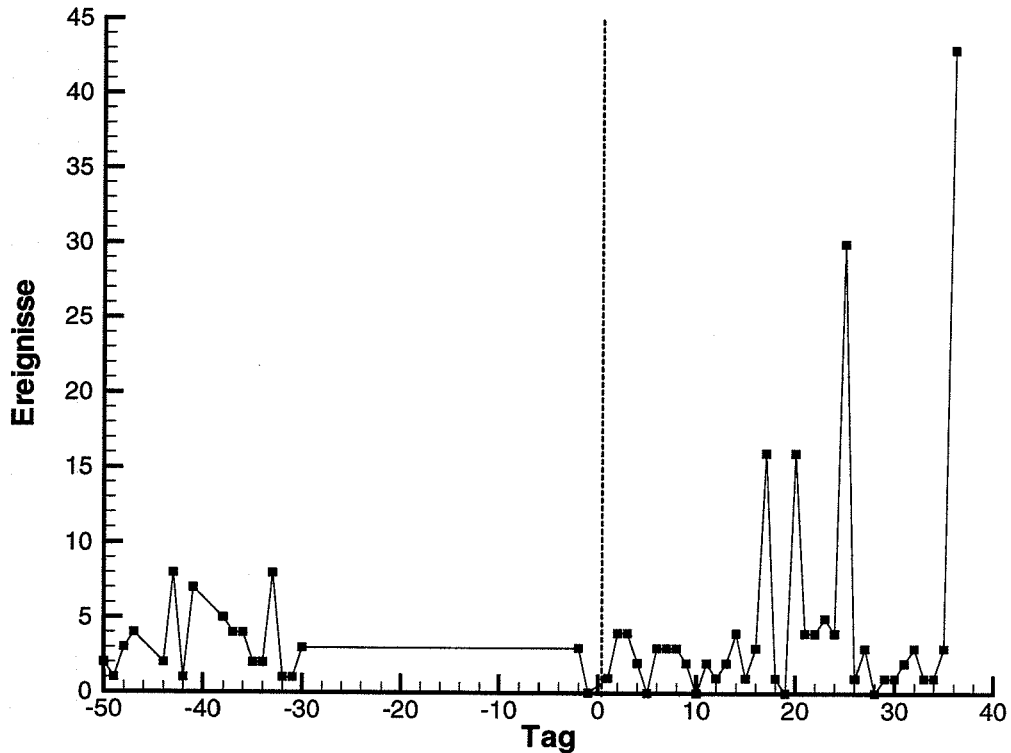
### 2.2.3 Auswertung und Interpretation

Nach Abschluß der Messungen wurden zunächst sämtliche Registrierungen gesichtet und eindeutige Fehltriggerungen durch elektronische Einstreuungen und künstliche Ereignisse wie Bergwerksgeräusche eliminiert. Die als Schallemissionen erkannten Signale wurden tageweise zusammengefaßt und in Abb. 2.7 dargestellt.

In Abb. 2.7 wurde nicht zwischen den einzelnen Stationen (A, B, C) unterschieden. An den Stationen A und C wurde nacheinander gemessen, weshalb die Aktivitäten in einem Bild zusammengefaßt sind. An der Station B (Ortsbrust) wurden nur sehr wenige Ereignisse gemessen, so daß sich dort eine statistische Behandlung nicht anbietet. Die eigentliche Meßphase beginnt mit dem Tag 0. Vorher war eine Testphase mit apparativen Problemen und längeren Datenausfällen.

Grundsätzlich lassen sich anhand von Abb. 2.7 zwei unterschiedliche Merkmale der Schallemissionsaktivität verzeichnen. Es existiert eine nahezu gleichbleibende alltägliche Aktivität von durchschnittlich 3 - 4 Ereignissen pro Tag. Daneben gibt es vier Tage, an denen die Schallemissionsaktivität drastisch bis auf maximal 43 Ereignisse ansteigt. Die alltägliche Aktivität stellt die natürliche Aktivität in diesem Bereich dar. Ein Abklingen ist während des Registrierzeitraums nicht zu beobachten. Obwohl in dem unmittelbaren Stations- und Nischenbereich in den letzten Jahren keine neuen Hohlräume aufgefahren wurden, kann man im hochfrequenten Bereich eine erhöhte Schallemissionsaktivität und damit Rißbildung beobachten. Dies bestätigt die Vermutungen aufgrund der fehlenden Ereignissen im niederfrequenten Bereich.

Warum allerdings an den Stationen A und C höhere Aktivitäten als an Station B gemessen wurden läßt sich derzeit nicht endgültig erklären. Hinweise auf fehlende Spannungsakkumulationen in diesem Bereich aufgrund der Nischengeometrie könnten die Modellrechnungen des IfG geben.



**Abb. 2.7** Schallemissionsaktivität.

## 2.3 Geoelektrische Messungen

### 2.3.1 Geoelektrische Sondierung

Mit Hilfe geoelektrischer Meßmethoden können zerstörungsfrei Informationen über den In-situ-Wassergehalt und -verteilung im Gebirge erhalten werden. In Salinargesteinen, wie Steinsalz und Anhydrit, wird die elektrische Leitfähigkeit des Gebirges im wesentlichen durch das enthaltene Wasser verursacht. Je trockener das Gestein ist, desto höher ist der spezifische elektrische Widerstand. Mit Hilfe von Messungen des spezifischen Widerstandes unter kontrollierten Sättigungsbedingungen im Labor lassen sich für die verschiedenen Gesteine Kalibrierkurven aufstellen, die zu einer quantitativen Abschätzung des Wassergehaltes im Gebirge dienen können. Diese Labormessungen und ein Teil der In-situ-Messungen wurden für den Anhydrit im Salzbergwerk Bernburg bereits in einem früheren Projekt durchgeführt. Aufgrund neuerer Auswertemöglichkeiten, die erst seit kurzem zur Verfügung stehen, bietet

sich eine Re-Interpretation der vorhandenen Meßwerte an. Das Ziel der geoelektrischen Messungen war erstens die Bestimmung eines für intakten Anhydrit charakteristischen In-situ-Widerstandswertes sowie zweitens die Abgrenzung der geoelektrisch wirksamen Auflockerungszone und die Quantifizierung der Wassergehalte in den verschiedenen Gebirgsbereichen.

Zur Sondierung der Widerstandsverteilung in verschiedenen Tiefen wurde die sog. Wenner-Auslage verwendet. Eine Auslage besteht aus 4 Elektroden entlang einer Linie mit gleichen Abständen untereinander. Dieser Abstand wird als Auslageparameter ( $a$ ) bezeichnet. An die äußeren Elektroden (A + B) wird eine definierte Spannung angelegt und so ein Strom in das Gebirge injiziert. An den beiden inneren Elektroden (M + N) wird die entstehende Spannung und der fließende Strom gemessen. Der scheinbare spezifische Widerstand ergibt sich daraus nach der Formel:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{U_{MN}}{I}$$

Das Sondierungsergebnis wird üblicherweise in Form sog. Pseudosektionen dargestellt. Dabei wird in X-Richtung der Mittelpunkt der Auslage, in Y-Richtung der Auslageparameter  $a$  abgegriffen und diesem Punkt der scheinbare spezifische Widerstand zugeordnet. Diese Darstellung spiegelt in etwa die physikalischen Verhältnisse wider, daß Messungen mit einem größeren Auslageparameter von tieferen Gebirgsschichten beeinflußt sind.

Die Pseudosektionen können im Normalfall nur für eine erste qualitative Interpretation herangezogen werden.

### **2.3.2 Inversion der Meßdaten**

Für eine quantitative Interpretation, wie sie bei der Bestimmung der Wassergehaltsverteilung notwendig ist, ist die Umrechnung der scheinbaren Widerstände in wahre Widerstände erforderlich. Dieser Bearbeitungsschritt wird als Inversion bezeichnet. Geeignete Programme zur Durchführung der Inversion sind seit Mitte 1996 verfügbar.

Bei dem verwendeten Inversionsalgorithmus handelt es sich um ein interaktives Verfahren. Zunächst wird der Untergrund in Zellen mit konstantem elektrischen Widerstand unterteilt.

Diese Einteilung bestimmt die räumliche Auflösung des Modells und ist abhängig von der Meßwertverteilung und der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität. Die Zellen werden zunächst mit einem willkürlichen, aber gleichen spezifischen elektrischen Widerstand belegt, so daß sich als sog. Startmodell ein homogener Untergrund ergibt. Ausgehend von diesem Startmodell werden die theoretischen Meßwerte an den einzelnen Elektroden berechnet. Diesen Schritt bezeichnet man als *Lösung des Vorwärtsproblems*. Da das Startmodell nicht mit der tatsächlichen Widerstandsverteilung im Untergrund übereinstimmt, ergibt sich eine Differenz zwischen den berechneten, theoretischen und den tatsächlich gemessenen Werten. Aufgrund dieser Differenzen wird die Widerstandsbelegung der einzelnen Zellen gezielt verändert. Anschließend wird mit dem neuen Modell erneut das Vorwärtsproblem gelöst und die Differenzen zu den Meßwerten gebildet. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis die Unterschiede zwischen theoretischen und tatsächlichen Meßwerten unterhalb eines gewissen Schwellenwertes liegen, bzw. sich ein stabiles Modell der Widerstandsverteilung ergibt. In der Regel sind dazu 5 - 8 Inversionsschritte notwendig.

Die im Endmodell angegebene Widerstandsverteilung spiegelt die petrophysikalischen Eigenschaften des Gebirges deutlich besser wider. Mit Hilfe der Kalibriermessungen im Labor lassen sich die Wassergehalte der einzelnen Gebirgsbereiche abschätzen.

### **2.3.3 Geoelektrisches Profil in der Meßkammer**

Die geoelektrischen Messungen wurden nach dem üblichen Schema durchgeführt. Es wurden 41 Stahlstifte, die als Elektroden dienten, im Abstand von 0,25 m voneinander entlang einer horizontalen Linie (Profil) am südöstlichen Stoß der Versuchskammer einzementiert, um einen guten elektrischen Kontakt der Elektroden mit dem Gebirge zu erreichen. Die scheinbaren Widerstände mit den dazugehörigen Versuchsparametern (Mitte des Profils, Elektrodenabstand) wurden in Pseudosektionen dargestellt (Abb. 2.8 und 2.9). Für die Messungen wurde das Wenner-Verfahren angewandt: 4 Elektroden mit gleichen Abständen auf einer Linie. In die äußeren Elektroden (Stromelektroden) wird ein elektrischer Strom eingespeist, der ein elektrisches Feld erzeugt, das mit den beiden inneren Elektroden (Potentialelektroden) gemessen wird.

Zwei Meßverfahren können angewandt werden:

- Die Elektrodenanordnung wird mit jeweils konstantem Elektrodenabstand über das Profil bewegt (Kartierung).
- Die Elektrodenanordnung wird über das Profil bewegt, wobei der Elektrodenabstand jeweils schrittweise erhöht wird (Sondierung).

#### **2.3.4 In-situ-Wiederholungsmessungen**

Zur Zeit der ersten Messung im Bernburger Anhydrit im Frühjahr 1994 stand noch kein Programm zur Umrechnung der gemessenen scheinbaren spezifischen Widerstände in die tatsächliche Widerstandsverteilung zur Verfügung. Erst ab Mitte 1996 konnte ein solches Programm zur 2-dimensionalen Inversion von geoelektrischen Messungen eingesetzt werden. Da die Pseudosektionen nur sehr eingeschränkt zu einer quantitativen Interpretation verwendet werden können, bot sich ein Re-Processing der Daten mit Hilfe des neuartigen Inversionsprogramms an. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

Die invertierte Sektion zeigt mehrere kleinräumige Anomalien (A-C) höheren Widerstandes von ungefähr  $2 \cdot 10^5 \Omega\text{m}$ . Als Ursache für diese Anomalien wurden topographische Effekte (A) bzw. vorhandene Bohrlöcher (B, C) angenommen, da diese mit den Orten der Anomalien gut korrelierten. Der übrige Teil des erfaßten Gebirges bis 1.5 m Tiefe weist mit ca.  $2 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$  einen deutlich niedrigeren spezifischen Widerstand auf. Dieser Wert stimmt mit dem im Pöthener Anhydrit für den Bereich der Auflockerungszone invertierten Wert gut überein. Demnach erfassen die geoelektrischen Messungen am Versuchsort im Bernburger Anhydrit nur den Bereich der Auflockerungszone und nicht den Bereich des intakten Gebirges. Mit mehr als 1.5 m Mächtigkeit bedeutet dies eine deutlich größere Ausdehnung der geoelektrisch wirksamen Auflockerungszone gegenüber den sonst gemessenen Werten von ca. 0.5 m. Eine Ursache dafür könnte die Auffahrung des Versuchsortes mittels Sprengtechnik sein.

#### *Ergebnis der Wiederholungsmessung*

Aufgrund der etwas ungewöhnlichen Ergebnisse der ersten Messung im Bernburger Anhydrit wurde eine Wiederholungsmessung im November 1997 und eine weitere Messung im Mai 1998 durchgeführt. Da die bei der ersten Messung verwendete Apparatur (GGA30) nicht



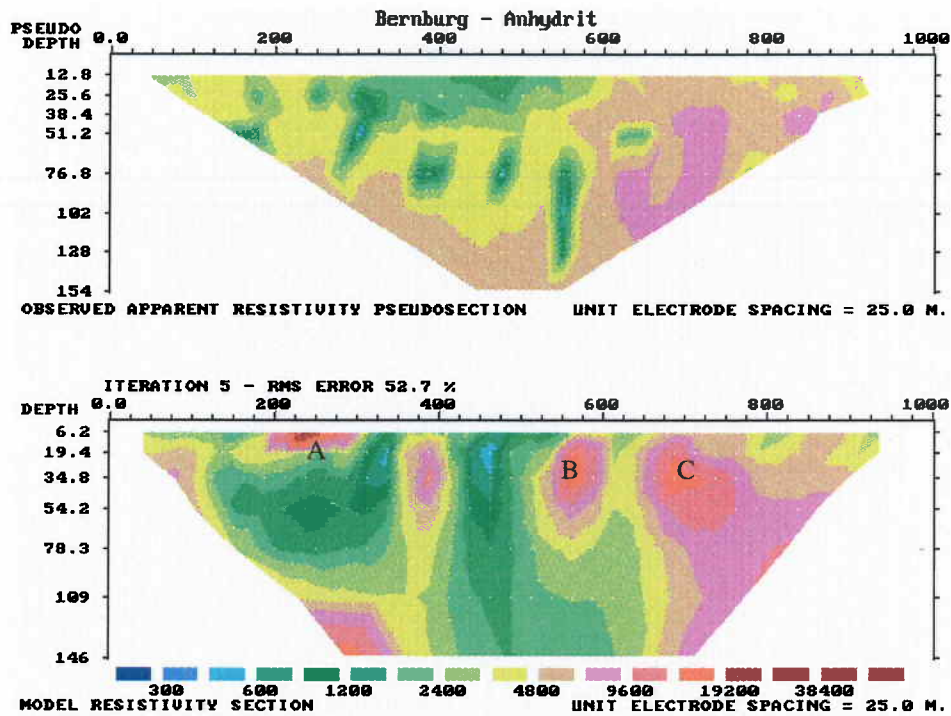


Abb. 2.8 Verteilung der scheinbaren und spezifischen Widerstände im Bernburger Anhydrit (Frühjahr 1994).

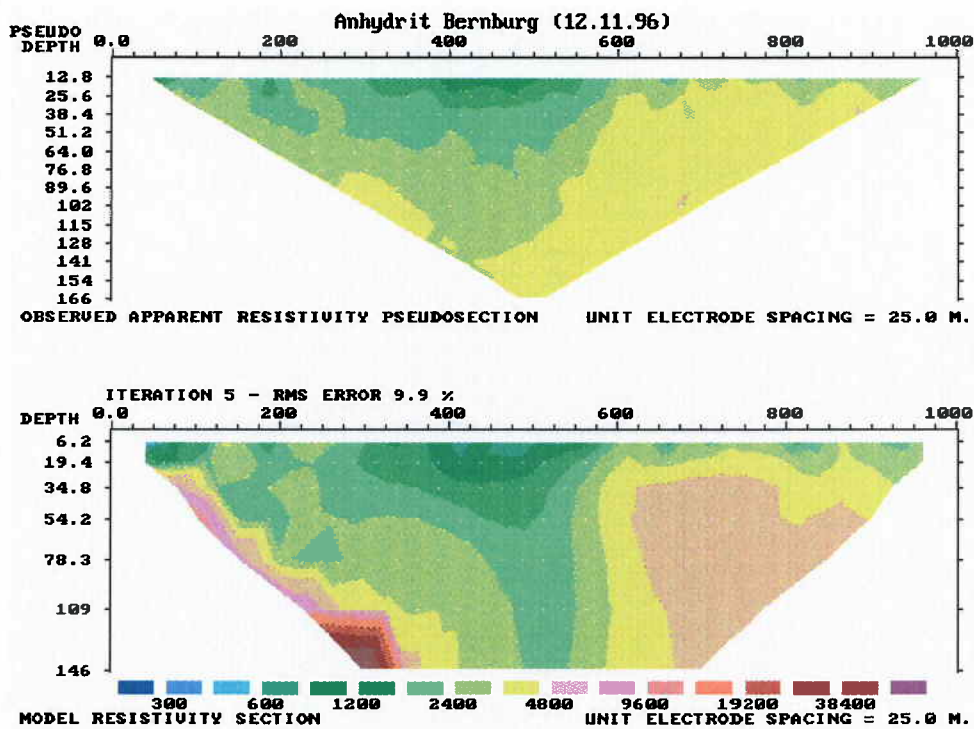


Abb. 2.9 Verteilung der scheinbaren und spezifischen Widerstände im Bernburger Anhydrit (November 1996).

mehr zur Verfügung stand, wurde auf eine alternative Meßanlage (Syscal R2) zurückgegriffen. Die Messungen wurden nach demselben Verfahren wie die erste Messung invertiert und dieselbe logarithmische Farbskala zur Darstellung genutzt (Abb. 2.9).

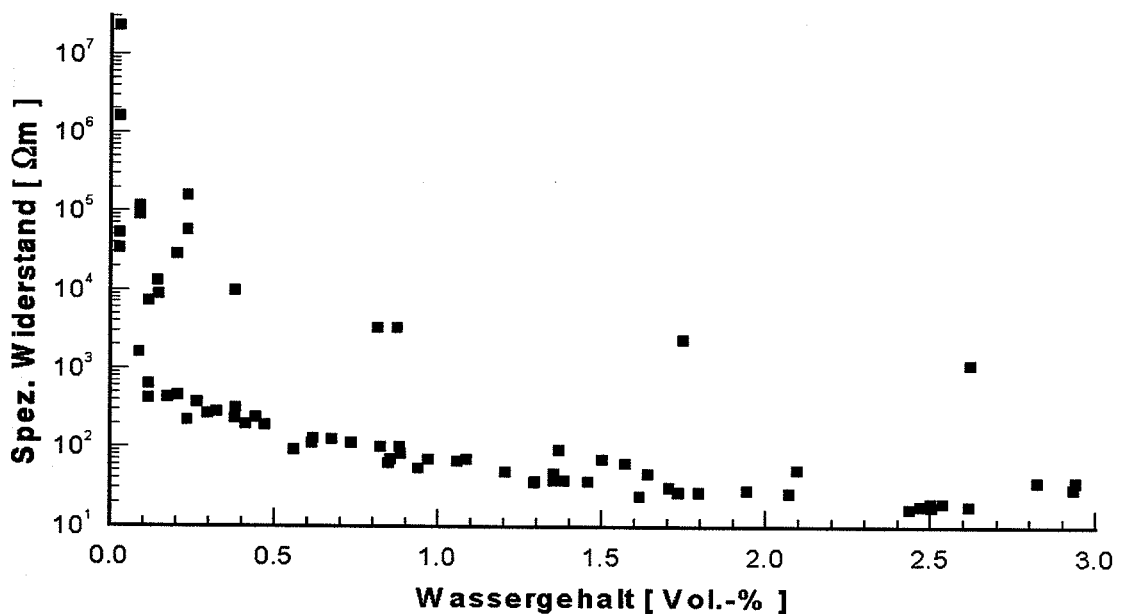
Die kleinräumigen Anomalien der ersten Messung (A-C) sind in der invertierten Sektion der zweiten Messung nicht mehr vorhanden. Ansonsten ergibt sich aber eine gleichartige Verteilung der Widerstandswerte. Der linke und mittlere Bereich des Profils ist mit ca.  $2 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$  deutlich leitfähiger als der rechte Bereich mit ca.  $5 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$ . Gegenüber der ersten Messung ist dieser Bereich um einen Faktor 2 leitfähiger geworden. Sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Messung ist im zentralen Profiltail eine oberflächennahe Anomalie geringeren Widerstandes mit  $\leq 600 \Omega\text{m}$  zu erkennen. Eine Korrelation dieser Anomalie mit einem feuchteren Bereich ist nicht eindeutig vorzunehmen.

Wie schon bei der ersten Messung ist eine Auflockerungszone in der Tiefe nicht abzugrenzen. Es gibt keine Hinweise darauf, daß die höheren Widerstandswerte im rechten Bereich des Profils auf eine Änderung der Lithologie zurückzuführen sind. Entweder handelt es sich dabei um eine Art topographischen Effekt da dieser Bereich näher am Abschluß der Versuchskammer liegt und die zunehmende dreidimensionale Struktur nicht ausreichend in dem 2D-Inversionsprogramm berücksichtigt wird. Eine andere Erklärungsmöglichkeit wäre Verringerung des Wassergehaltes in diesem Bereich. Dies kann durch eine erhöhte Entsättigung in diesem Bereich oder durch eine geringere Porosität als in anderen Gebirgsbereichen erfolgen. In Anbetracht der sprengenden Auffahrung des Versuchsortes in mehreren Abschlüssen ist eine inhomogene Entstehung der Porosität in der entstehenden Auflockerungszone durchaus denkbar, aber mit den derzeit vorhandenen Daten nicht zu belegen.

Das Ergebnis einer weiteren Wiederholungsmessung, 15 Monate später, war mit Abb. 2.9 nahezu identisch. Es kann davon ausgegangen werden, daß sich die Auflockerungszone nicht mehr wesentlich ändern wird. Zur Absicherung dieses Ergebnisses soll eine weitere Messung stattfinden.

### **2.3.5 Kalibriermessungen im Labor**

In Abbildung 2.10 sind die Ergebnisse von Messungen an Anhydritproben aus einem früheren Projekt dargestellt.



**Abb. 2.10** Laborergebnisse an Anhydritproben.

Man erkennt deutlich den Trend zu geringeren Widerständen bei größeren Wassergehalten. Bis auf einzelne Proben ist die Streuung der Werte bei Wassergehalten über 0.5 % relativ gering. Bei sehr niedrigen Wassergehalten nimmt die Streuung dagegen stark zu, da sich schon geringste Schwankungen bei der Probenvorbereitung negativ auf den Meßwert auswirken.

Die in Bernburg durch die Inversion festgestellten spezifischen Widerstände liegen mit  $2 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$  bzw.  $5 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$  im Bereich der niedrigen Wassergehalte. Nach den Labormessungen entspricht dies ungefähr Wassergehalten  $< 0.1 \text{ Vol.-%}$ . Führt man die invertierten Widerstandsschwankungen nicht auf topographische Effekte, sondern auf Wassergehaltsänderungen zurück, so ist eine genaue Quantifizierung schwierig. Davon ausgehend, daß eine Beziehung zwischen Resistivität und Wassergehalt, wie sie bei höheren Wassergehalten nachgewiesen wurde, auch bei diesen niedrigen Wasseranteilen besteht, lassen sich am Bernburger Versuchsort ein „feuchter“ und trockener Bereich abgrenzen. Nach den Labormessungen liegen die Wassergehaltsunterschiede im Bereich von weniger als  $0.05 \text{ Vol.-%}$ .

### **3 Mechanische Eigenschaften des Anhydrits**

Da im Anhydrit aufgrund seines elastischen Verhaltens Spannungen nicht durch Konvergenz abgebaut werden, muß das Verhalten gegenüber Belastungen untersucht werden, um die Barrierewirkung abschätzen zu können. Es wurden Anhydritproben sowohl einer mechanischen als auch einer thermischen Belastung unterzogen und die sich ergebenden Änderungen der elastischen Parameter bestimmt.

#### **3.1 Bereitstellung von Algorithmen zur seismischen 3D-Erkundung**

Die Software-Entwicklung für die Auswertung seismischer Signale zerfällt in zwei Teile:

- Programme für die Auswertung der Schallemissionssignale nach seismologischen Auswerteverfahren (Abschn. 3.1.1).
- Programme für die Auswertung der Durchschallungsmessungen (Abschn. 3.1.2).

##### **3.1.1 Weiterentwicklung vorhandener Auswerteprogramme**

Es war geplant, die vorhandenen Auswerteprogramme, die die Ortung der seismischen Signale und die Berechnung der Herdparameter beinhalten, zu einem leistungsfähigen Programmpaket zusammenzufassen und mit einer entsprechenden Oberfläche zu versehen. Es ist aber anzumerken, daß der Herdmechanismus, der für die Interpretation sehr wichtig ist, nicht bestimmt werden kann. Als uns daher aus der Literatur bekannt wurde, daß eine kanadische Arbeitsgruppe ein solches Gesamtpaket bereits auf dem Markt anbietet, wurden die eigenen Entwicklungen eingestellt. Für zukünftige Arbeiten soll das Programmpaket HYPERION der Fa. ESG, Kingston, Ontario benutzt werden, das bereits käuflich erworben wurde.

Der Stand der eigenen Entwicklungen der Software für tomographische Untersuchungen wird im folgenden Abschnitt kurz umrissen.

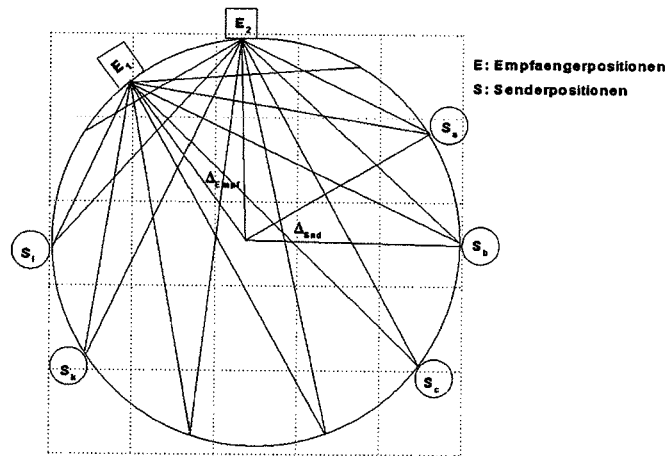
### 3.1.2 Seismische Tomographie

Das Ziel der seismischen Tomographie ist es, durch zerstörungsfreie Messungen auf die elastischen Eigenschaften in einem Gesteinskörper zu schließen. Diese elastischen Eigenschaften wiederum können mit petrophysikalischen Parametern wie Dichte und Porosität in Beziehung gesetzt werden.

Bei der aktiven seismischen Tomographie werden eine Quelle und ein Empfänger für elastische Wellen eingesetzt. Bei der passiven seismischen Tomographie, dem sog. Passive Seismic Imaging, werden natürliche Quellen, wie z.B. Schallemissionen, genutzt.

#### *Prinzip der aktiven/passiven seismischen Tomographie*

Ein Merkmal aller tomographischer Auswertemethoden ist die Tatsache, daß aus Messungen auf dem Rand, den sog. Projektionen, Aussagen auf die inneren Eigenschaften eines Körpers getroffen werden. Bei der hier behandelten Laufzeit-Tomographie werden die Laufzeiten der seismischen Kompressionswellen zwischen einem Sender und einem Empfänger (Abb. 3.1) gemessen. Durch Kombination vieler solcher Messungen läßt sich die Geschwindigkeitsverteilung im Inneren des Körpers (hier ein Bohrkern) berechnen. Bei den von uns verwendeten Algorithmen ART (Algebraic Reconstruction Technique) und SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) wird der Körper, zunächst eine Ebene (2D-Körper) in Zellen eingeteilt, in denen die Geschwindigkeit als konstant angesehen werden darf. Diese Zellen müssen demnach deutlich kleiner als die Ausdehnung der zu erwartenden Störkörper sein. Des weiteren werden die Laufwege durch Geraden angenähert, d.h. Brechungseffekte werden vernachlässigt. Dies ist in erster Näherung zulässig, da die zu erwartenden Geschwindigkeitsunterschiede relativ gering sind. Trotzdem wird die Anwendbarkeit dieser Vereinfachung demnächst anhand von Körpern mit bekannten Geschwindigkeitsanomalien überprüft.



**Abb. 3.1** Prinzip der aktiven seismischen Tomographie ohne Strahlenbrechung.

### *Auswertelgorithmen*

Bei allen tomographischen Auswertemethoden wird durch Messungen auf dem Rand oder der Oberfläche, den sog. Projektionen, auf die inneren Eigenschaften eines Körpers oder Gebirgsbereiches geschlossen. Bei der hier angewendeten Laufzeit-Tomographie werden die Laufzeiten der seismischen Kompressionswellen zwischen einem Sender und Empfänger gemessen. Durch Kombination vieler Einzelmessungen läßt sich die Geschwindigkeitsverteilung im Inneren eines Bohrkerns berechnen. Bei den verwendeten Algorithmen ART (Algebraic Reconstruction Technique) wird die untersuchte Ebene in Zellen eingeteilt, in denen die Geschwindigkeit als konstant angesehen werden kann. Aufgrund der zu erwartenden Geschwindigkeitsanomalien können die Brechungseffekte vernachlässigt werden.

### *Der ART-Algorithmus*

Bei dem ART-Algorithmus (**A**lgebraic **R**econstruction **T**echnique) handelt es sich um einen Iterationsprozeß, der die Geschwindigkeitsverteilung von einem Startmodell aus schrittweise an die Meßwerte anpaßt. Dabei werden zunächst aufgrund des Startmodells die Laufzeiten berechnet und mit den tatsächlichen Meßwerten verglichen. Der auftretende Unterschied wird zur Berechnung eines neuen Modells mit einer verbesserten Verteilung der Geschwindigkeit verwendet. Von diesem Modell werden dann erneut die theoretischen Werte der Laufzeiten berechnet und mit den tatsächlichen Meßwerten verglichen. Diese Schritte

werden solange wiederholt, bis die modellierten und die tatsächlichen Werte sich nur noch um eine vorgegebene Genauigkeitsschwelle unterscheiden.

Dazu wird über die zu untersuchende Ebene des Bohrkerns ein rechtwinkeliges Gitter gelegt (Abb. 3.1). Von der gewählten Zellengröße ist die spätere Auflösung des Modells abhängig. Gleichzeitig steigen aber auch die Anforderungen an die Meßwertaufnahme. Wie bei der Besprechung der Modellrechnungen (s.u.) genauer ausgeführt werden wird, bedeutet eine höhere Auflösung des Modells auch zwangsläufig einen steigenden Meß- und Rechenaufwand. Die Untersuchungen, die diesem Bericht zugrunde liegen, dienen unter anderem dazu, für die zu erwartenden Geschwindigkeitsanomalien die optimalen Versuchsparameter zu bestimmen. Dies ist vor allem deshalb notwendig, da die Qualität des Endergebnisses wesentlich durch die Konfiguration des Experimentes mitbestimmt wird.

Jeder Zelle des Modellgitters wird als Startmodell eine Geschwindigkeit zugeteilt. Aus rechen-technischen Gründen wird statt der Geschwindigkeit ( $v$ ) bei der Beschreibung der Algorithmen auf den Kehrwert zurückgegriffen. Er wird in Analogie als "Slowness" bezeichnet. Da die deutsche Übersetzung (etwa: Langsamkeit) nicht üblich ist, wird auch im folgenden der englische Begriff verwendet. Des weiteren wird der Laufweg zwischen Sender und Empfänger der elastischen Welle als "Strahl" bezeichnet. Da die zu erwartenden Geschwindigkeitsunterschiede relativ klein sind, werden Brechungserscheinungen nicht berücksichtigt. Die Strahlen werden als gerade Verbindungen zwischen Sender und Empfänger angesehen. Inwieweit diese Annahme berechtigt ist, wird die Auswertung der ersten tatsächlichen Meßwerte zeigen. Im folgenden stehen die tiefgestellten Indizes für die Nummer des Strahls, also der Durchschallungskonfiguration, und hochgestellte Indizes für die Zellennummer. Des weiteren liegt ein Modell nach dem  $k$ -ten Iterationsschritt (für das Startmodell ist  $k = 0$ ) vor. Dann berechnet sich die  $(k + 1)$ -te-Verbesserung der Slowness für die Zelle ( $i$ ) aufgrund der Meßergebnisse des Strahles ( $j$ ) nach der Formel:

$$p_j^{i[k+1]} = p_j^{i[k]} + \frac{\Delta t^i d_j^i}{\sum_j d_j^{i^2}}$$

Dabei bezeichnet  $\Delta t^i$  die Differenz zwischen modellierter Laufzeit und gemessener Laufzeit für den  $i$ -ten Strahl und  $d_j^i$  den Laufweg von Strahl  $i$  durch die Zelle  $j$ .

Vor der eigentlichen Iteration werden die Laufwege der einzelnen Strahlen durch die Zellen bestimmt. Die meisten dieser  $d_j^i$  sind allerdings Null, da jeder Strahl, bezogen auf das Gesamtmodell, nur durch sehr wenige Zellen läuft. Nach diesem Schritt wird aufgrund der vorgegebenen Slowness-Verteilung für den Strahl 1 die theoretische Laufzeit berechnet und die Differenz zur (für diesen Strahl) gemessenen Laufzeit bestimmt. Nach obiger Formel wird dann aufgrund dieses Strahls für jede Zelle eine Slowness-Verbesserung berechnet und sofort dem Modell zugeordnet. Die Zellen, die nicht von dem Strahl durchlaufen werden ( $d_j^i = 0$ ), erfahren keine Slowness-Veränderung. Nachdem dieser Prozeß für den ersten Strahl abgeschlossen ist, wird der nächste Strahl betrachtet. Sind alle Strahlen einmal durchlaufen, beginnt der Prozeß wieder bei Strahl Nummer 1. Diese Iteration wird solange wiederholt, bis die Abweichungen zwischen den modellierten und gemessenen Laufzeiten für alle Strahlen unter einer vorgegebenen Fehlergrenze liegen.

Eine genauere Beschreibung des Algorithmus sowie der numerischen Hintergründe findet man in der angegebenen Fachliteratur.

### *Der SIRT-Algorithmus*

Der SIRT-Algorithmus (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) beruht auf demselben Verfahren wie der ART-Algorithmus. Der Unterschied zwischen beiden Methoden besteht lediglich darin, daß beim SIRT-Algorithmus zunächst die Slowness-Verbesserungen jeder Zelle für alle Strahlen berechnet werden, ohne sie direkt am Modell anzubringen. Erst wenn alle Strahlen einmal durchlaufen worden sind, werden die bestimmten Slowness-Verbesserungen für jede Zelle gemittelt und erst dann am Modell angebracht.

$$p_j^{i[k+1]} = p_j^{i[k]} + \frac{1}{N_{\text{Strahl}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Strahl}}} \frac{\Delta t^i d_j^i}{\sum_j d_j^{i^2}}$$



## Der MART-Algorithmus

Beim MART-Algorithmus (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) werden die Verbesserungen der Slowness nicht additiv, sondern multiplikativ vorgenommen. Dabei wird wie beim normalen ART-Algorithmus, die Slowness-Verbesserung für jeden Strahl und jede Zelle berechnet und sofort am Modell angebracht. Jeder Strahl benutzt ein anderes (verbessertes) Slowness-Modell. Für die neue Slowness gilt:

$$p_j^{i[k+1]} = p_j^{i[k]} \cdot \left[ \frac{t^i}{\sum_{j=1}^{N_{Zelle}} d_j^i p_j^{i[k]}} \right]^{\eta^i d_j^i}$$

Da es sich um ein multiplikatives Modell handelt, muß als Startmodell eine von Null verschiedene Slowness-Belegung vorgegeben werden. Sind keine Informationen vorhanden, so wird jede Zelle mit der Slowness  $1/e$  belegt.

Der entscheidende Parameter in dieser Formel ist der Wichtungsfaktor  $\eta$ , der für jeden Strahl ( $i$ ) anders gewählt werden kann. Der Grundgedanke ist der, daß kurze Strahlen die Slowness der durchlaufenen Zellen in der Rekonstruktion stärker beeinflussen sollen als lange Strahlen. Dies ist intuitiv nachvollziehbar, da bei kurzen Strahlen die Laufzeitunterschiede nur durch wenige fehlerhafte Slowness-Belegungen verursacht werden können, während bei langen Strahlen sich die Laufzeitunterschiede auf Fehler in vielen Zellen verteilen. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß zur Zeit nur wenige Erfahrungen mit diesem Algorithmus vorliegen.

## Modellrechnungen

Die Modellrechnungen sollen dazu dienen, Versuchsparameter wie Strahlenanzahl, Empfänger- und Senderpositionen für bestimmte zu erwartende Anomalien vorzugeben. Dabei soll herausgefunden werden, welche experimentellen Mindestanforderungen gestellt werden müssen, um den Versuchsaufwand möglichst gering zu halten, aber dennoch gute Rekonstruktionen zu erzielen. Demzufolge wurden verschiedene Algorithmen (ART/SIRT/MART) implementiert und getestet mit dem Ziel, eine Verringerung des Versuchsaufwandes durch bessere Rechenprogramme zu erreichen.

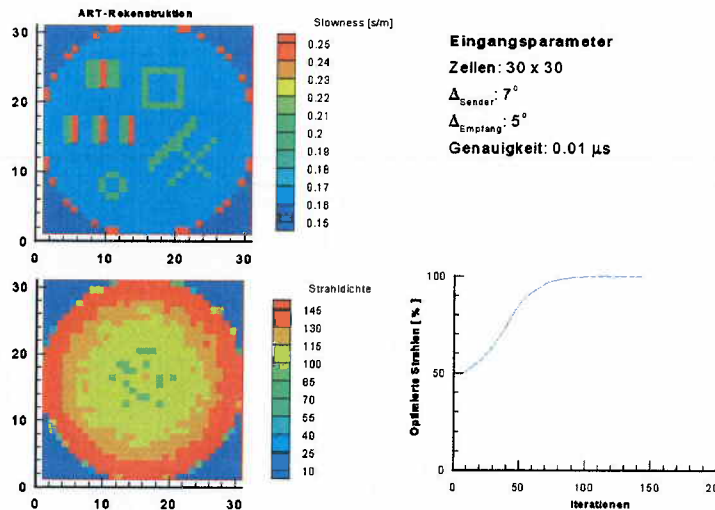
Während der ersten Programmentwicklung wurden zur Überprüfung einzelner Programmteile sehr kleine Modelle mit zum Teil nur 25 ( $5 \cdot 5$ ) Zellen gerechnet. Diese Modelle haben keinerlei weiterreichende Bedeutung und werden aus diesem Grunde hier nicht dokumentiert.

Aufgrund der grundlegenden Randbedingungen der Versuchskonfiguration, wie z.B. Wellenlänge (ca. 6 mm) und Probendurchmesser (ca. 10 cm), wurde zunächst ein Zellengitter von  $50 \cdot 50$  Zellen, dies entspricht einer Zellengröße von  $2 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm}$ , als angemessen angesehen.

Das Testmodell Nr. 1 besteht aus einem Grundmaterial mit darin eingebetteten verschiedenen Geschwindigkeitsanomalien, die sich teilweise an den zu erwartenden Störkörpern orientieren (Bruchzone) oder lediglich zur Überprüfung der Rekonstruktionsgenauigkeit (kleine Ausdehnung, kleine Kontraste) eingebaut wurden.

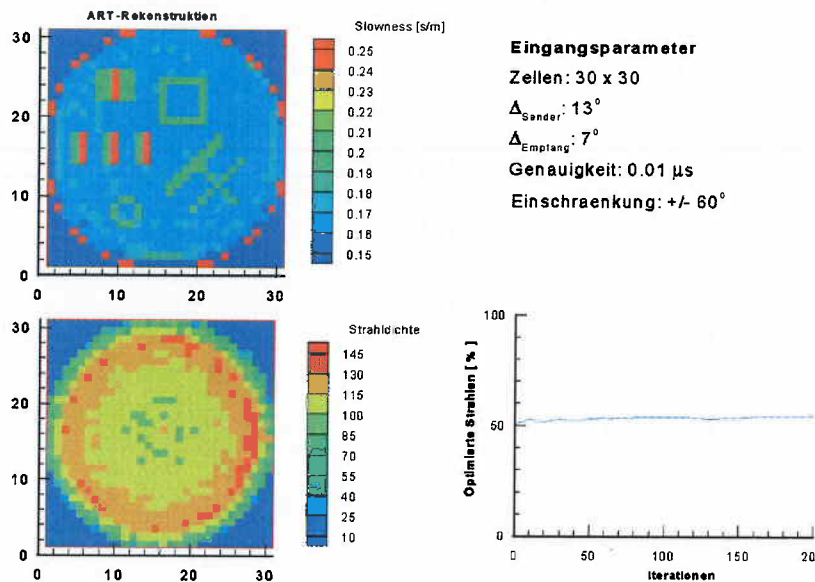
In einem ersten Schritt wurde die Genauigkeit der verwendeten Algorithmen überprüft. Dazu wurde eine nahezu ideale Strahlenverteilung angenommen. Bei einer festen Position des Empfängers wird zwischen den einzelnen Durchschallungen der Sender um jeweils 5 Grad versetzt. Nachdem auf diese Weise der gesamte Kernumfang, mit Ausnahme der Empfängerposition selbst, von dem Sender abgefahren wurde, wird die Empfängerposition um 7 Grad versetzt und der Sender nacheinander erneut auf nahezu alle möglichen Positionen des Kernumfangs plziert. Dies ergibt eine sehr hohe Strahlenanzahl von bis zu knapp 3500 Strahlen, also Einzelmessungen. Anhand des Modells wurden die (theoretischen) Laufzeiten der einzelnen Strahlen berechnet.

Mit Hilfe dieser simulierten Meßwerte wurde durch den jeweiligen Algorithmus eine Rekonstruktion, ein sog. Tomogramm, erstellt. Da es sich um eine ideale Strahlenüberdeckung und ideale Meßwerte handelte, sollte dies ein Test für die prinzipielle Rechengenauigkeit der verschiedenen Algorithmen sein.



**Abb. 3.2** Modellrechnungen mit dem ART-Algorithmus.

Zunächst wurde dieses Verfahren auf den ART-Algorithmus angewendet. Wie man aus Bild (Abb. 3.2) sieht, wird das Testmodell bei den höheren Strahlenüberdeckungen nahezu perfekt wiedergegeben. Dies bezieht sich nicht nur auf die laterale Abgrenzung aller Anomalien, sondern auch auf die Quantifizierung der Geschwindigkeitskontraste. Anhand dieser Berechnungen kann man die mindestens benötigte Strahlenüberdeckung der Zellen bei den erwarteten Geschwindigkeitsanomalien abschätzen. Das Diagramm der Strahlenanzahl in den einzelnen Zellen (Abb. 3.3 "Strahlendichte") zeigt eine größere "Ausleuchtung" in den Randbereichen mit teilweise über 120 Strahlen/Zelle. Dies ist eine Folge der Zulassung von Senderpositionen sehr dicht an dem Empfänger. In der Praxis ist dies nicht möglich, da alleine aufgrund der räumlichen Ausdehnung von Sender und Empfänger gewisse Mindestabstände nicht unterschritten werden können. Zusätzlich strahlt der Sender nicht nach allen Seiten gleichmäßig Energie ab. Am stärksten ist die Abstrahlung in Richtung auf den Kernmittelpunkt. Zu den Seiten hin nimmt die Signalenergie rasch ab. Bei den Messungen an Kalibrierkörpern aus Stahl (s.u.) hat sich gezeigt, daß für die verwendete Meßapparatur ein Winkelabstand zwischen Sender und Empfänger von ca. 60° nur wenig unterschritten werden kann. Eventuell ist es möglich, durch Stapelung der einzelnen Signale das Signal/Noise-Verhältnis so weit zu verbessern, daß auch eine Unterschreitung dieses Winkels, auch an realen Gesteinen, möglich wird.



**Abb. 3.3** Modellrechnungen mit dem ART-Algorithmus bei verringerter Strahlanzahl.

Nachdem die prinzipielle Arbeitsweise des Algorithmus anhand der idealen Daten überprüft worden war, wurden die immer noch idealen Daten der voraussichtlichen Konfiguration des Experimentes weiter angepaßt. In einem zweiten Schritt wurden alle Strahlen vernachlässigt, bei denen Sender und Empfänger einen Winkel von weniger als 60° zueinander bildeten.

Wie aus Abbildung 3.3 ersichtlich ist, führt die Rekonstruktion trotz einer Vergrößerung des Senderabstandes auf 13 Grad, und damit einer Verringerung der Strahlanzahl und Überdeckung, zu einem befriedigenden Ergebnis.

Es wurden noch zahlreiche weitere Tests mit anderen Eingangsmodellen und den anderen Algorithmen durchgeführt. Sie erbrachten aber alle deutlich schlechtere Ergebnisse als die Rekonstruktionen des ART-Algorithmus, so daß für weitere Untersuchungen auf den ART-Algorithmus zurückgegriffen werden sollte.

### 3.2 Ultraschallmessungen

Wie schon aus dem Prinzip der tomographischen Auswertung klar hervorgeht, verlangt die Anwendung dieses Verfahrens eine große Anzahl von Strahlen (Sender-Empfänger Kombi-

nationen), um gute Rekonstruktionen zu erhalten. Zur Durchschallung von Laborproben und insbesondere von Bohrkernen wurde deshalb die Konstruktion und der Bau eines geeigneten Positionierungsgerätes für den Sender und Empfänger notwendig. Da es sich um eine echte Entwicklung während dieses Projektes handelt, wird das Gerät im folgenden etwas ausführlicher beschrieben.

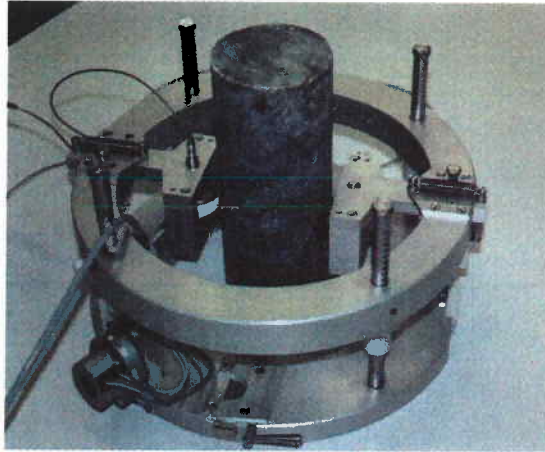
### *Das Prüfkarussell*

Bei der eigentlichen Meßapparatur handelt es sich um die Kombination mehrerer handelsüblicher Geräte. Das Kernstück der Anlage, das Prüfkarussell, ist allerdings eine Spezialanfertigung für die GRS (Abb. 3.4).

Das Prüfkarussell besteht aus zwei Ringen, die über vier Verstrebungen miteinander verbunden sind. Der untere Ring liegt auf dem eigentlichen Standring auf. In diesem unteren Ring befindet sich eine Zentriervorrichtung, mit der die zu untersuchenden Bohrkern zentriert in die Apparatur eingesetzt werden können. Dazu wird einer der drei Auflagepunkte über eine Skala auf den entsprechenden Kerndurchmesser eingestellt und der Kern zwischen den drei Auflagepunkten eingepaßt. Diese Zentrierung bleibt während der gesamten Messung erhalten.

Zwischen dem unteren Ring und dem durch ihn verdeckten Standring sind Rollen angebracht, die es ermöglichen, den unteren Ring und damit die Verstrebungen und den oberen Ring in 1°-Schritten um die Mittelachse der Apparatur zu drehen. Diese Drehungen werden durch einen Schrittmotor mit angeschlossener Elektroneinheit am unteren Standring erreicht.

Die Elektroneinheit verfügt über drei Druckknopf- und zwei Kippschalter sowie ein 3-stelliges Display. Über den ersten Kippschalter wird die Drehrichtung der Apparatur eingestellt, der zweite Kippschalter legt die Größe der einzelnen Drehschritte fest. Es kann zwischen 1°- und 15°-Schritten gewählt werden. Der erste der Druckschalter mit der Aufschrift *Lauf* dient zur Rückführung der Anlage auf den Nullpunkt. Mit dem zweiten Druckschalter mit der Aufschrift *Schritt* kann die Apparatur um einen *Schritt* weiterbewegt werden. Der dritte Druckschalter mit der Aufschrift *Null* dient zur Rücksetzung des Displays. Mit ihm kann die aktuelle Lage der Apparatur als Nulllage fixiert werden.



**Abb. 3.4** Das Prüfkarussell mit einem Bohrkern aus Anhydrit.

Am oberen Ring, der durch Rasterungen an den Verstrebungen komplett höhenverstellbar ist, sind zwei gegenüberliegende Prüfkopfschlitten angebracht. In diesen Schlitten befinden sich die Rollenprüfköpfe. Die Schlitten werden mit einer Feder an die Probe gedrückt. Für die gewählte Experimentkonfiguration bei der Tomogrammaufnahme wird allerdings nur der Schlitten mit dem Sendeprüfkopf benötigt. Der andere Schlitten wird aus Platzgründen vom oberen Ring abgeschraubt, kann aber im Bedarfsfall, z.B. für radiale Durchschallungen, jederzeit wieder angebracht werden.

Bei den Rollenprüfköpfen handelt es sich um eine Spezialanfertigung der Firma Krautkrämer. Die mittlere Frequenz der Köpfe liegt bei 1 MHz. Die eigentlichen Sensoren sind an der feststehenden Achse fest angebracht und drehen sich nicht mit. Sie werden ohne Eigenrotation um die Probe bewegt. Die Rollen sind mit einer Flüssigkeit gefüllt, die die akustische Ankopplung zwischen Probe und Sensor gewährleistet.

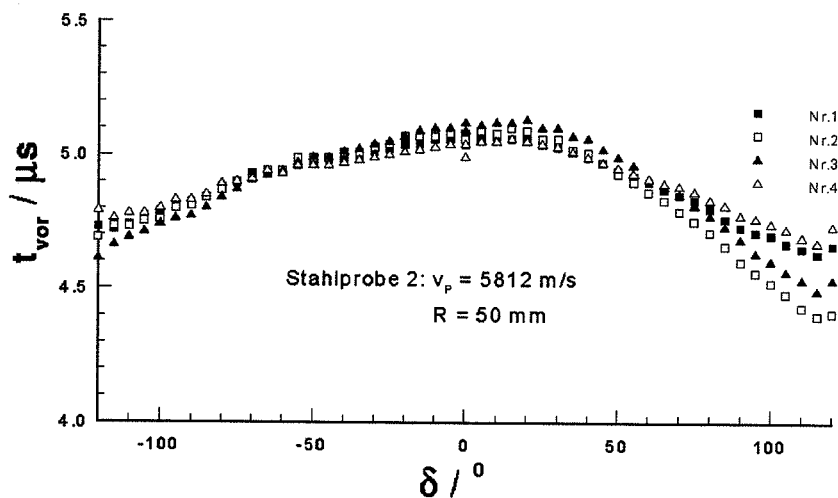
Die Prüfköpfe werden derzeit noch an eine handelsübliche Durchschallungsapparatur der Firma Krautkrämer angeschlossen. Mit dieser Apparatur ist die Bestimmung der Laufzeit eines nicht näher aufgeschlüsselten Signals durch die Probe routinemäßig möglich. Die maximal erreichbare Genauigkeit liegt nach den bisherigen Erfahrungen durch Messungen an homogenen Stahlkörpern bei ca.  $0.02 \mu\text{s}$ . Die gemessenen Zeiten können automatisch über eine bestimmte Zeitspanne gemittelt werden. Eine Aufzeichnung des Quell- bzw. Meßsignals ist nicht möglich. Eine Stapelung der Registrierungen ist mit dieser Apparatur ebenfalls nicht möglich. Dadurch kann es bei den Messungen weit außerhalb der Durchschallungen entlang eines Durchmessers zu Schwierigkeiten aufgrund des schlechten Signal-/Rausch-

Verhältnisses kommen. Der Rollenprüfkopf kann über die kleine Kontaktfläche zum Gestein nur wenig Energie in seitliche Bereiche abstrahlen.

Ein wesentliches Element bei der Aufnahme korrekter Meßdaten (Laufzeiten) ist die reproduzierbare Ankopplung beider Meßköpfe (Sender und Empfänger). Der Ankopplungsdruck des Rollenprüfkopfes (Sender) wird von einer Feder gehalten. Da die Krümmungsradien des Kopfes und der Probe sich über den gesamten Umfang nicht ändern, kann auch die Größe der Kontaktfläche als konstant angesehen werden. Zur Überprüfung der Ankopplungsbedingungen wurde der Rollenprüfkopf bei fest verankertem Empfänger zwischen verschiedenen Positionen bewegt. Die gemessene Laufzeit war nach einigen Bewegungen des Rollenprüfkopfes für alle Winkel reproduzierbar. Dies bedeutet für das Experiment, daß vor der eigentlichen Messung der Rollenprüfkopf zunächst um die Probe herumgefahren werden muß, um reproduzierbare Ankopplungsbedingungen zu gewährleisten.

Diese Versuche wurden an einem homogenen Stahlkörper, im folgenden als Stahl 2 bezeichnet, durchgeführt. Zunächst wurde anhand klassischer Ultraschalltechniken, wie sie seit Jahren im gesteinsmechanischen Labor durchgeführt werden, die Kompressionswellengeschwindigkeit in der Probe gemessen. Es ergab sich ein Mittelwert von  $v_p = 5812$  m/s. Dieser Wert wird für die Bestimmung der Vorlaufzeiten ( $t_{vor}$ ) der Meßkonfiguration benutzt. Die gemessene Zeit ( $t_{mess}$ ) ergibt sich als Summe der Laufzeit durch die Probe ( $t_{probe}$ ) und der Vorlaufzeit.

Um die Reproduzierbarkeit der Ankopplungsbedingungen zu testen, wurde zunächst für eine Ankopplung die Vorlaufzeit in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Sender und Empfänger gemessen. Anschließend wurde der Empfänger entfernt und erneut an derselben Stelle der Probe angekoppelt und wieder die Vorlaufzeit bestimmt. Die Vorlaufzeiten liegen in der Größenordnung von  $5 \mu s$ , was ca. 25 % der Gesamtlaufzeit entspricht. Demzufolge muß der Einfluß der Vorlaufzeit unbedingt korrigiert werden, um korrekte Geschwindigkeitswerte zu bekommen. Da die Probe als homogen angesehen wird, sollten die Vorlaufzeiten symmetrisch um den Winkel  $d = 0^\circ$  sein. Falls die Ankopplungen gut reproduzierbar sind, sollten die Kurven für verschiedene Ankopplungen zusätzlich zusammen fallen. Des weiteren sollten die Kurven unabhängig von der absoluten Position des Empfängers auf der Probe sein.



**Abb. 3.5** Vorlaufzeiten an einer homogenen Stahlprobe.

In Abbildung 3.5 sind die gemessenen Kurven für verschiedene Ankopplungen und Empfängerpositionen dargestellt. Die Kurven fallen fast zusammen, was für die Reproduzierbarkeit der Ankopplung und für die Homogenität der Probe spricht. Aufgrund dieser Erfahrung ist es möglich, eine Korrekturkurve für diese Meßkonfiguration anzugeben, die an späteren realen Messungen, bei denen die Vorlaufzeit wegen unbekannter Geschwindigkeitsverteilung nicht mehr explizit zu erfassen ist, als Korrektur angebracht werden kann.

#### *Testmessungen an einem Alu-Körper*

Um die Algorithmen und die Datensatzaufnahme zu testen, wurde die Laufzeitverteilung an einem künstlichen Bohrkern aus Aluminium mit definierten Laufzeitanomalien durchgeführt. Diese Anomalien bestanden in wassergefüllten Bohrlöchern unterschiedlichen Durchmessers. Zunächst wurde getestet, ob mit den verwendeten Algorithmen prinzipiell diese Geschwindigkeitsanomalien rekonstruiert werden können. Diese Tests zeigten, daß eine einwandfreie Rekonstruktion möglich ist, sofern sich Brechungserscheinungen ausschließen lassen können.



Nach der Aufnahme der Datensätze mit den vorher durch die Modellrechnungen festgelegten Sender-Empfänger-Konfigurationen wurde eine Rekonstruktion mit Hilfe des ART-Algorithmus versucht. Die rekonstruierte Geschwindigkeitsverteilung spiegelte die Anomalien nur sehr undeutlich und zudem lageverzerrt wider. Dies liegt an den großen Geschwindigkeitsunterschieden in Aluminium ( $\approx 6000$  m/s) und Wasser ( $\approx 1200$  m/s), die zu Brechungerscheinungen führen, die eine Strahlenverfolgung („Ray-tracing“) erforderlich machen würden.

### **3.3 Ultraschallmessungen an Anhydrit-Probekörpern unter Belastung**

Ebenfalls wurde die Auswirkung thermischer Belastungen auf die Schallwellengeschwindigkeit (Longitudinalwellengeschwindigkeit) überprüft, wobei die Proben mehreren Aufheizzyklen bis  $96$  °C ausgesetzt wurden.

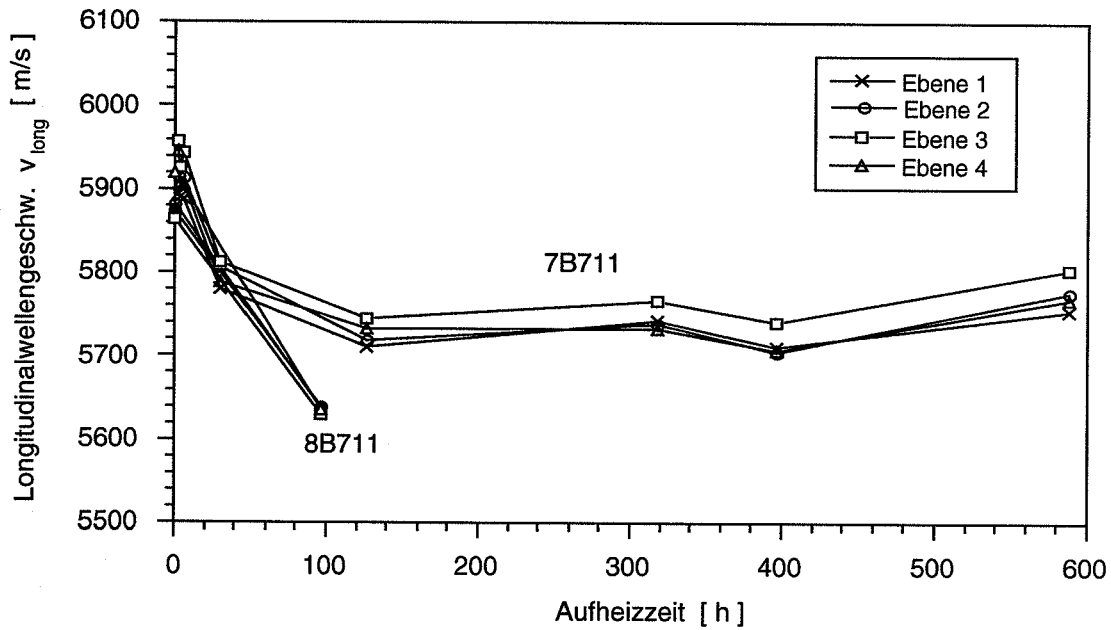
Die Abhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit wurde ebenfalls bis zu einer einaxialen Belastung bis  $70$  MPa untersucht. Hierzu wurden die Ultraschall-Laufzeitmessungen während der Belastung bestimmt.

Die Messungen wurden in vier radial angeordneten Ebenen der Probe vorgenommen.

#### **3.3.1 Temperatureinfluß auf die Ultraschallgeschwindigkeiten**

Zur Untersuchung von Temperatureinflüssen auf die Schallwellenlaufzeit wurden die Proben mehreren Aufheizzyklen bis  $96$  °C unterzogen. Für die Messungen wurden die Longitudinalwellengeschwindigkeiten betrachtet. In der Abb. 3.6 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Versuchszeit aufgetragen.

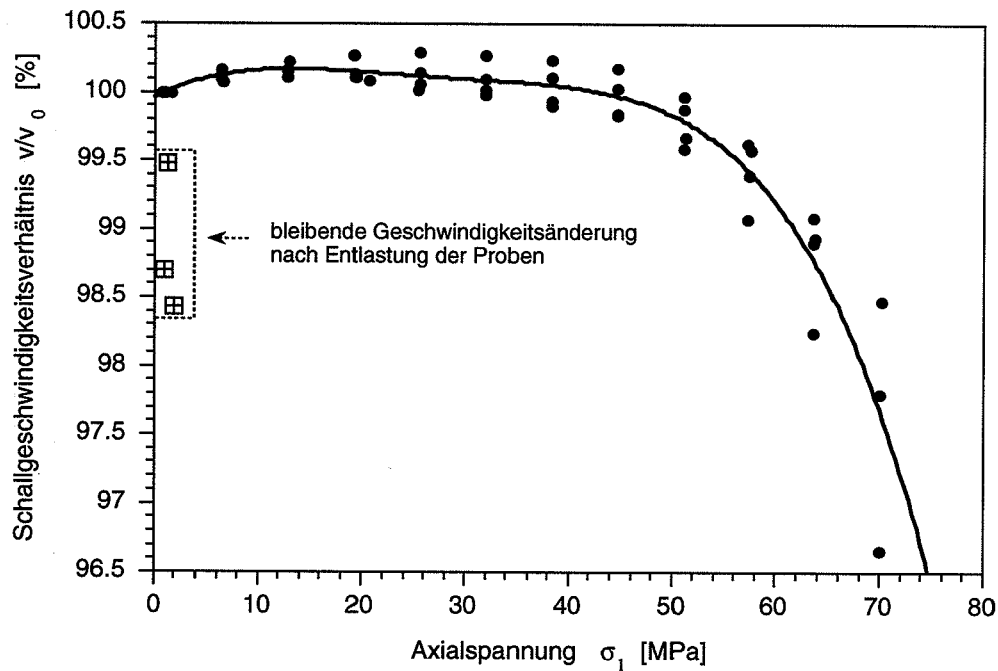
Die Ergebnisse zeigen, daß die Schallwellengeschwindigkeiten mit der Anzahl der Zyklen, d.h. mit steigender Versuchszeit abnimmt. Die Verringerung der Geschwindigkeiten kann durch eine thermisch induzierte Mikrorißbildung, die eine deutliche Auswirkung auf die Laufzeit hat, erklärt werden.



**Abb. 3.6** Abhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit von der Aufheizzeit;  
Aufheiztemperatur: 85 °C; Probe: 7B711.

### 3.3.2 Einfluß mechanischer Belastung auf die Ultraschallgeschwindigkeiten

Ebenso wie bei der thermischen Beeinflussung der Proben konnte ein Einfluß auf die Schallwellengeschwindigkeit bei einaxialer Belastung der Proben bis 70 MPa beobachtet werden (Abb. 3.7). Zunächst war bis zu ca. 12.9 MPa eine leichte Geschwindigkeitszunahme und eine sich daran anschließende Abnahme festzustellen. Bei ca. 44.6 MPa werden die Ausgangsgeschwindigkeiten unterschritten und nehmen dann bis auf ca. 96 % des Ausgangswertes stark ab. Nach Entlastung werden die Geschwindigkeiten vor Versuchsbeginn nicht wieder erreicht; die Werte liegen bei ca. 99 % des Ausgangswertes.



**Abb. 3.7** Schallgeschwindigkeit unter einaxialer Belastung einer Bernburger Anhydritprobe.

### 3.4 Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem E-Modul

Die vorherigen Untersuchungen hatten gezeigt, daß unterschiedliche Belastungszustände einen Einfluß sowohl auf die Permeabilitäten als auch auf die Ultraschallwellengeschwindigkeiten haben können. Aus diesem Grunde wurden auch Untersuchungen zum dynamischen wie auch statischen Elastizitätsmodul bei mechanischer Be- und Entlastung vorgenommen.

#### 3.4.1 Bestimmung der Elastizitätsmoduli

Zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls wird eine zylindrische Probe einaxial belastet. Aus dem Spannungs-Dehnungsdiagramm läßt sich der Elastizitätsmodul aus der Steigung im Bereich des angenähert linear-elastischen Verhaltens der Probe ermitteln. Der statische Elastizitätsmodul /GAR 79/ ist definiert als:

$$E_{\text{stat}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

mit:

$E_{\text{stat}}$  statischer Elastizitätsmodul Pa

$\Delta\sigma$  Spannungsänderung Pa

$\Delta\varepsilon$  Dehnungsänderung -

Zur Bestimmung der dynamischen elastischen Parameter werden die zylindrischen Probekörper mittels Longitudinal- und Transversalwellen durchschallt und aus deren Laufzeiten unter Berücksichtigung der Probenabmessungen die entsprechenden Longitudinalwellen- ( $v_p$ ) und Transversalwellengeschwindigkeiten ( $v_s$ ) ermittelt. Nach /MIL 78/ mit Kenntnis der Dichte  $\rho$  der Probe gelten folgende Zusammenhänge:

$$v_p = \left[ \frac{E_{\text{dyn}}}{\rho} \cdot \frac{1 - \nu_{\text{dyn}}}{(1 + \nu_{\text{dyn}}) \cdot (1 - 2\nu_{\text{dyn}})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$v_s = \left[ \frac{E_{\text{dyn}}}{\rho} \cdot \frac{1}{1 + \nu_{\text{dyn}}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  und die Querdehnungszahl  $\nu_{\text{dyn}}$  errechnen sich dann gemäß

$$E_{\text{dyn}} = \frac{v_s^2 \cdot \rho \cdot (3v_p^2 - 4v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} = 2v_s^2 \cdot \rho \cdot (1 - \nu_{\text{dyn}})$$

$$\nu_{\text{dyn}} = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}$$

mit:

$E_{\text{dyn}}$  dynamischer Elastizitätsmodul Pa

$\nu_{\text{dyn}}$  dynamische Querdehnungszahl -

$v_p$  Longitudinalwellengeschwindigkeit m/s

$v_s$  Transversalwellengeschwindigkeit m/s

$\rho$  Dichte der Probe  $\text{kg/m}^3$

Zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls wurden die Anhydritproben einaxial belastet. Da sich bei den Ultraschallmessungen gezeigt hatte, daß ab ca. 44 MPa eine Störung der Proben auftrat, wurden zunächst Untersuchungen zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls bis zu diesem axialen Spannungswert vorgenommen.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus diesen Versuchen erfolgten dann Messungen zur Ermittlung des statischen, und zum Vergleich an den gleichen Proben, auch zum dynamischen Elastizitätsmodul bei unterschiedlichen Belastungen über die 44 MPa Axialspannung hinaus bis zu 64 MPa. Diese Versuche sollten zeigen, ob durch die entsprechenden Be- und Entlastungen über 44 MPa hinaus Veränderungen auftreten können. Von Belastungen bei höheren Spannungen wurde abgesehen, da eine Probe oberhalb 64 MPa zerbrach und eine weitere Zerstörung von Probenmaterial vermieden werden sollte. Diese Untersuchungen erfolgten an Proben mit der Kennzeichnung IIB711. Die Proben wurden zunächst bis 44 MPa einaxial belastet und anschließend entlastet. Für die Be- und Entlastungspfade wurde der jeweilige Elastizitätsmodul bestimmt. Anschließend erfolgte eine erneute Be- und Entlastung der Probe bis zu einer Einaxialspannung von 64 MPa, aus denen wiederum der Elastizitätsmodul ermittelt wurde.

Die dynamischen Elastizitätsmoduln wurden zunächst an den unbelasteten Proben und anschließend nach jeder Entlastungsstufe (nach 44 MPa und nach 64 MPa) an den ausgebauten Proben bestimmt.

### **3.4.2 Ergebnisse zum statischen E-Modul**

Untersuchungen zum Verhalten des statischen Elastizitätsmoduls unter einaxialer Last zeigten bei den in der Tabelle 3.1 zusammengefaßten Proben eine deutliche Zunahme der Steifigkeit mit steigender Belastung. Die Messungen wurden bis ca. 44 MPa durchgeführt, da bis zu diesem Wert keine signifikanten Änderungen bei den Schallwellengeschwindigkei-

ten festzustellen waren, so daß davon ausgegangen werden konnte, daß keine durch die Auflast hervorgerufenen Schädigungen die Proben beeinflussen konnten.

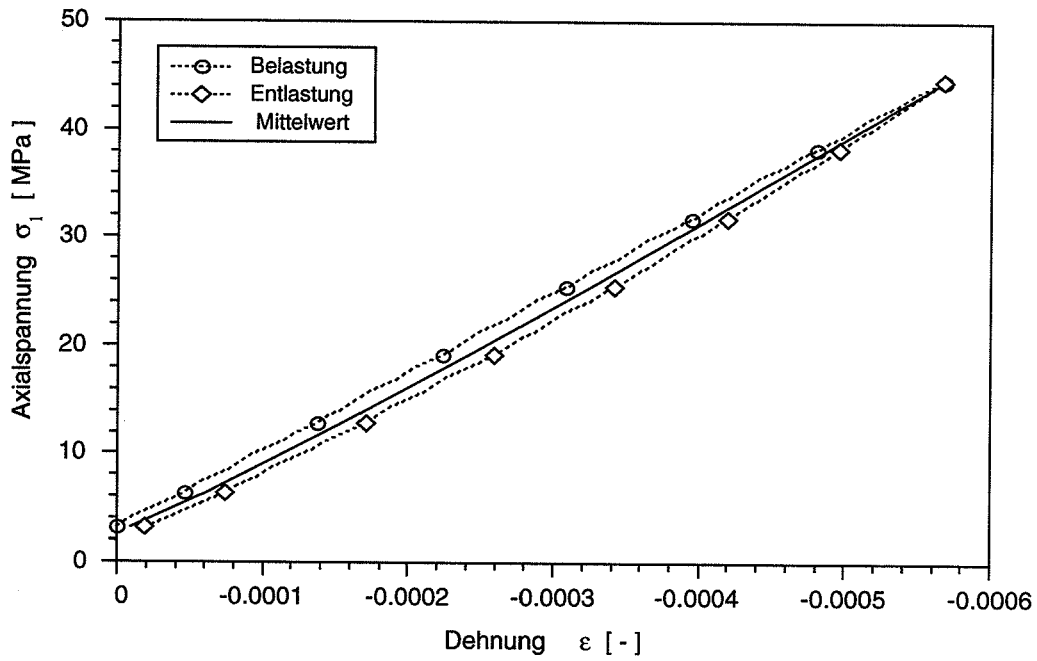
In der Tab. 3.1 sind die sich ergebenden statischen Elastizitätsmoduln für einen Ausgangszustand von 3.2 MPa und bei 44.6 MPa zusammengefaßt.

**Tab. 3.1** Statischer Elastizitätsmodul von Bernburger Anhydritkernen bei unterschiedlichen Belastungszuständen.

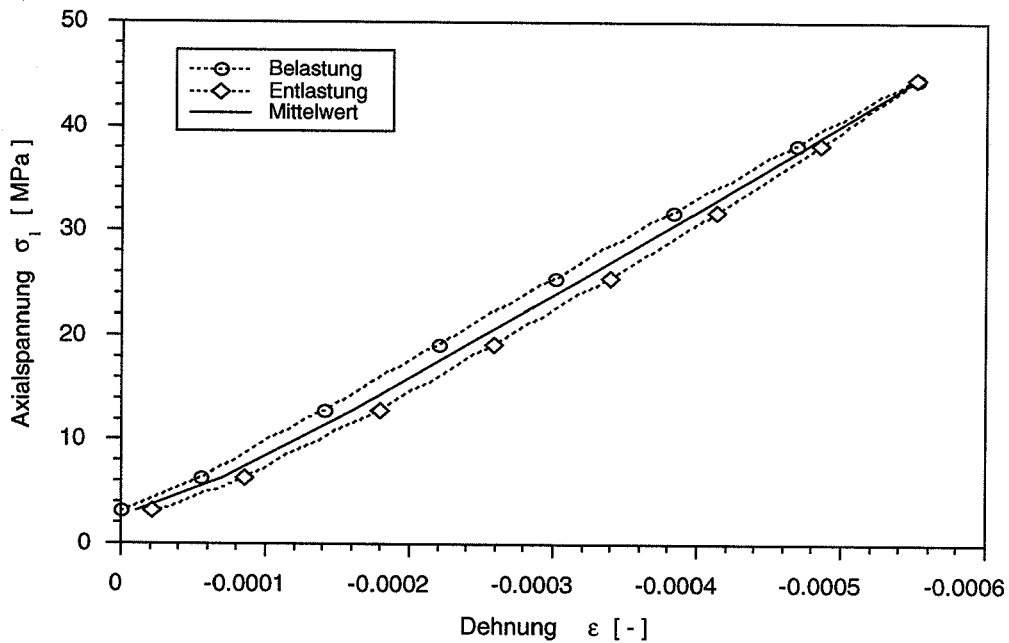
Proben-Nr.	stat. Elastizitätsmodul $E_{stat}$ [ MPa ]	
	bei 3.2 MPa	bei 44.6 MPa
4 B711	66599	83351
5 B711	66720	88771
7 B711	55896	82769
8 B711	62229	74212
9 B711	67091	81164
10 B711	44893	95752
11 B711	67093	86686

Offensichtlich führt die Belastung der Proben zu einer höheren Steifigkeit, was durch ein Schließen von Klüften erklärt werden kann und somit eine Vergrößerung der Steifigkeit hervorruft.

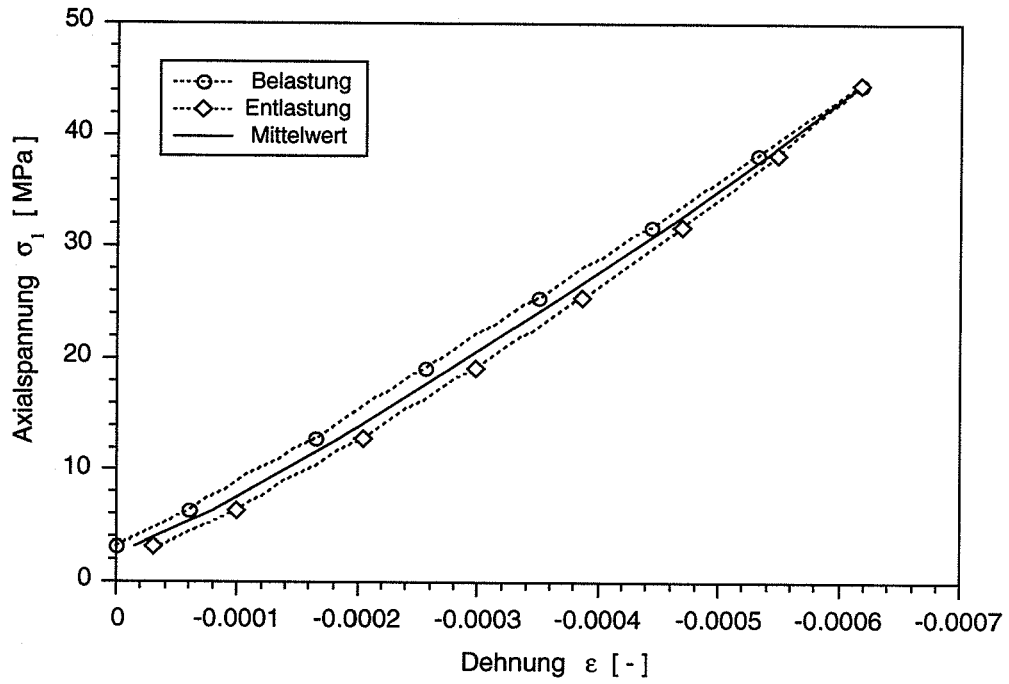
In den Abbildungen 3.8 bis 3.14 ist das Spannungs-Dehnungsverhalten der untersuchten Proben für den Be- und Entlastungspfad dargestellt. Es wird deutlich, daß zwischen der Be- und der Entlastung ein Hystereseeffekt im Spannungs-Dehnungsverhalten vorhanden ist.



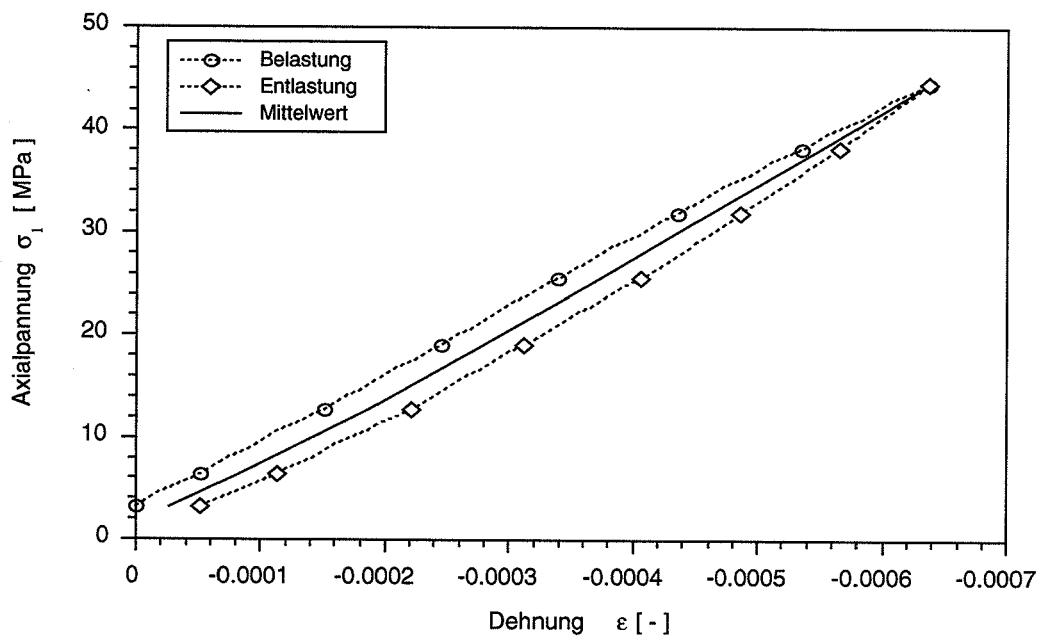
**Abb. 3.8** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 4B711.



**Abb. 3.9** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 5B711.

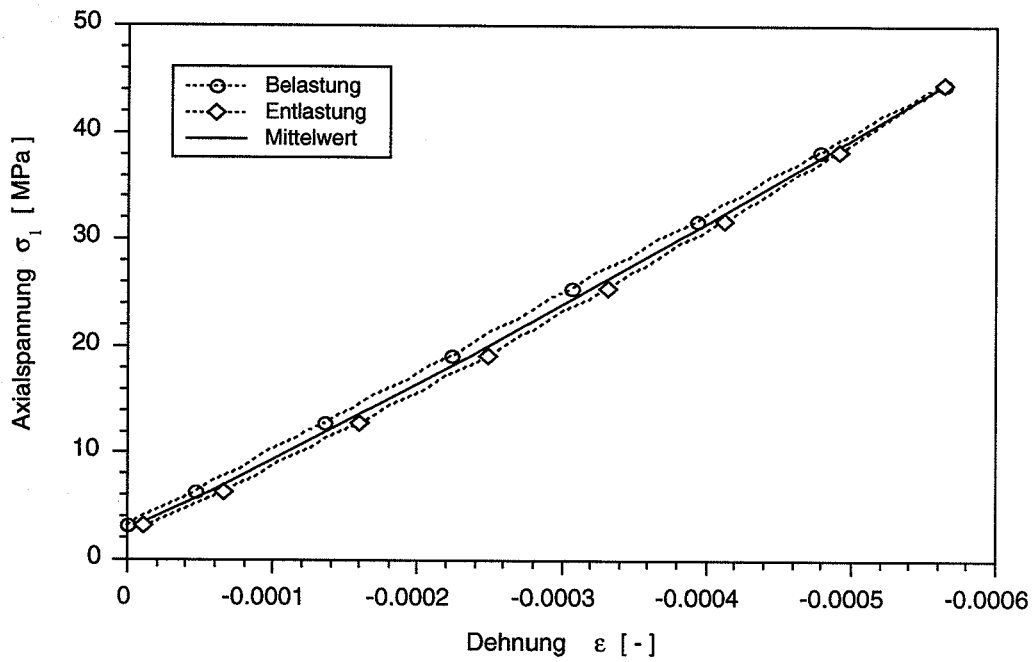


**Abb. 3.10** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 7B711.

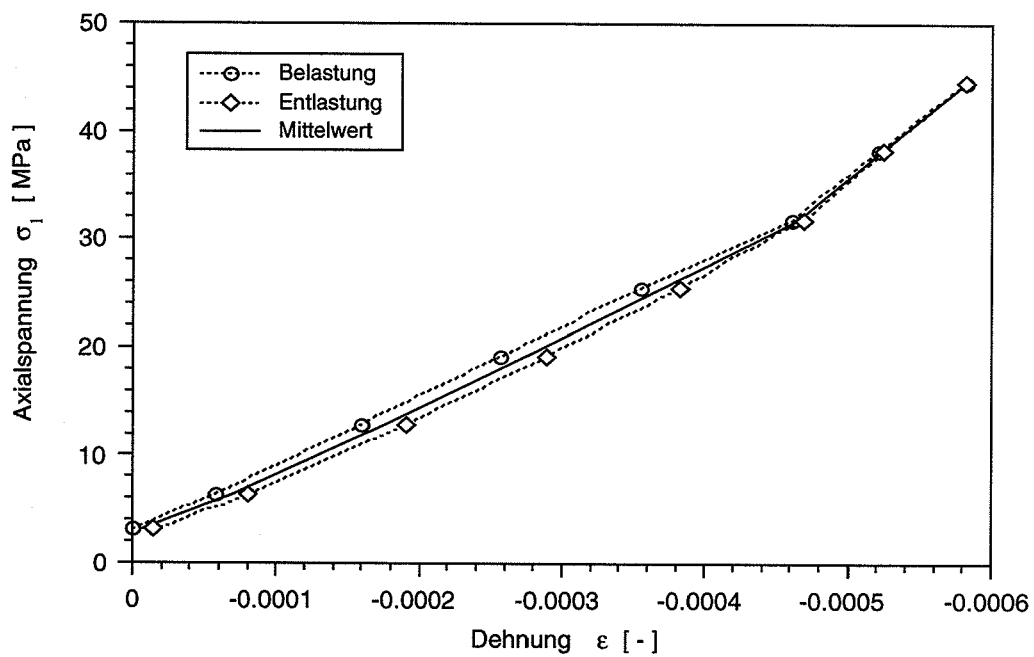


**Abb. 3.11** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 8B711.

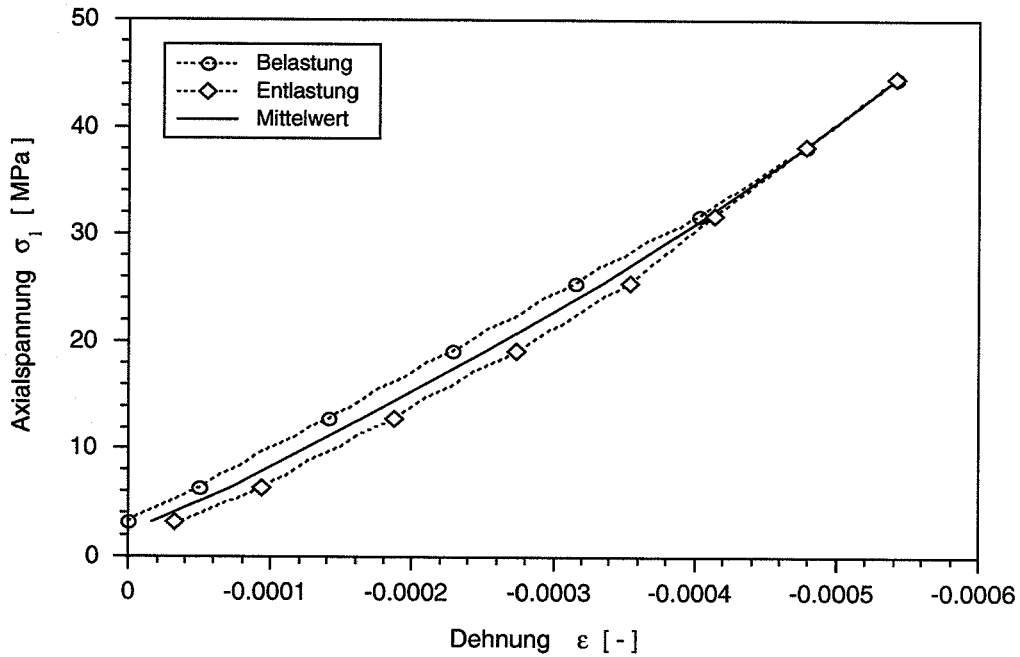




**Abb. 3.12** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 9B711.

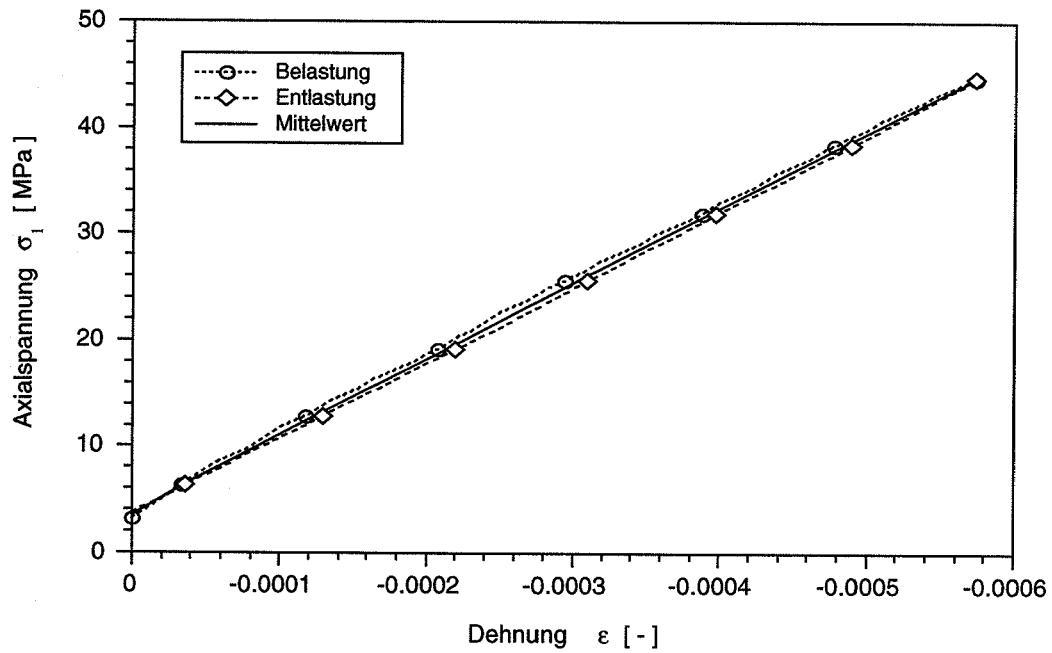


**Abb. 3.13** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 10B711.

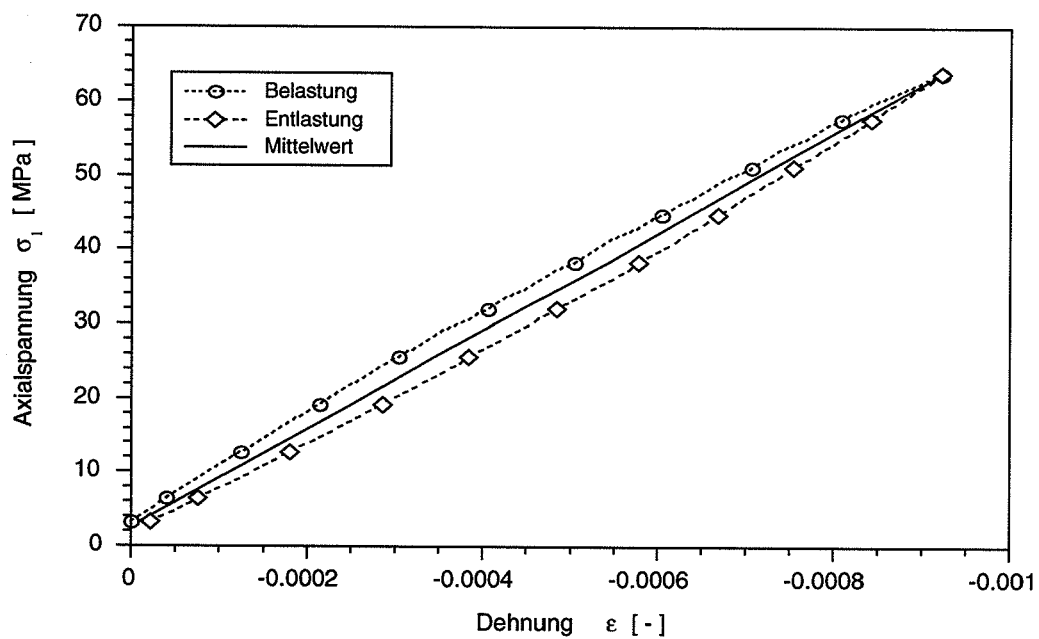


**Abb. 3.14** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 11B711.

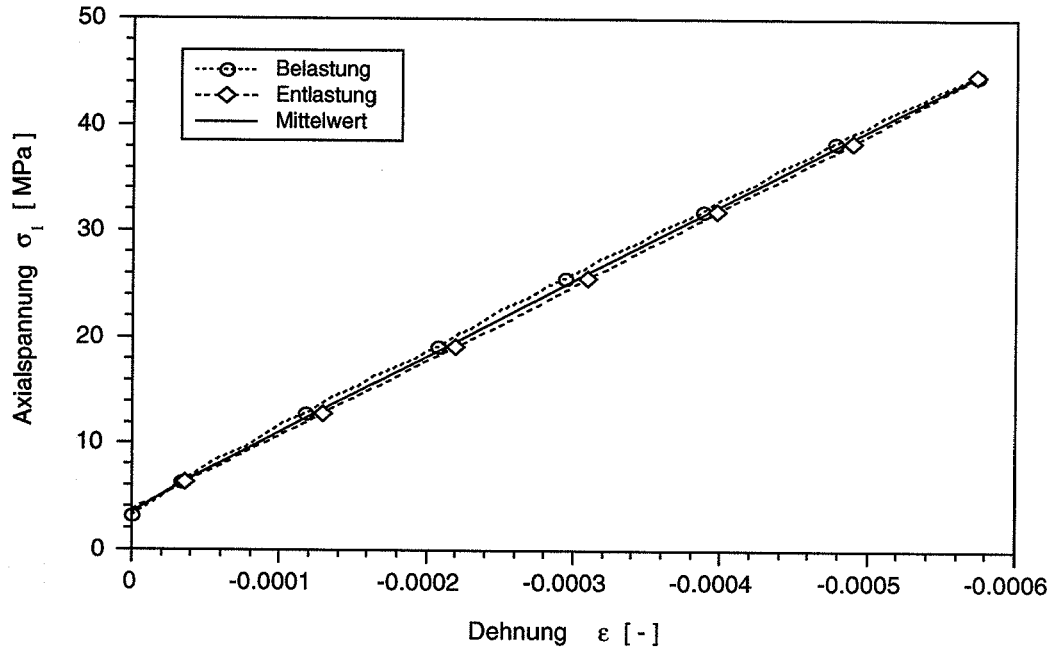
Für die Untersuchungen des Einflusses wechselnder Be- und Entlastungen wurden die Proben IIB711/1, IIB711/3, IIB711/4 und IIB711/6 zunächst bis 44 MPa belastet und entlastet. Anschließend erfolgte eine erneute Be- und Entlastung bis 64 MPa. Bei den Be- und Entlastungspfaden im Spannungs-Dehnungs-Diagramm war ebenfalls ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Hystereseeffekt sowohl bei einer Belastung bis 44 MPa als auch bis 64 MPa festzustellen. Das Verhalten ist in den Abbildungen 3.15 bis 3.22 dargestellt. Der Belastungsvorgang wird durch einen Kreis und der Entlastungsvorgang mit einer Raute symbolisiert. Mit Ausnahme der Probe IIB711/6 ist der Hystereseeffekt bei höherer Belastung etwas ausgeprägter als bei der Belastung bis 44 MPa. Bei der Probe IIB711/6 hingegen ist ein umgekehrtes Verhalten zu beobachten. Aus dem Spannungs-Dehnungsverhalten bei der Be- und Entlastung wurde für die Belastung bis 44 MPa und 64 MPa jeweils ein mittlerer statischer Elastizitätsmodul berechnet (durchgezogenen Linie in den Diagrammen). Diese Mittelwerte sind in der Tabelle 3.2 aufgeführt.



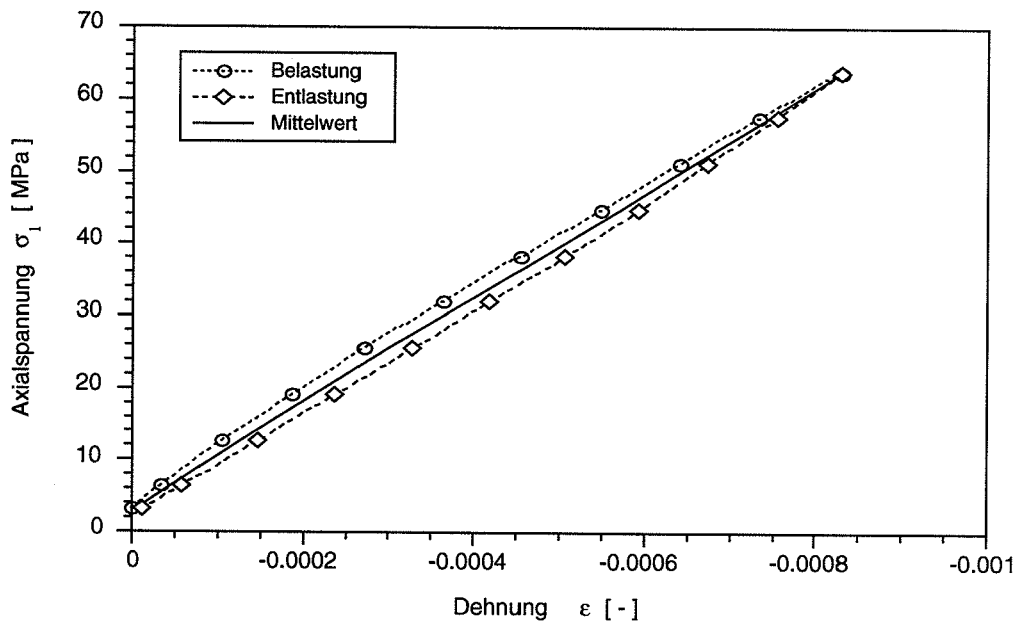
**Abb. 3.15** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/1.



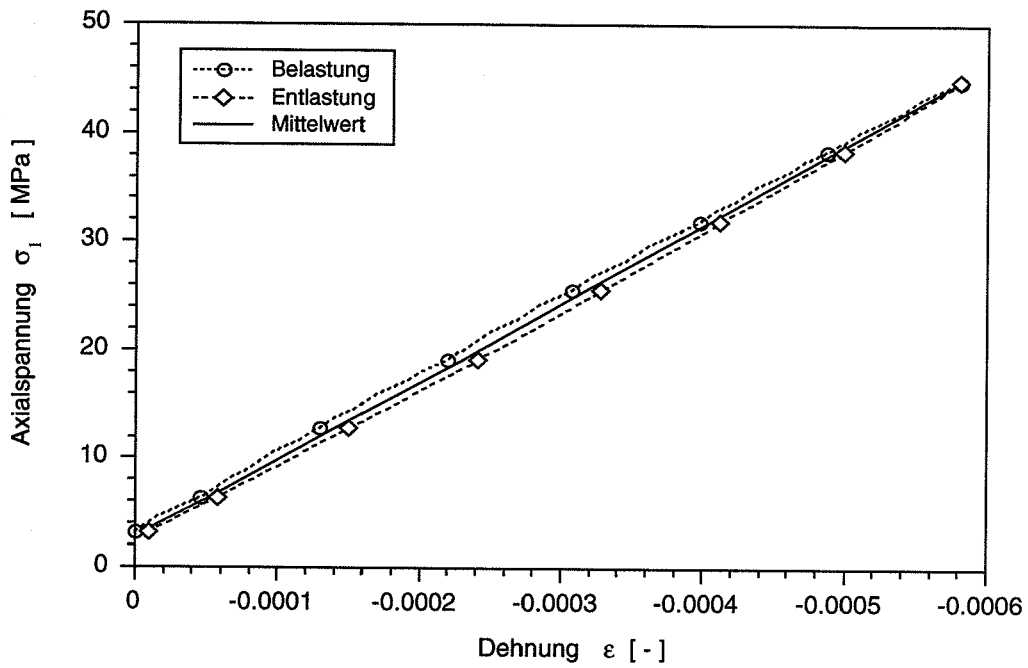
**Abb. 3.16** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/1.



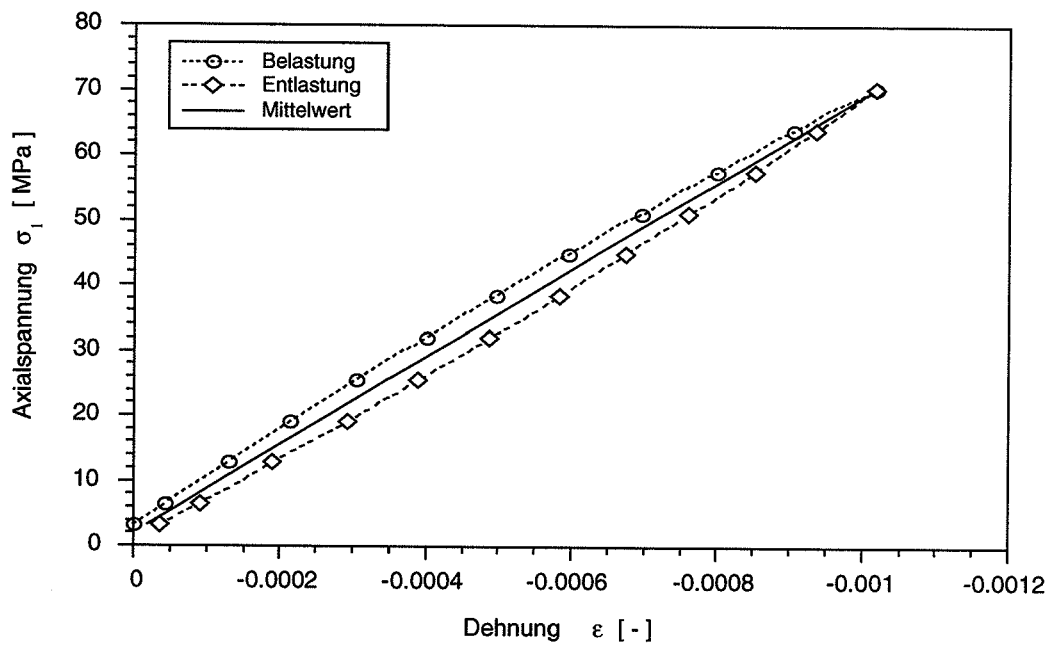
**Abb. 3.17** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/3.



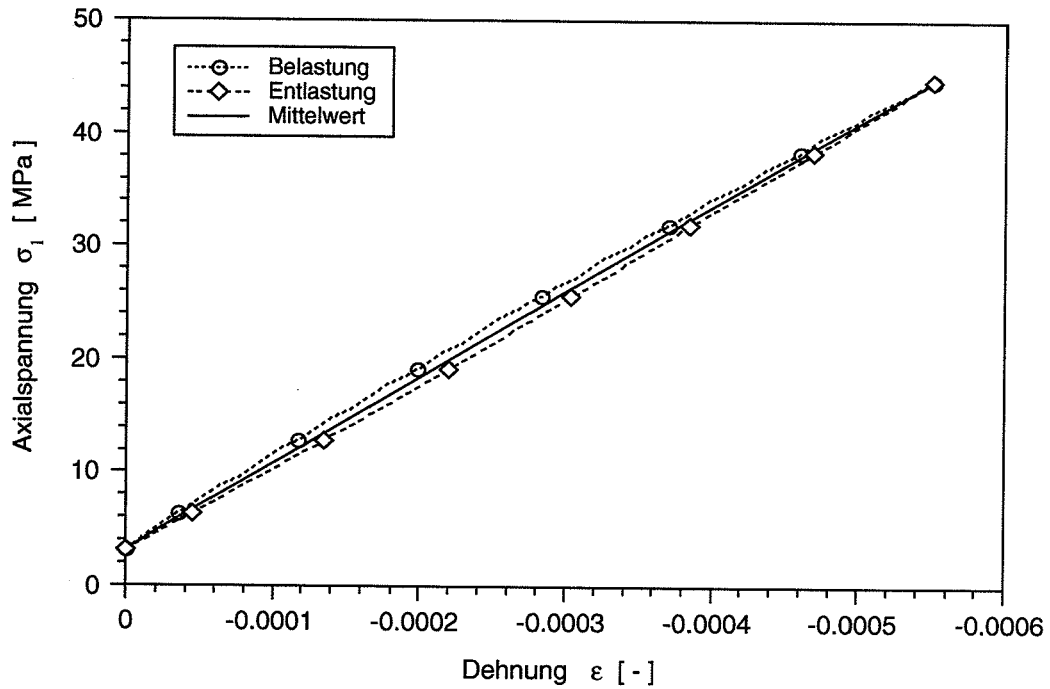
**Abb. 3.18** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/3.



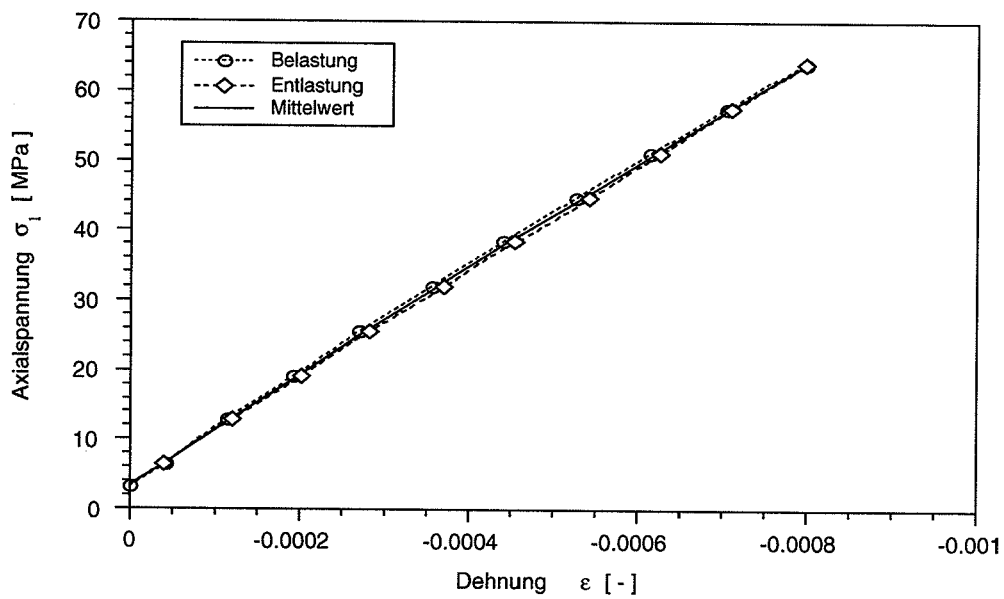
**Abb. 3.19** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/4.



**Abb. 3.20** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/4.



**Abb. 3.21** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/6.



**Abb. 3.22** Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/6.

**Tab. 3.2** Mittlerer Elastizitätsmodul bei Belastung bis 44 MPa und 64 MPa.

Probe	statischer Elastizitätsmodul in MPa	
	bei Belastung bis 44 MPa	bei Belastung bis 64 MPa
IIB711/1	71365 ± 215	66148 ± 371
IIB711/3	70400 ± 131	72721 ± 340
IIB711/4	72294 ± 4	67153 ± 136
IIB711/6	74231 ± 438	75742 ± 674

Bei Betrachtung der mittleren Elastizitätsmoduln fällt auf, daß keine eindeutige Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte festzustellen ist. Bei den Proben IIB711/1 und IIB711/4 nimmt der Elastizitätsmodul nach Belastung bis 64 MPa ab, wo hingegen bei den Proben IIB711/3 und IIB711/6 sogar eine Zunahme zu verzeichnen ist.

Aufgrund der Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung, die zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls einen Ausbau der Proben nach jedem Be- und Entlastungszyklus vorsah, mußte auch jedesmal die Längenmeßeinrichtung demontiert werden, so daß es beim wieder Einsetzen der Probe zu örtlichen Veränderungen der Meßstellen kommt. Mögliche heterogenitätsbedingte Einflüsse der Probe können somit einen gewissen Einfluß auf die Messung haben, der aber nicht berücksichtigt werden konnte. Zieht man die Untersuchungen an diesen Proben zur Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls, die keinen signifikanten Einfluß der Spannungsbelastung ergeben haben, mit heran, so kann auch bei der Beurteilung des statischen Elastizitätsmoduls der Schluß gezogen werden, daß keine ausgeprägten Einflüsse durch mögliche Probenschädigungen vorhanden sind.

Ein Vergleich mit den zugehörigen Permeabilitätsmessungen zeigt zudem, daß die Proben, bei denen eine Abhängigkeit des statischen Elastizitätsmoduls von der Axialspannung zu beobachten war, die Permeabilitäten etwas höher ausfallen als bei den Proben, bei denen keine signifikante Spannungsabhängigkeit des Elastizitätsmoduls auftrat (vgl. Tab. 3.3) und bei denen somit die Klüftigkeit offenbar weniger ausgeprägt ist.

**Tab. 3.3** Permeabilitätsmessung an Bernburger (B) und Pöthener (V) Anhydrit im Anlieferungszustand

Hydrostatischer Einspanndruck: 2 MPa

Injektionsdruck: 2 MPa

Meßgas: Stickstoff

Probe	Teufe der Bohrung	Gaspermeabilität $k_n$	Bemerkung
	m	$m^2$	
<b>Bernburger Anhydrit</b>			
4B711	11.57	$3.68 \cdot 10^{-20}$	$E_{stat}$ spannungsabhängig
9B711	9.84	$4.50 \cdot 10^{-19}$	$E_{stat}$ spannungsabhängig
10B711	10.25	$4.30 \cdot 10^{-20}$	$E_{stat}$ spannungsabhängig
11B711	10.7	$4.98 \cdot 10^{-20}$	$E_{stat}$ spannungsabhängig
12B711	10.93	$6.86 \cdot 10^{-21}$	
13B711	11.16	$6.34 \cdot 10^{-21}$	
14B711	4.22	$6.38 \cdot 10^{-21}$	
15B711	4.46	$6.41 \cdot 10^{-21}$	
IIB711/1	2.9	$3.73 \cdot 10^{-21}$	$E_{stat}$ konstant
IIB711/2	3.13	$3.86 \cdot 10^{-21}$	
IIB711/3	3.35	$3.90 \cdot 10^{-21}$	$E_{stat}$ konstant
IIB711/4	7.5	$1.50 \cdot 10^{-20}$	$E_{stat}$ konstant
IIB711/5	8.05	$2.80 \cdot 10^{-18}$	
IIB711/6	8.26	$5.45 \cdot 10^{-21}$	$E_{stat}$ konstant
IIB711/7	5.04	$6.04 \cdot 10^{-21}$	
IIB711/8	5.28	$6.04 \cdot 10^{-21}$	
IIB711/9	5.5	$1.02 \cdot 10^{-20}$	
B712/4	8.2	$1.83 \cdot 10^{-17}$	
4B713	18.35	$3.10 \cdot 10^{-17}$	
6B713	18.75	$5.76 \cdot 10^{-21}$	
<b>Pöthener Anhydrit</b>			
V116/1	0.3	$1.35 \cdot 10^{-19}$	
V116/2	0.7	$5.85 \cdot 10^{-21}$	
V116/3	1.1	$6.40 \cdot 10^{-21}$	
V116/4	1.5	$6.28 \cdot 10^{-21}$	
V116/5	1.8	$6.53 \cdot 10^{-21}$	
V116/6	2.3	$1.19 \cdot 10^{-19}$	
V116/7	2.7	$5.17 \cdot 10^{-21}$	
V116/8	3.1	$4.71 \cdot 10^{-21}$	
V116/9	3.5	$4.93 \cdot 10^{-21}$	
V116/10	3.9	$4.66 \cdot 10^{-21}$	



### 3.4.3 Ergebnisse zum dynamischen Elastizitätsmodul

Die Untersuchungen wurden an den Proben IIB711/1, IIB711/3, IIB711/6 und IIB711/6 zusammen mit den entsprechenden Messungen zum statische Elastizitätsmodul an diesen Proben vorgenommen. Der dynamische Elastizitätsmodul wurde zunächst im unbelasteten Zustand und anschließend nach einer Belastung auf 44 MPa sowie 64 MPa im entlasteten Zustand bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3.4 zusammengefaßt. Die Ergebnisse zeigen, daß die dynamischen Elastizitätsmoduln keine ausgeprägte Veränderung durch die einaxialen Belastungen erfahren haben. Im Mittel betrachtet ist nur eine geringfügige Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls mit zunehmender Spannung zu vermerken, wobei die Einzelproben davon leicht abweichen können. Die größten Änderungen treten oberhalb von 44 MPa auf.

Da diese Proben auch sehr geringe Permeabilitäten aufweisen, kann davon ausgegangen werden, daß es sich bei diesen Proben um sehr kompaktes, stabiles und gering geklüftetes Material handelt (Tab. 3.4).

**Tab. 3.4** Zusammenstellung der dynamischen Elastizitätsmoduln für verschiedene einaxiale Belastungen.

Probe	dynamischer Elastizitätsmodul in MPa		
	unbelastet	nach Belastung bis 44 MPa	nach Belastung bis 64 MPa
IIB711/1	79327 ± 1267	79181 ± 1176	79131 ± 631
IIB711/3	80197 ± 676	80349 ± 1263	79878 ± 926
IIB711/4	78344 ± 1344	78347 ± 1101	77458 ± 1232
IIB711/6	80585 ± 527	80310 ± 952	79520 ± 1243

## 4            **Hydraulische Eigenschaften des Anhydrits unter Belastung**

Zur Überprüfung, wie sich verschiedene Belastungen auf das hydraulische Verhalten von Anhydrit auswirken, wurden die Proben einer einaxialen bzw. dreiaxialen Belastung sowie zur Untersuchung thermischer Beanspruchungen einer Erwärmung unterzogen.

### 4.1           **Gas-Permeabilitätsmessungen an Anhydrit-Probekörpern**

Die Permeabilitäten wurden an zylindrischen Kernen mit Gas (Stickstoff) als Meßmedium bestimmt. Die Probe wird für die Messungen an den Mantelflächen mit einer Silikonmasse oder mittels eines Gummijackets gegen Randläufigkeiten abgedichtet und anschließend axial mit Stickstoff durchströmt. Der vorgegebene Injektionsdruck und die sich einstellende Fließrate werden registriert. Die Versuche erfolgten am Kernausgang gegen Atmosphärendruck.

Die Gaspermeabilität errechnet sich dann aus dem für kompressible Medien erweiterten Darcyschen Gesetz für stationären Fluß /AMY 88/ gemäß:

$$k_g = \frac{2 \cdot q_g \cdot \mu_g \cdot l \cdot p_0}{A \cdot (p_1^2 - p_0^2)}$$

mit:

$k_g$	mit Gas gemessene Permeabilität	$m^2$
$q_g$	Fließrate des Gases	$m^3/s$
$p_1$	Injektionsdruck	Pa
$p_0$	Atmosphärendruck	Pa
$\mu_g$	Viskosität des Gases	Pas

l	Probenlänge	m
A	Querschnittsfläche der Probe	m <sup>2</sup>

Zur Berücksichtigung des Gleitströmungseffekts wird eine Klinkenberg-Korrektur vorgenommen. Hierzu werden Messungen bei unterschiedlichen Injektionsdrücken durchgeführt. Die sich hieraus ergebenden Permeabilitätswerte werden graphisch gegen den Kehrwert des mittleren Drucks aufgetragen und die Klinkenberg-Permeabilität durch Extrapolation auf einen "unendlichen Druck" ermittelt:

$$k_g = k_\infty \left( 1 + \frac{b}{p_m} \right)$$

mit:

$k_g$	gemessenen Gaspermeabilität	m <sup>2</sup>
$k_\infty$	Klinkenberg-Permeabilität	m <sup>2</sup>
$p_1$	Injektionsdruck	Pa
$p_0$	Atmosphärendruck	Pa
b	Klinkenberg-Konstante	Pa
$p_m$	mittlerer Druck;	$p_m = \frac{p_1 + p_0}{2}$ Pa

Da bei den vorliegenden Untersuchungen der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Permeabilitäten vor und nach den mechanischen und thermischen Belastungen lag und die einzelnen Permeabilitätsmessungen einen hohen Zeitaufwand erforderten, wurden die Permeabilitäten jeweils bei einem Manteldruck und einem Injektionsdruck untersucht. An einer Probe wurden zum Nachweis, daß eine Klinkenberg-Korrektur durchführbar ist, entsprechende Messungen vorgenommen.

Es wurden Untersuchungen zur Abhängigkeit der Permeabilität vom Differenzdruck, (Druckunterschied zwischen hydrostatischem Einspanndruck und Gasinjektionsdruck) vorgenommen. Die Versuche erfolgten zum einen bei konstant gehaltenem hydrostatischem Einspanndruck und Variation des Injektionsdrucks, und zum andern bei konstantem Injektionsdruck mit veränderlichem hydrostatischem Einspanndruck.

Weiterhin wurden Messungen zum Einfluß einer Temperaturbeanspruchung der Proben auf das Durchlässigkeitsverhalten durchgeführt. Hierbei wurden die Proben zunächst über einen Zeitraum von 96 h bis auf 85 °C aufgeheizt und anschließend wieder bis auf Raumtemperatur abgekühlt.

Zur Korrektur des Gleitströmungseffekts nach Klinkenberg erfolgten Messungen bei einem konstanten Differenzdruck von ca. 1 MPa. Zu diesem Zweck wurde der hydrostatische Einspanndruck entsprechend der Änderung des Gasinjektionsdrucks angepaßt. Zur Überprüfung des Einflusses bei einaxialer mechanischer Belastung auf die Permeabilität wurden Proben einer einaxialen Belastung bis 70 MPa ausgesetzt. Die Permeabilität wurde dann nach Entlastung der Proben ermittelt.

Um die Permeabilität von Anhydritproben unter Gebirgsspannungsbedingungen zu untersuchen, wurden einzelne Proben in eine Triaxialapparatur unter in-situ-nahen Spannungszuständen eingespannt. Für die axiale Spannung wurden 10 MPa und die radiale Spannung 7.5 MPa angenommen /FLA 95/. Für die Durchlässigkeitsmessungen wurden die Proben mit Stickstoff bei einem Injektionsdruck von 2 MPa und 5 MPa durchströmt und die Gaspermeabilitäten nach Darcy berechnet. Um den Spannungseinfluß auf die Permeabilität zu überprüfen, wurde bei einer Probe die Axial- und die Radialspannungen vertauscht.

#### **4.1.1 Abhängigkeit der Permeabilität von thermischer Belastung**

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Permeabilität von der thermischen Belastung wurden zunächst die Permeabilitäten von zwei Proben in ihrem Anlieferungszustand bei einem hydrostatischen Einspanndruck von 5 MPa und einem Gasinjektionsdruck von 2 MPa bestimmt. Anschließend wurden die beiden Proben 96 h bei 85 °C aufgeheizt und nach dieser Aufheizphase vor Messung der Permeabilität wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

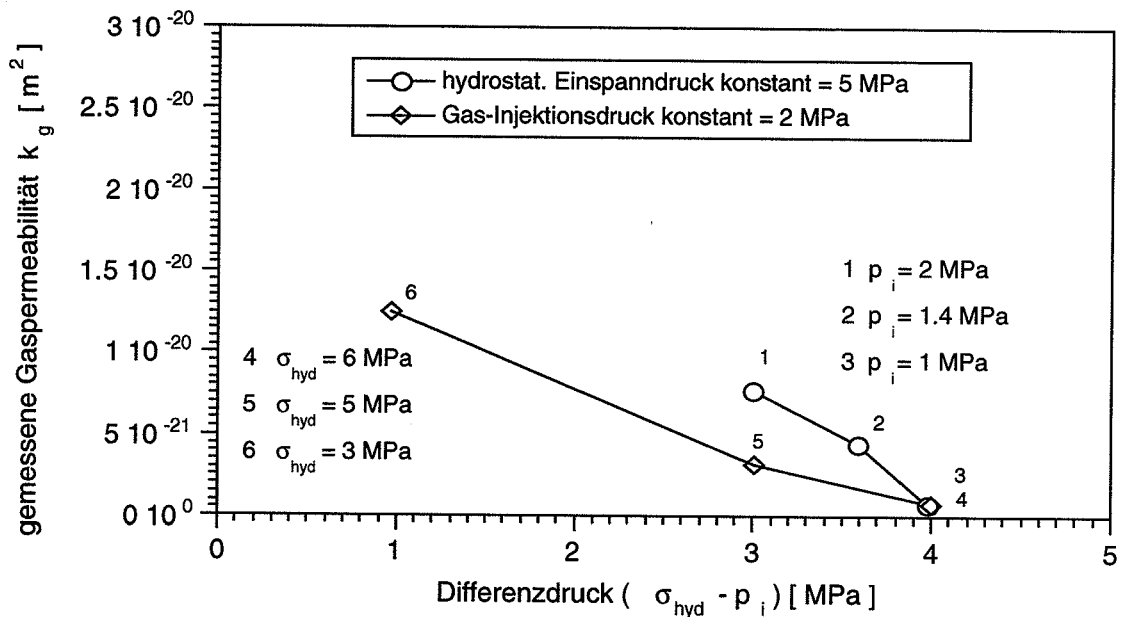
**Tab. 4.1** Zusammenstellung der Gaspermeabilitäten von Bernburger Anhydritkernen im Anlieferungszustand und nach thermischer Belastung (Aufheizung auf 85 °C); hydrostatischer Einspanndruck: 5 MPa; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff.

Proben-Nr.	Gaspermeabilität $k_p$ [m <sup>2</sup> ]	
	Anlieferungszustand	Nach Aufheizen
7B711	$1.58 \cdot 10^{-22}$	$1.47 \cdot 10^{-22}$
8B711	$5.92 \cdot 10^{-21}$	$7.65 \cdot 10^{-21}$

Die Untersuchungen bei Aufheizung der Anhydritkerne ergaben, daß bei der Probe 8 B711 eine Erhöhung der Durchlässigkeit festzustellen war. Diese Beobachtung läßt sich durch eine thermisch induzierte Schädigung der Proben, z.B. durch Bildung von Mikrorissen, die zu neuen in Fließrichtung ausgerichteten Fließwegen führen, erklären. Die zweite Probe 7B711 hingegen zeigte keine Durchlässigkeitserhöhung, was eventuell auch dadurch bedingt sein kann, daß Fließwege nicht bevorzugt in Fließrichtung entstanden sind.

#### 4.1.2 Abhängigkeit der Permeabilität von mechanischer Belastung

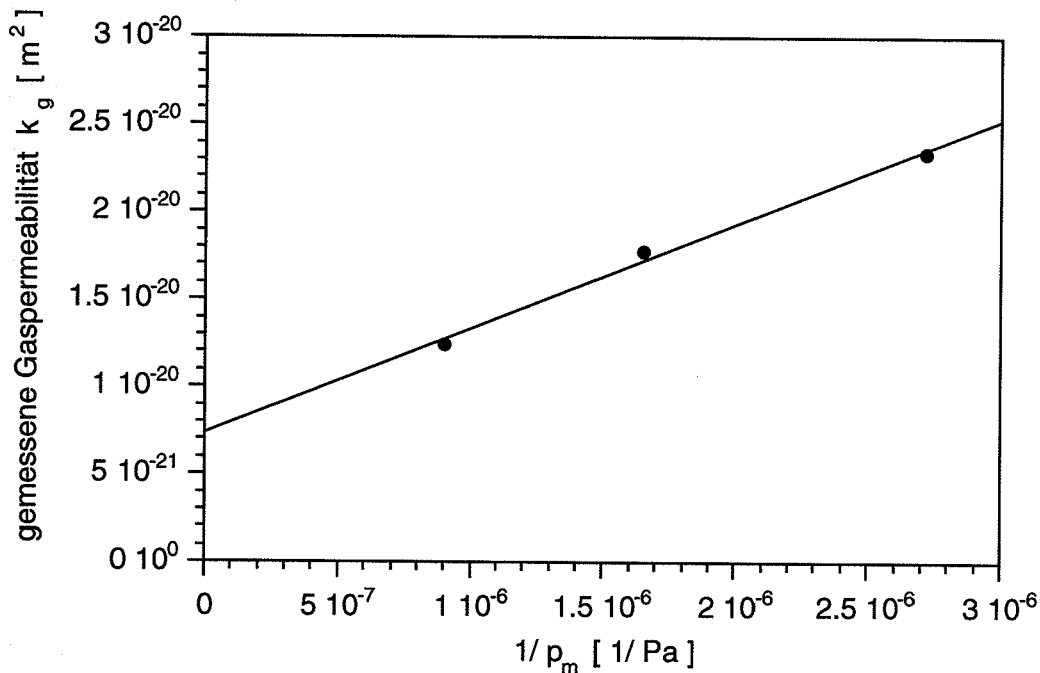
Bei der Probe 8B711 erfolgten dann Versuche, in denen die Abhängigkeit der Permeabilität vom Differenzdruck (Druckunterschied zwischen hydrostatischem Einspanndruck und Gasinjektionsdruck) überprüft werden sollte. Hier wurde bei der Anhydritprobe 8B711 der Gasinjektionsdruck, ausgehend von 2 MPa bei konstantem hydrostatischen Einspanndruck von 5 MPa in Stufen verringert, womit eine Erhöhung des Differenzdruckes verbunden ist. Diese Messungen erfolgten an der thermisch beanspruchten Probe. Bei jeder Druckstufe wurde die Permeabilität nach Erreichen stationärer Fließbedingungen ermittelt.



**Abb. 4.1** Abhängigkeit der Permeabilität von der Druckdifferenz ( $\sigma_{hyd}-p_i$ ) bei Variation des hydrostatischen Einspanndrucks  $\sigma_{hyd}$  und bei Variation des Injektionsdrucks  $p_i$  an Bernburger Anhydrit; Probe 8B711 nach Aufheizen auf 85 °C; (die Zahlen geben die Reihenfolge der Messungen an).

Wie in der Abb. 4.1 dargestellt zeigte sich, daß die Durchlässigkeit abnahm, was durch ein Schließen von Fließwegen in der Probe aufgrund des höheren Differenzdruckes erklärt werden kann. Anschließend wurde der Gasinjektionsdruck bei 2 MPa konstant gehalten und der Einspanndruck und damit auch der Differenzdruck verringert. Dies führte zu einer Zunahme der Permeabilität, da sich offenbar die vorher durch den erhöhten Einspanndruck geschlossenen Poren wieder öffnen konnten. Allerdings lagen die so ermittelten Durchlässigkeiten unter denen des vorhergehenden Versuchs. Offensichtlich kommt es hier zu nicht reversiblen Einflüssen in der Probe.

Da es bei Versuchen mit verändertem Differenzdruck zwischen hydrostatischem Einspanndruck und Gasinjektionsdruck offenbar zu Veränderungen des Porengefüges und somit zu Einflüssen auf die Durchlässigkeit kommt, wurde, um eine Korrektur des Gleitströmungseffekts nach Klinkenberg vornehmen zu können, der Differenzdruck bei ca. 1 MPa konstant gehalten. Diese Untersuchungen erfolgten ebenfalls an der thermisch belasteten



**Abb. 4.2** Klinkenberg-Korrektur bei Bernburger Anhydrit nach Aufheizung auf 85 °C; konstanter Differenzdruck zwischen Einspann- und Injektionsdruck = 1 MPa; Probe 8B711; Klinkenberg-Permeabilität  $k_{\infty} = 7.39 \cdot 10^{-21} m^2$ .

Probe 8B711. Hierbei zeigte es sich, daß diese Vorgehensweise eine Klinkenberg-Korrektur ermöglicht. Die Klinkenberg-Korrektur ergibt somit eine absolute Permeabilität von  $7.39 \cdot 10^{-21} m^2$  (Abb. 4.2).

Aufgrund der sehr langen Versuchszeiten und da in erster Linie eine Vergleichbarkeit in den Permeabilitäten gewährleistet werden sollte, wurde dazu übergegangen, den Ausgangszustand der Proben nur bei jeweils einer hydrostatischen Einspannung und einem Injektionsdruck zu messen. Zu Beginn wurde mit Einspannbedingungen von 5 MPa und einem Injektionsdruck von 2 MPa gearbeitet. Diese Ergebnisse sind in der Tab. 4.2 zusammengefaßt. Die Permeabilitäten bei einem Einspanndruck von 5 MPa liegen in Größenordnungen von  $10^{-20} m^2$  bis  $10^{-21} m^2$  und die bei einem Einspanndruck von 2 MPa bei  $10^{-19} m^2$  bis  $10^{-20} m^2$ .

**Tab. 4.2** Zusammenstellung der Gaspermeabilitäten von Anhydritkernen im Ausgangszustand; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff.

Proben-Nr.	Gaspermeabilität $k_g$ [ m <sup>2</sup> ]	
	Manteldruck 5 MPa	Manteldruck 2 MPa
2B713	$2.56 \cdot 10^{-21}$	n. bestimmt
3B713	$1.11 \cdot 10^{-20}$	n. bestimmt
4B711	$3.32 \cdot 10^{-22}$	$3.68 \cdot 10^{-20}$
5B711	$4.17 \cdot 10^{-22}$	n. bestimmt
7B711	$1.58 \cdot 10^{-22}$	n. bestimmt
8B711	$5.92 \cdot 10^{-21}$	n. bestimmt
9B711	$2.96 \cdot 10^{-21}$	$4.50 \cdot 10^{-19}$
10B711	n. bestimmt	$4.30 \cdot 10^{-20}$
11B711	n. bestimmt	$4.98 \cdot 10^{-20}$

Da aufgrund der oben beschriebenen Beobachtungen eine deutliche Abhängigkeit von der Differenzspannung vorlag und die Proben zur Bestimmung ihrer Durchlässigkeit im Ausgangszustand so wenig wie möglich einer mechanischen Beeinflussung ausgesetzt werden sollten, wurden die darauffolgenden Messungen bei Einspanndrücken von 2 MPa und einem Injektionsdruck von ebenfalls 2 MPa vorgenommen. Die Ergebnisse der Ausgangspermeabilitäten aller bei 2 MPa Manteldruck und 2 MPa Injektionsdruck untersuchten Proben sind in der Tabelle 4.5 zusammengefaßt. In dieser Tabelle sind auch Permeabilitätswerte für Proben aus Pöthen mit angegeben, an denen aber keine weiteren Untersuchungen vorgenommen wurden. Es ist jedoch bemerkenswert, daß an den gegenübergestellten Proben von Bernburg (500 m Teufe) und Pöthen (1000 m Teufe) keine Abhängigkeit der Permeabilität von der Teufe festgestellt werden konnte.

Zur Untersuchung des Einflusses einer einaxialen Belastung auf die Durchlässigkeit wurden die Proben einaxial bis 70 MPa belastet und die Permeabilität nach Entlastung ermittelt. Vor der Belastung wurden die Ausgangspermeabilitäten bestimmt. Die Ergebnisse, die in der Tab. 4.3 aufgeführt sind, zeigen, daß auch hier, wie bei der thermischen Beanspruchung, keine eindeutige Abhängigkeit zu erkennen ist. Bei zwei Proben (4B711, 10B711) nimmt die Permeabilität zu, bei einer weiteren Probe (9B711) nimmt die Permeabilität sogar ab und bei der Probe 11B711 ist fast keine Veränderung feststellbar. Da aber ein deutlicher Einfluß auf die Schallaufzeiten zu beobachten ist, was als ein Anzeichen für eine Probenschädigung gewertet werden kann, kann davon ausgegangen werden, daß eine Mikrorißbildung nicht zu



einer Öffnung durchgehender Fließwege, die eine Permeabilitätserhöhung bedingen würde, führt.

**Tab. 4.3** Anlieferungszustand und nach einaxialer mechanischer Belastung bis 70 MPa; hydrostatischer Einspanndruck bei Permeabilitätsmessung. Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff

Proben-Nr.	Gaspermeabilität $k_g$ [ m <sup>2</sup> ]	
	Anlieferungszustand	nach mech. Belastung
4B711	$3.68 \cdot 10^{-20}$	$1.10 \cdot 10^{-19}$
9B711	$4.50 \cdot 10^{-19}$	$7.80 \cdot 10^{-21}$
10B711	$4.30 \cdot 10^{-20}$	$1.70 \cdot 10^{-19}$
11B711	$4.98 \cdot 10^{-20}$	$3.60 \cdot 10^{-20}$

#### 4.1.3 Bestimmung der Permeabilität unter In-situ-Spannungsbedingungen

Die Untersuchungen zur Permeabilität bei in-situ-nahen Spannungsbedingungen erfolgten bei Axialspannungen von 10.0 MPa und Radialspannungen von 7.5 MPa /FLA 95/. Bei der Probe B712/4 wurden zusätzlich die Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2 = \sigma_3$  vertauscht. Zunächst wurden die Permeabilitäten der Proben in deren Ausgangszustand bei einem Manteldruck von 2 MPa und einem Injektionsdruck 2 MPa ermittelt. Anschließend erfolgten die Messungen in einer Dreiaxialmeßzelle bei den oben angegebenen Spannungswerten. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Durchlässigkeitswerte zu erreichen, wurden die Proben zunächst mit einem Gasinjektionsdruck von 2 MPa durchströmt. Zum Vergleich erfolgten auch Messungen mit 5 MPa Einpreßdruck.

Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4.4a bis 4.4c zusammengefaßt.

Aus den Tabellen ist zu ersehen, daß die Permeabilität sowohl bei den Proben mit höheren Ausgangspermeabilitäten als auch bei den Proben mit niedrigeren Ausgangspermeabilitäten unter den In-situ-Spannungsbedingungen deutlich geringer ausfallen, als im Ausgangszustand. Bei den Proben IIB711/1 und IIB711/2 waren unter den In-situ-Spannungsbedingungen sowohl bei dem Injektionsdruck von 2 MPa als auch bei dem um 3 MPa höheren Injektionsdruck von 5 MPa die Fließraten des Meßgases so klein, daß die Permeabilitäten nicht mehr bestimmbar waren. Ein Vertauschen der Radial- mit der Axialspannung führt nochmals zu einer deutlichen Verringerung der Durchlässigkeiten.

**Tab. 4.4a** Ergebnisse der Permeabilitätsmessung unter in-situ-naher Spannungsbedingung; Gasinjektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff

$k_0$ : Permeabilitäten im Ausgangszustand bei Injektionsdruck = Mantel- druck = 2 MPa		$k_{in-situ}$ : Permeabilitäten unter den rechts angegebenen Spannungszuständen		Axial- spannung	Radial- spannung
Probe	$k_0$ $m^2$	$k_{in-situ}$ $m^2$	Injektionsdruck MPa	$\sigma_1$ MPa	$\sigma_2 = \sigma_3$ MPa
IIB711/1	$3.73 \cdot 10^{-21}$	n. meßbar	2	10.0	7.5
IIB711/2	$3.86 \cdot 10^{-21}$	n. meßbar	2	10.0	7.5
IIB711/5	$2.80 \cdot 10^{-18}$	n. bestimmt			
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$9.11 \cdot 10^{-21}$	2	10.0	7.5
4B713	$3.10 \cdot 10^{-17}$	$5.60 \cdot 10^{-21}$	2	10.0	7.5

**Tab. 4.4b** Ergebnisse der Permeabilitätsmessung unter in-situ-naher Spannungsbedingung; Gasinjektionsdruck: 5 MPa; Meßgas: Stickstoff

$k_0$ : Permeabilitäten im Ausgangszustand bei Injektionsdruck = Mantel- druck = 2 MPa		$k_{in-situ}$ : Permeabilitäten unter den rechts angegebenen Spannungszuständen		Axial- spannung	Radial- spannung
Probe	$k_0$ $m^2$	$k_{in-situ}$ $m^2$	Injektionsdruck MPa	$\sigma_1$ MPa	$\sigma_2 = \sigma_3$ MPa
IIB711/1	$3.73 \cdot 10^{-21}$	n. meßbar	5	10.0	7.5
IIB711/2	$3.86 \cdot 10^{-21}$	n. meßbar	5	10.0	7.5
IIB711/5	$2.80 \cdot 10^{-18}$	$1.10 \cdot 10^{-21}$	5	10.0	7.5
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$8.13 \cdot 10^{-21}$	5	10.0	7.5
4B713	$3.10 \cdot 10^{-17}$	$1.42 \cdot 10^{-21}$	5	10.0	7.5

**Tab. 4.4c** Ergebnisse der Permeabilitätsmessung bei Vertauschen der axialen und der radialen Spannungsbedingungen am Beispiel der Probe B712/4; Injektionsdruck 2 MPa und 5 MPa; Meßgas: Stickstoff.

$k_0$ : Permeabilitäten im Ausgangszustand bei Injektionsdruck = Mantel- druck = 2 MPa		$k_{in-situ}$ : Permeabilitäten unter den rechts angegebenen Spannungszuständen		Axial- spannung	Radial- spannung
Probe	$k_0$ $m^2$	$k_{in-situ}$ $m^2$	Injektionsdruck MPa	$\sigma_1$ MPa	$\sigma_2 = \sigma_3$ MPa
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$9.11 \cdot 10^{-21}$	2	10.0	7.5
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$8.13 \cdot 10^{-21}$	5	10.0	7.5
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$1.45 \cdot 10^{-22}$	2	7.5	10.0
B712/4	$1.83 \cdot 10^{-17}$	$3.53 \cdot 10^{-22}$	5	7.5	10.0

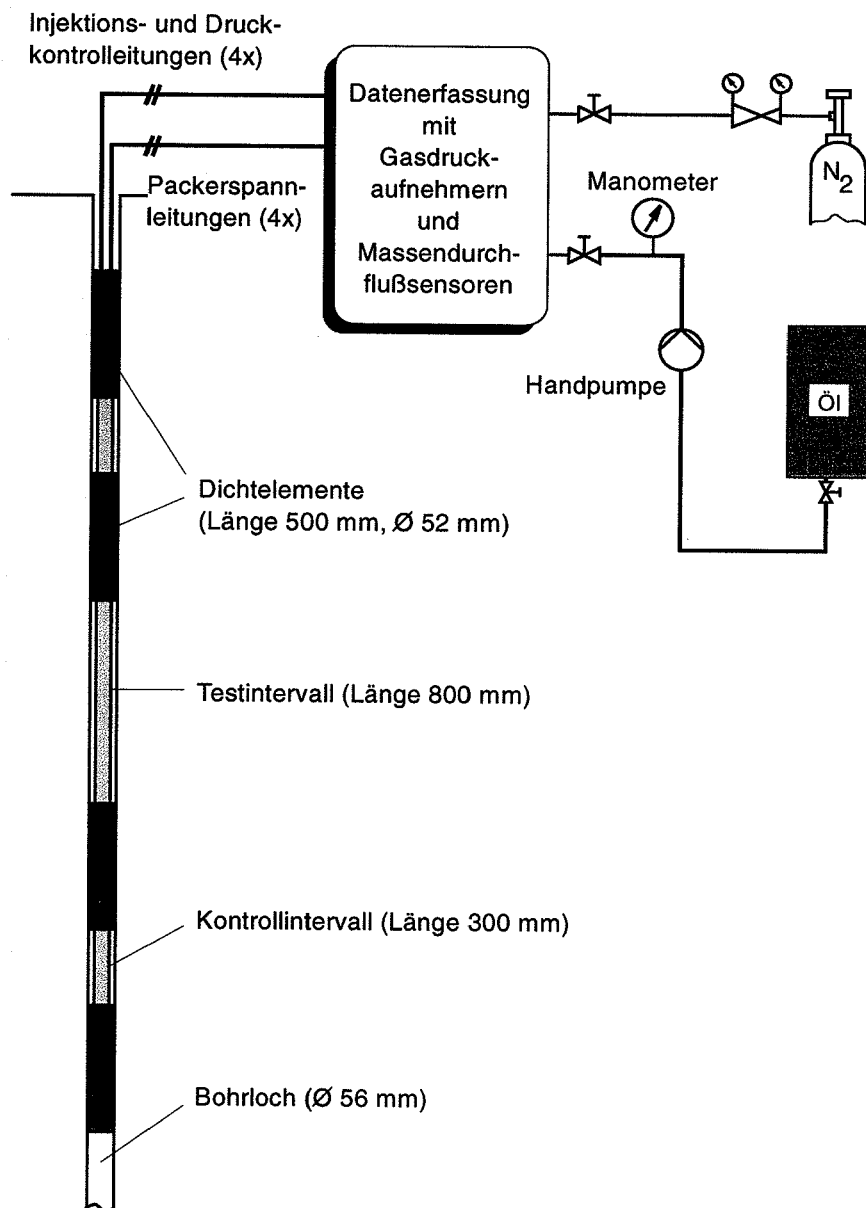
#### 4.2 In-situ-Permeabilitätsmessungen mit Gas und Flüssigkeit

Im Rahmen der Untersuchung der Barrierewirkung von Anhydrit wurden in-situ Gas- und Flüssigkeitsinjektionstests zur Permeabilitätsbestimmung durchgeführt. Bei diesen Tests wird ein Bohrlochbereich, das Testintervall, durch ein Packersystem abgeschlossen und anschließend mit Gas- bzw. Flüssigkeitsdruck beaufschlagt. Während der Injektionsphase werden Fließrate und Druckaufbau im Testintervall registriert. Auf die Fließphase folgt eine Schließphase, während der der Druckabfall im Testintervall, hervorgerufen durch Abfluß des Testfluids ins Gebirge, registriert wird. Aus dem Druckverlauf und der Fließrate läßt sich die effektive Gebirgspermeabilität gegenüber dem Testfluid ermitteln /EAR 77/.

##### Apparatur

Für die Gasinjektionstests wurde eine Meßapparatur eingesetzt, die sich bereits im Projekt "Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge" /WZI 98/ bewährt hatte. Abb. 4.3 zeigt eine schematische Darstellung.

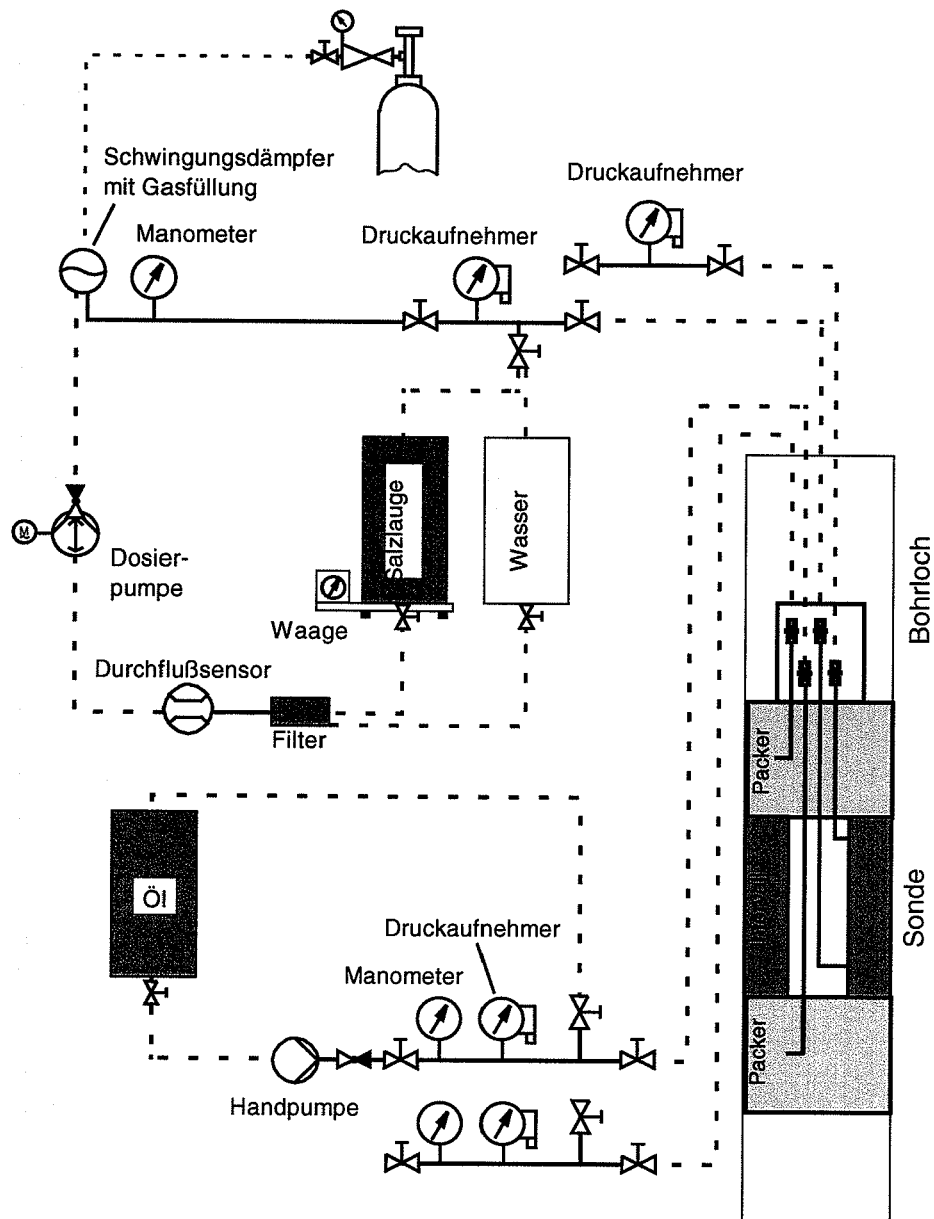
Als Bohrlochsonde diente ein Vierfachpackersystem, dessen Dichtelemente mittels Hydrauliköl gespannt wurden. Die vier Dichtelemente haben eine Länge von jeweils 0.5 m und sind einzeln zu setzen; der maximale Öldruck beträgt 100 bar. Das mittlere Testintervall ist 0.8 m lang, während die beiden äußeren Kontrollintervalle eine Länge von jeweils 0.3 m haben.



**Abb. 4.3** Schematische Darstellung der Permeabilitätsmeßapparatur.

Die Kontrollintervalle haben die Aufgabe, möglichen Gasfluß aus dem Testintervall an den inneren Dichtelementen vorbei und zurück ins Bohrloch zu identifizieren (bei schlechter An-kopplung der Packer). Sie können auch als Injektionsintervalle eingesetzt werden, wenn eine Intervalllänge von 0.8 m als zu lang erscheint. Die Sonde ist für Bohrlöcher von 55 bis 60 mm Durchmesser geeignet. Als Injektionsmedium wurde Stickstoff eingesetzt.

Zur Datenerfassung diente eine zehnkanalige automatische Registriereinheit auf PC-Basis.



**Abb. 4.4** Apparatur zur Flüssigkeitsinjektion.

Die Apparatur zur Durchführung der Flüssigkeitsinjektionstests wurde im Projekt "Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge" /WZI 98/ entwickelt und ist in Abb. 4.4 schematisch dargestellt.

Als Packersonde wurde ein Doppelpackersystem eingesetzt, das wie das Packersystem für die Gasinjektionstests für Bohrlöcher von 55 bis 60 mm Durchmesser geeignet ist und mit Hydrauliköl gesetzt wird. Sowohl das Testintervall als auch die beiden Dichtelemente haben eine Länge von je 1 m.

Testfluid war im Gegensatz zu den Gasinjektionstests eine gesättigte Salzlauge, und zwar sogenannte IP9-Lösung. Die Ionenkonzentration dieser Lösung entspricht dem in Tabelle 4.5 angegebenen Mineralgehalt.

**Tab. 4.5** Mineralgehalt der IP9-Lösung.

Mineral	Anteil in Gew.%
CaCl <sub>2</sub>	0.000717
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> *10H <sub>2</sub> O	0.002082
MgCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	0.1453
Sylvin	0.07564
Halit	0.2682
MgSO <sub>4</sub> *3.005H <sub>2</sub> O	0.07606

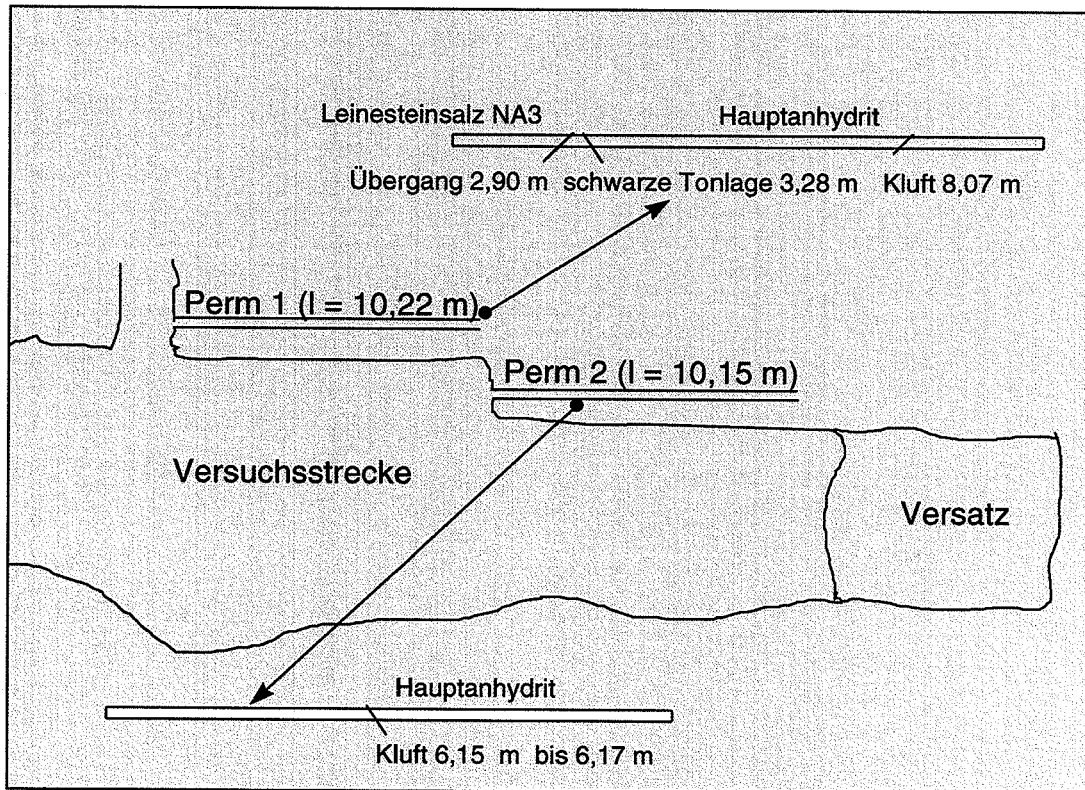
Die Lauge wird über eine Feindosierpumpe (Kolbenpumpe) ins Testintervall injiziert; dabei wird die injizierte Menge einerseits über einen Durchflußmesser und andererseits über kontinuierliche Wägung des Vorratsbehälters bestimmt. Pumpe und Durchflußmesser sind aufeinander abgestimmt und erlauben Fließraten zwischen 0.2 und 1.8 l/min. Der Intervalldruck wird in der Hin- und in der Rückleitung der Packersonde gemessen.

Nach der Injektion kann der Laugenbehälter durch einen Behälter mit Süßwasser ersetzt und die Anlage gespült werden, um Korrosionseffekte einzuschränken.

#### 4.2.1 Versuchsort

Die Versuchsstrecke befindet sich in der alten Hauptstrecke im Steinsalz und Anhydrit des Salzbergwerkes Bernburg.

Die Injektionstests wurden in zwei geeigneten Bohrlöchern mit 56 mm Durchmesser und etwa 10 m Länge durchgeführt, deren Lage aus Abb. 4.5 hervorgeht. Die Bohrlöcher sind so angelegt, daß Tests sowohl im Steinsalz (Na3) als auch im Anhydrit sowie im Übergangsbereich möglich sind (Bohrloch Perm1). Außerdem wurden eine ungefüllte geschlossene Kluft (Bohrloch Perm1) als auch eine gefüllte Kluft (Bohrloch Perm2) aufgeschlossen.

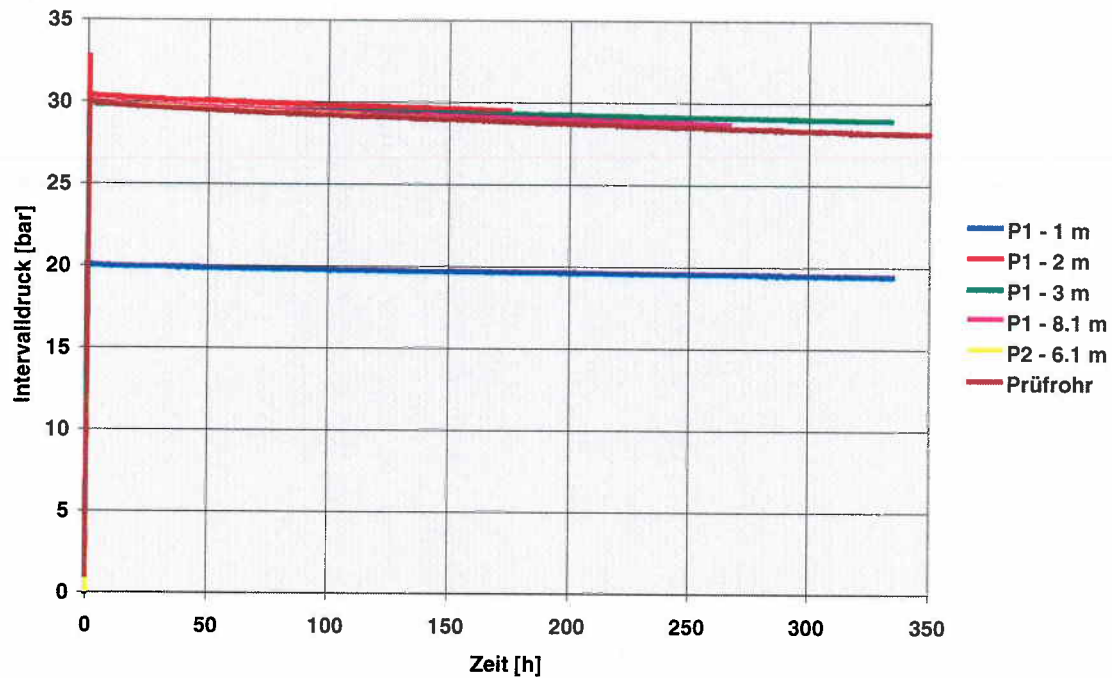


**Abb. 4.5** Lage der Testbohrlöcher in der Versuchsstrecke.

#### 4.2.2 Gasinjektionstests

Gasinjektionstests wurden in Bohrloch Perm1 in den Tiefen 1 m, 2 m, 3 m und 8.1 m sowie in Bohrloch Perm2 in der Tiefe 6.1 m durchgeführt. Dadurch wurden sowohl Steinsalz als auch Anhydrit sowie der Übergangsbereich mit der schwarzen Tonlage (siehe Abb. 4.5) und die beiden Klüfte durch Messungen erfaßt.

Bei der Messung in 1 m Tiefe wurde das obere Kontrollintervall von 0.3 m Länge als Injektionsintervall eingesetzt, bei den übrigen jeweils das mittlere Intervall von 0.8 m Länge. Der maximale Injektionsdruck betrug 20 bar (bei der Messung in 1 m Tiefe) bzw. 30 bar (bei den übrigen Messungen). Die Injektionsrate lag bei allen Tests zwischen 500 und 550 ml/min, woraus eine Injektionszeit von je etwa 30 Minuten bis zur Erreichung des Maximaldrucks resultierte. Der Druckverlauf während der jeweils anschließenden Schließphase ist in Abb. 4.6 dargestellt.



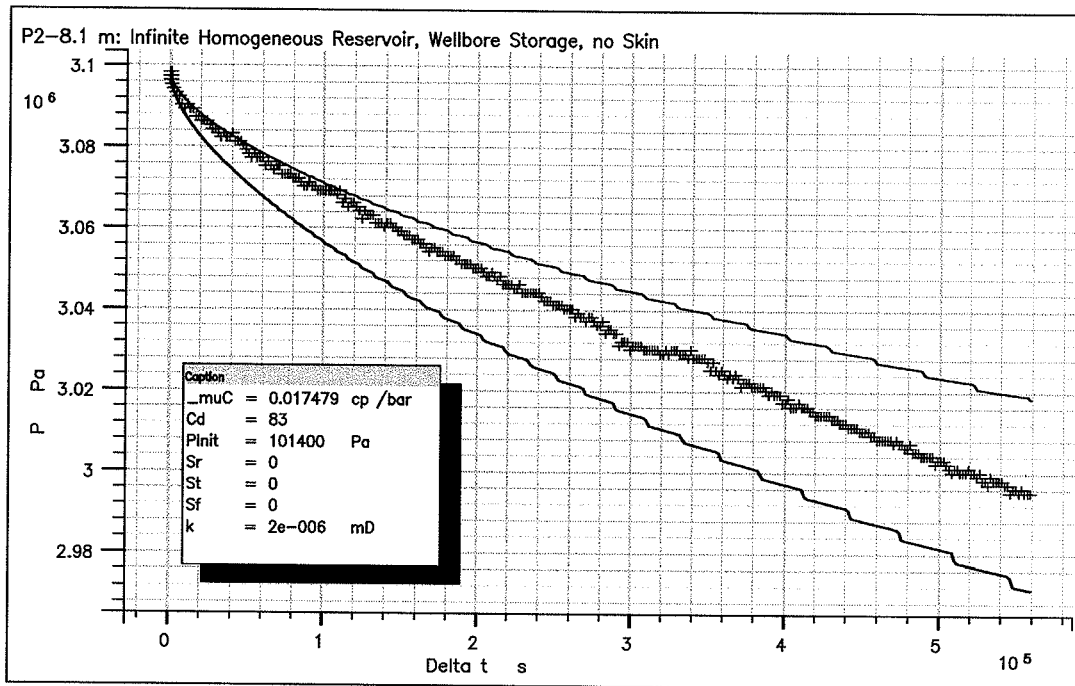
**Abb. 4.6** Druckverlauf während der Schließphasen der Gasinjektionstests.

Man erkennt, daß der Druckabfall jeweils sehr gering ist, woraus man bereits auf eine sehr niedrige Permeabilität des Gebirges schließen kann. Zusätzlich zu den eigentlichen Meßkurven ist in Abb. 4.6 auch eine Kurve dargestellt, die vor Einbau der Sonde in die Bohrlöcher in einem stählernen Prüfrohr aufgenommen wurde. Dieser Test diente der Feststellung der Systemdichtheit. Es ist deutlich zu sehen, daß die Prüfkurve praktisch mit den in den Bohrlöchern registrierten Druckverläufen übereinstimmt, so daß die während der Schließphasen ins Gebirge abfließende Gasmenge nur einen geringen Anteil des Druckabfalls verursachen kann. Bei der Ermittlung der Permeabilität aus den Druckkurven erhält man daher nur einen oberen Grenzwert, die tatsächliche Gebirgspermeabilität kann noch deutlich geringer sein.

Die Auswertung der Meßkurven erfolgte mit dem kommerziellen Programm Welttest /SGE 97/. Dieses führt eine Optimierung bestimmter Formationsparameter unter Zugrundelegung eines zu wählenden "Reservoirmodells" durch. Für die Auswertung der Messungen wurden folgende Modellannahmen getroffen:

Die Formation ist homogen und unbegrenzt und besitzt eine Porosität von 0.2 %.





**Abb. 4.7** Gemessener (+) und angepaßter (---) Druckverlauf für die Messung in Bohrloch Perm2; die beiden angepaßten Kurven entsprechen  $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  (obere Kurve) und  $2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  (untere Kurve).

Eine Teilsättigung des Porenraums mit Flüssigkeit wird vernachlässigt.

Das Bohrloch hat einen endlichen Radius und eine dem Intervallvolumen entsprechende Speicherfähigkeit.

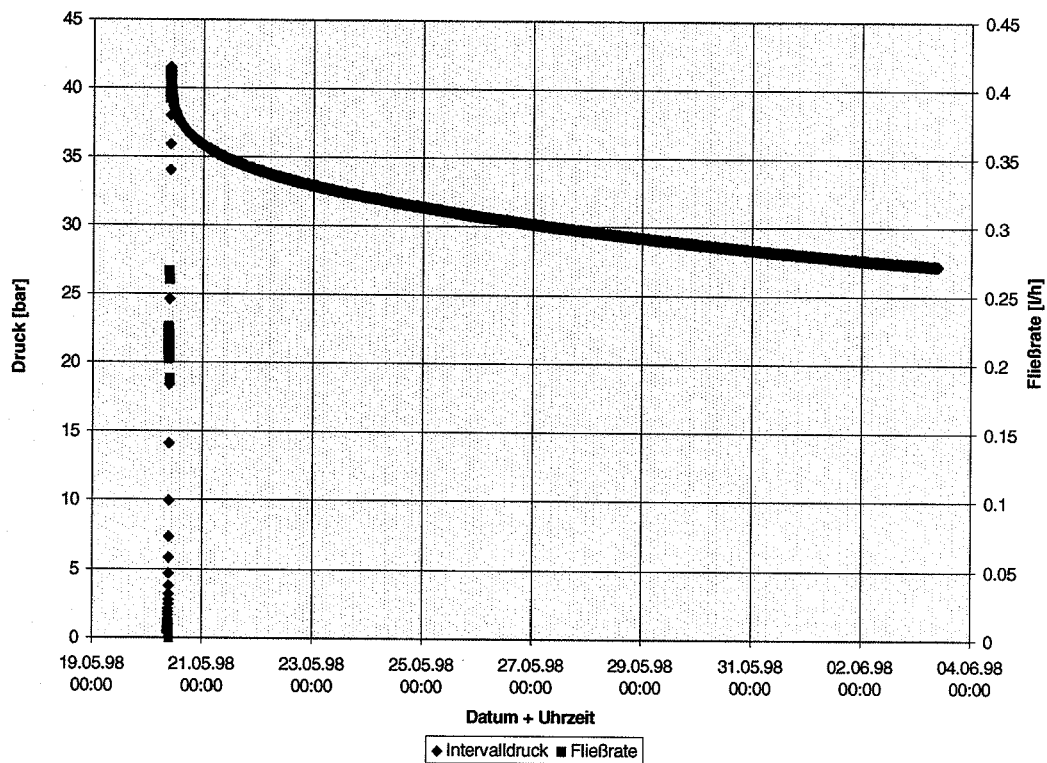
Abbildung 4.7 zeigt als beispielhaftes Ergebnis die Anpassung für die Messung in Bohrloch Perm2 in 6.1 m Tiefe. Anhand der Abbildung wird deutlich, daß man einen Wert von  $10^{-21} \text{ m}^2$  als oberen Grenzwert für die Gebirgspermeabilität annehmen kann. Allerdings muß man dabei anmerken, daß dies die effektive Permeabilität beim herrschenden Sättigungszustand ist. Da die beiden Bohrlöcher mit Laugenspülung gebohrt worden sind, ist es wahrscheinlich, daß der Bohrlochnahbereich zumindest teilweise wassergesättigt ist. Durch eine Teilsättigung mit Wasser wird die Permeabilität gegenüber Gas jedoch deutlich herabgesetzt. Allerdings zeigten die Flüssigkeitsinjektionstests, daß auch die Permeabilität gegenüber Lauge sehr gering ist (siehe folgender Abschnitt), so daß nicht zu erwarten ist, daß die Permeabilität unterschätzt wurde.

### 4.2.3 Flüssigkeitsinjektionstests

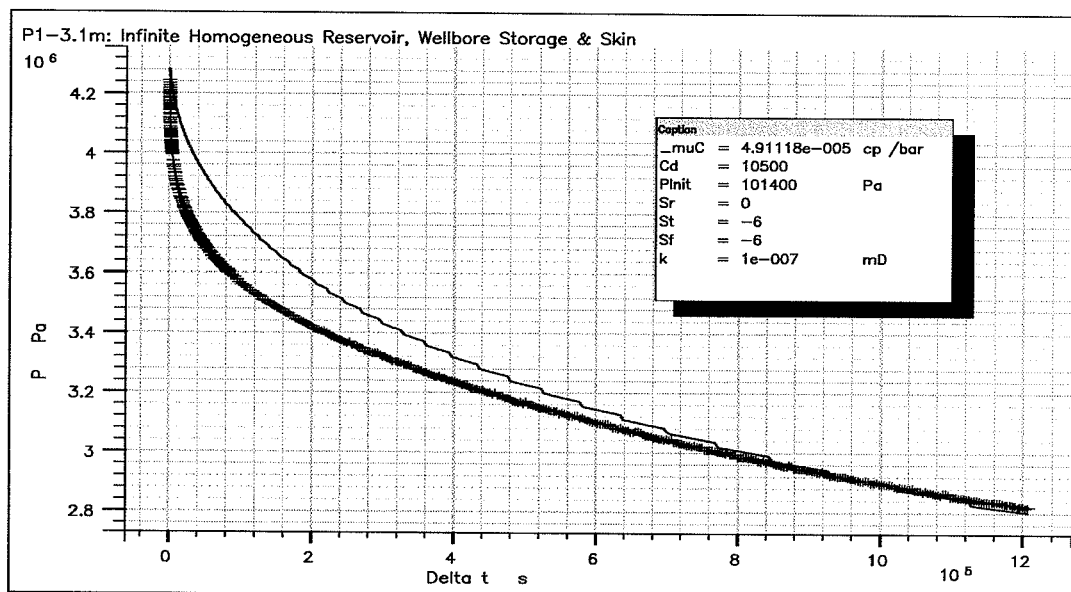
Flüssigkeitsinjektionstests wurden in Bohrloch Perm1 in 3.1 m Tiefe (Übergangsbereich zwischen Steinsalz und Anhydrit) und in Bohrloch Perm2 in 6.1 m Tiefe (gefüllte Kluft) durchgeführt.

Bei beiden Tests wurde zunächst das Testintervall bei offener Rückleitung mit Lauge gefüllt. Anschließend wurde die Rückleitung geschlossen und ein Injektionsdruck von maximal 40 bis 45 bar aufgebaut. Die Fließraten lagen jeweils bei 0.2 bis 0.4 l/h. Die Zeit bis zum Erreichen des Maximaldruckes betrug 35 Minuten (Perm1) bzw. 14 Minuten (Perm2). Die insgesamt injizierten Flüssigkeitsmengen lagen bei 415 ml (Perm1) bzw. bei nur 74 ml (Perm2). Der Druckverlauf während der Injektions- und der Schließphase beim Test in Perm1 ist in Abb. 4.8 dargestellt. Beim Test in Perm2 traten Probleme bei der Datenaufzeichnung auf, die Ergebnisse sind jedoch vergleichbar.

Abb. 4.9 zeigt die Auswertung des Flüssigkeitsinjektionstests in Bohrloch Perm1 mittels Weltest. Eine befriedigende Anpassung kann hier nur erreicht werden, wenn ein verhältnismäßig großer negativer Skinfaktor ( $S = -6$ ) eingeführt wird, der eine Auflockerung des Bohrlochnahbereiches bedeuten würde. Wahrscheinlicher als eine derartige Auflockerung ist, daß ein noch vorhandenes Luftkissen im Testintervall bzw. eine nicht vollständige Wassersättigung des Porenraums den gemessenen Kurvenverlauf beeinflussen. Die gleiche Beobachtung wurde auch bei früheren Messungen gemacht /WZI 98/. Der ermittelte Permeabilitätswert von  $10^{-22} \text{ m}^2$  kann aufgrund dieser Einflüsse zwar nur als Schätzwert angesehen werden, bestätigt jedoch die Ergebnisse der Gasinjektionstests.



**Abb. 4.8** Druck- und Fließratenkurve für den Flüssigkeitsinjektionstest in Perm1 während der Injektions- und der Schließphase.



**Abb. 4.9** Gemessener (+) und angepaßter (---) Druckverlauf für die Schließphase des Flüssigkeitstests in Bohrloch Perm1.

## 5 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Kenntnis des petrophysikalischen Verhaltens des Gesteinsverbandes - Steinsalz ( $\text{Na}_2$ )/Hauptanhydrit (A3) /Grauer Salzton (T3) - ist für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salz von wesentlicher Bedeutung. In den durchzuführenden Sicherheitsanalysen wird ein Zutritt von konzentrierten Salzlösungen in ein Endlager über den Hauptanhydrit unterstellt. In diesem FuE-Vorhaben, das gemeinsam mit dem Institut für Gebirgsmechanik in Leipzig am gleichen Versuchsort im Salzbergwerk Bernburg durchgeführt wird, soll die Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes untersucht werden, wenn natürliche bzw. künstliche Kluftsysteme vorhanden sind, die mechanische oder hydraulische Schwächezonen darstellen. Dabei werden seismologische Techniken verwendet, die Informationen für alle jene Gebirgsbereiche liefern, in denen seismische Ereignisse erzeugt werden. Zusätzlich werden seismische Laufzeit- und Amplitudeneffekte zur Bestimmung der Gebirgsbeschaffenheit benutzt und hydraulische Verfahren zur Ermittlung der Durchlässigkeit eingesetzt. Es ist das Ziel der FuE-Arbeiten, gesicherte und übertragbare petrophysikalische Parameter für numerische Berechnungen und spätere Langzeitsicherheitsanalysen eines Endlagers im Salinar bereitzustellen. Die Arbeiten der GRS sind dabei schwerpunktmäßig auf die Nachbetriebsphase ausgerichtet.

Neben der zeitlichen Verteilung läßt sich, zumindest bei einigen Ereignissen, auch die räumliche Verteilung abschätzen. Im Gegensatz zu dem niederfrequenten Aufnehmerfeld, das aus 10 einzelnen Stationen besteht, steht bei den hochfrequenten Messungen nur jeweils eine Station zur Verfügung. Dies erfordert die Anwendung anderer Ortungsalgorithmen. Wichtige Merkmale zur Abschätzung des Ortes der Rißbildung ist der Laufzeitunterschied zwischen der P- und der S-Welle. Da aus früheren Versuchen sowie aus den niederfrequenten Schallemissionsmessungen die seismischen Geschwindigkeiten ziemlich genau bekannt sind, kann aus dem Laufzeitunterschied der verschiedenen Wellentypen auf die Entfernung des Ereignisses von der Station geschlossen werden. Verwendet man weiterhin Aufnehmer mit nahezu gleicher Empfangscharakteristik, so lassen sich aus den Amplitudenverhältnissen der drei Komponenten untereinander Richtungspeilungen vornehmen. Allerdings sind diese Peilungen nur selten sinnvoll, da dazu entsprechend große Amplituden auf allen drei Komponenten der Station vorhanden sein müssen. Dies ist maximal für die wenigen starken Ereignisse der Fall. Darüber hinaus ist das Peilen von nur einer Station aus mit

großen Ungenauigkeiten behaftet und nicht mit der Ortung mittels mehrerer Stationen vergleichbar. Immerhin erhält man über die Differenz der P- und S-Wellenlaufzeit einen Anhaltspunkt über die Eindringtiefe der Registrierungen.

Die zeitliche Differenz der P- und S-Einsätze beträgt bei den registrierten Ereignissen maximal 500  $\mu$ s. Dies entspricht bei P- und S-Wellengeschwindigkeit von ca. 6000 m/s bzw. 3200 m/s einer maximalen Entfernung von ca. 5 m. Die Eindringtiefe dieses Verfahrens ist, bedingt durch die verwendeten hohen Frequenzen, sehr gering und beschränkt sich auf ca. 10 m je nach Stärke des Signals. Unter diesem Gesichtspunkt stellt eine Aktivität von 3 - 4 (schwachen) Ereignissen pro Tag aus einem Einzugsbereich von 1 - 2 m Tiefe eine bemerkenswert hohe Aktivität dar, die bisher in diesem Umfang nicht erwartet wurde. Daß keine Ereignisse aus größeren Entfernungen registriert wurden, ist ein Anzeichen für die Existenz bzw. weitere Ausbildung einer Auflockerungszone bis in Tiefen von 1 - 2 m. Dies korreliert gut mit den Ergebnissen der geoelektrischen Messungen (s.u.).

Beide Messungen im Bernburger Anhydrit zeigen eine reproduzierbare generelle Widerstandsverteilung. Die kleinräumigen Anomalien der ersten Meßkampagne sind, entgegen der ersten Interpretation, nicht auf vorhandene Bohrlöcher zurückzuführen. Da während der ersten Messung keine direkte Qualitätskontrolle der Werte vor Ort vorgenommen wurde, kann es sich durchaus um Meßfehler aufgrund schlechter Ankopplungen o.ä. handeln. Die Anomalien sind jedenfalls zu klein, um auf die gesuchten Feuchtigkeitsunterschiede zurückgeführt werden zu können.

Die generelle Widerstandsverteilung zeigt im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Messungen im Bergwerk Pöthen (s. Abschlußbericht AnTon), daß der Bereich der Auflockerungszone durch die Messungen in Bernburg nicht vollständig erfaßt wird. Die geoelektrisch wirksame Auflockerungszone, die sich durch die sprengende Auffahrung des Versuchsortes herausgebildet hat, ist in diesem Fall mächtiger als die Eindringtiefe des Modells von 1.5 m.

Die höheren Widerstände im rechten Teil des Profils sind entweder auf ein verringertes Wasservolumen oder die Auswirkungen der zunehmend dreidimensionalen Topographie des Versuchsortes in diesem Bereich zurückzuführen.

Im Bereich der Nische im Bernburger Anhydrit wurden 1996 Schallemissionen in den Frequenzbereichen 1 - 20 kHz und 10 - 100 kHz registriert sowie geoelektrische Messungen durchgeführt. Die niederfrequenten Messungen zeigten eine sehr geringe seismische Akti-

vität an, die deutlich unterhalb der früher gemessenen Aktivität lag. Mögliche Gründe dafür könnten sein:

- ungünstige Ankopplungen der Sonden
- größere Entfernung der aktiven Abbaugelände
- Spannungsabbau durch Rißbildung in höheren Frequenzbereichen.

Um gerade den letzten Punkt näher zu untersuchen, wurden Registrierungen in dem höheren Frequenzbereich 10 - 100 kHz vorgenommen. Diese Messungen ergaben eine geringe Aktivität in diesem Frequenzbereich in unmittelbarer Umgebung der Sonden. Dies ist ein Hinweis darauf, daß es nach mehrjähriger Standzeit der Nische zu keiner nennenswerten Auflockerung in den Randbereichen mehr kommt. Dies korreliert mit den Ergebnissen der geoelektrischen Wiederholungsmessungen, die ebenso keine Änderung des streckennahen Bereichs belegen.

Mit Hilfe der untersuchten tomographischen Algorithmen ART, SIRT und MART ist eine zerstörungsfreie Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung in Bohrkernen möglich. Geschwindigkeitsunterschiede ergeben sich aufgrund von Rißbildungen in der Probe. Diese Risse entstehen bei einaxialer Belastung bzw. thermischer Beanspruchung der Probe dort, wo die aufgeprägten Spannungen die lokalen Festigkeitsgrenzen überschreiten. Die Ankoppelungseffekte lassen sich mit Hilfe experimentell bestimmter Korrekturkurven korrigieren und stellen kein prinzipielles Problem bei den Messungen und der Auswertung dar. Zur Erreichung akzeptabler Genauigkeiten an realen Proben ist eine Strahlenverfolgung („ray-tracing“) erforderlich. Bisher ist ein solches „ray-tracing“ in die vorhandenen Algorithmen noch nicht eingebaut.

Die Verbandsfestigkeit wird dabei wesentlich durch die Klüftung bestimmt. Durch den Vergleich der modellmechanisch berechneten Spannungs- und Deformationsfelder von Einlagerungskammern mit den im Labor und in-situ bestimmten Gesteinsparametern (kritischen Spannungen und Deformationen) läßt sich mit dem gegenwärtig vorhandenen Wissen eine eventuelle Überschreitung der Gesteinsfestigkeit erkennen. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen hinsichtlich einer vergrößerten Durchlässigkeit des Gebirgshorizontes gilt es jedoch noch zu untersuchen.

Im vorliegenden Bericht ist eine Übersicht der Arbeitsschwerpunkte dargestellt. Das Vorhaben bestand in der Schaffung eines standortunabhängigen Instrumentariums für Prognoserechnungen sowie von Bewertungskriterien für die Beurteilung der Barrierefunktion des Verbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton in der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers. Im konkreten Anwendungsfall ist die Frage zu beantworten, wie ein Endlager auszulegen ist, so daß die geologische Barriere hinsichtlich des Verhaltens von Anhydrit und Salzton in der Betriebs- und Nachbetriebsphase unbeeinträchtigt bleibt.

Die komplexe Interaktion zwischen Einspannung, Deformation und Durchlässigkeit in den das Salzgestein durchziehenden vorwiegend steifen und elastischen Schichten von Anhydrit und Salzton ist bis in die Nachbetriebsphase zu betrachten. Die FuE-Arbeiten sind für die Endlager radioaktiver Abfälle im Steinsalz und für die untertägige Ablagerung von Abfällen in UTD des Types 1 insbesondere hinsichtlich der Gewährleistung eines vollständigen Einschlusses sowie der Barrierewirksamkeit wesentlich. Es ist vorgesehen, die gewonnenen Untersuchungsergebnisse, die angewendeten Untersuchungsmethoden und Modelle (Verständnismodelle und konkrete rechentechnische Nachweisverfahren zur Beurteilung der Barrierewirksamkeit des das Endlager umschließenden Salinars) auf andere Lagerstättenbedingungen und Standorte zu übertragen.

## 6 Literatur

- /AMY 88/ AMYX, J.; BASS, Jr., D. M.; WHITING, R. L., (1988): Petroleum Reservoir Engineering. Physikal Properties.- McGraw-Hill Classic Textbook Reissue, McGraw-Hill Book Company, New York, St. Louis, San Francisco.
- /EAR 77/ EARLOUGHER, R. C. Jr., (1977): Advances in Well Test Analysis, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., Dallas.
- /FLA 95/ FLACH, D., (1995): Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton.- Band IVb: Gläß, F.: Bestimmung der Verbandseigenschaften mittels geophysikalischer und hydraulischer Methoden. GSF-Bericht 26/95.
- /GAR 79/ GARTUNG, E., (redaktionelle Bearbeitung) (1979): "Einaxiale Druckversuche an Gesteinsproben", Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG) vorgenommen. (In: Die Bautechnik, 56. Jahrgang, Heft 7, Berlin, S. 217-220).
- /MIL 78/ MILITZER, H., SCHÖN, J., STÖTZNER, U., STOLL, R., (1978): Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- /SGE 97/ SCHLUMBERGER-GEOQUEST, (1977): Weltest 200 Technical Description, Logined BV.
- /WZI 98/ WIECZOREK, K., ZIMMER, U., (1998): Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Steinsalzgebirge, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Versuchsort im Bernburger Anhydrit mit Bohrungen, Steinsalz/Anhydrit-Grenze und Schallemissionen vor der Auffahrung der Versuchskammer .....	11
Abb. 2.2	Versuchsort im Bernburger Anhydrit mit Bohrungen, Steinsalz/Anhydrit-Grenze und Schallemissionen nach der Auffahrung der Versuchskammer .....	11
Abb. 2.3	Schallemissionsaktivität an der Sonde 6 (bezogen auf ein Meßintervall von 7 Stunden / Tag).....	14
Abb. 2.4	Skizze der Nische im Anhydrit mit den Meßorten der hochfrequenten Schallemissionsmessungen .....	16
Abb. 2.5	Typisches Ereignis mit geringer Energie.....	17
Abb. 2.6	Typisches Ereignis mit großer Energie .....	17
Abb. 2.7	Schallemissionsaktivität .....	19
Abb. 2.8	Verteilung der scheinbaren und spezifischen Widerstände im Bernburger Anhydrit (Frühjahr 1994).....	23
Abb. 2.9	Verteilung der scheinbaren und spezifischen Widerstände im Bernburger Anhydrit (November 1996) .....	23
Abb. 2.10	Laborergebnisse an Anhydritproben .....	25
Abb. 3.1	Prinzip der aktiven seismischen Tomographie ohne Strahlenbrechung .....	28
Abb. 3.2	Modellrechnungen mit dem ART-Algorithmus.....	33
Abb. 3.3	Modellrechnungen mit dem ART-Algorithmus bei verringerter Strahlanzahl .....	34
Abb. 3.4	Das Prüfkarussell mit einem Bohrkern aus Anhydrit .....	36
Abb. 3.5	Vorlaufzeiten an einer homogenen Stahlprobe .....	38

Abb. 3.6	Abhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit von der Aufheizzeit; Aufheiztemperatur: 85 °C; Probe: 7B711 .....	40
Abb. 3.7	Schallgeschwindigkeit unter einaxialer Belastung einer Bernburger Anhydritprobe .....	41
Abb. 3.8	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 4B711 .....	45
Abb. 3.9	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 5B711 .....	45
Abb. 3.10	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 7B711 .....	46
Abb. 3.11	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 8B711 .....	46
Abb. 3.12	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 9B711 .....	47
Abb. 3.13	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 10B711 .....	47
Abb. 3.14	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44.6 MPa; Probe 11B711 .....	48
Abb. 3.15	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/1 .....	49
Abb. 3.16	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/1 .....	49
Abb. 3.17	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/3 .....	50

Abb. 3.18	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/3 .....	50
Abb. 3.19	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/4 .....	51
Abb. 3.20	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/4 .....	51
Abb. 3.21	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 44 MPa; Probe IIB711/6 .....	52
Abb. 3.22	Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Be- und Entlastung bis 64 MPa; Probe IIB711/6 .....	52
Abb. 4.1	Abhängigkeit der Permeabilität von der Druckdifferenz ( $\sigma_{\text{hyd}}-p_i$ ) bei Variation des hydrostatischen Einspanndrucks $\sigma_{\text{hyd}}$ und bei Variation des Injektionsdrucks $p_i$ an Bernburger Anhydrit; Probe 8B711 nach Aufheizen auf 85 °C; (die Zahlen geben die Reihenfolge der Messungen an) .....	60
Abb. 4.2	Klinkenberg-Korrektur bei Bernburger Anhydrit nach Aufheizung auf 85 °C; Differenzdruck zwischen Einspann- und Injektionsdruck = 1 MPa; Probe 8B711; Klinkenberg-Permeabilität $k_{\infty}= 7.39 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ .....	61
Abb. 4.3	Schematische Darstellung der Permeabilitätsmeßapparatur.....	66
Abb. 4.4	Apparatur zur Flüssigkeitsinjektion.....	67
Abb. 4.5	Lage der Testbohrlöcher in der Versuchsstrecke.....	69
Abb. 4.6	Druckverlauf während der Schließphasen der Gasinjektionstests.....	70
Abb. 4.7	Gemessener (+) und angepaßter (---) Druckverlauf für die Messung in Bohrloch Perm2; die beiden angepaßten Kurven entsprechen $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ (obere Kurve) und $2 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ (untere Kurve) .....	71

Abb. 4.8	Druck- und Fließratenkurve für den Flüssigkeitsinjektionstest in Perm1 während der Injektions- und der Schließphase.....	73
Abb. 4.9	Gemessener (+) und angepaßter (---) Druckverlauf für die Schließphase des Flüssigkeitstests in Bohrloch Perm1 .....	73

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Statischer Elastizitätsmodul von Bernburger Anhydritkernen bei unterschiedlichen Belastungszuständen.....	44
Tab. 3.2	Mittlerer Elastizitätsmodul bei Belastung bis 44 MPa und 64 MPa.....	53
Tab. 3.3	Permeabilitätsmessung an Bernburger (B) und Pöthener (V) Anhydrit im Anlieferungszustand; Hydrostatischer Einspanndruck: 2 MPa; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff.....	54
Tab. 3.4	Zusammenstellung der dynamischen Elastizitätsmoduln für verschiedene einaxiale Belastungen .....	55
Tab. 4.1	Zusammenstellung der Gaspermeabilitäten von Bernburger Anhydritkernen im Anlieferungszustand und nach Aufheizung auf 85 °C; hydrostatischer Einspanndruck: 5 MPa; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff. ....	59
Tab. 4.2	Zusammenstellung der Gaspermeabilitäten von Anhydritkernen im Ausgangszustand; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff .....	62
Tab. 4.3	Anlieferungszustand und nach einaxialer Belastung bis 70 MPa; hydrostatischer Einspanndruck bei Permeabilitätsmessung: 2 MPa; Injektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff .....	63
Tab. 4.4a	Ergebnisse der Permeabilitätsmessung unter in-situ-naher Spannungsbedingung; Gasinjektionsdruck: 2 MPa; Meßgas: Stickstoff .....	64
Tab. 4.4b	Ergebnisse der Permeabilitätsmessung unter in-situ-naher Spannungsbedingung; Gasinjektionsdruck: 5 MPa; Meßgas: Stickstoff .....	64
Tab. 4.4c	Ergebnisse der Permeabilitätsmessung bei Vertauschen der axialen und der radialen Spannungsbedingungen am Beispiel der Probe B712/4; Injektionsdruck 2 MPa und 5 MPa; Meßgas: Stickstoff.....	65
Tab. 4.5	Mineralgehalt der IP9-Lösung.....	68

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**  
Telefon +49 221 2068-0  
Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute  
**85748 Garching b. München**  
Telefon +49 89 32004-0  
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200  
**10719 Berlin**  
Telefon +49 30 88589-0  
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4  
**38122 Braunschweig**  
Telefon +49 531 8012-0  
Telefax +49 531 8012-200

**[www.grs.de](http://www.grs.de)**