



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz

Ableitung einer  
Permeabilitäts-  
Druck-Relation für  
Langzeitsicherheits-  
analysen



Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH

## Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz

Ableitung einer  
Permeabilitäts-  
Druck-Relation für  
Langzeitsicherheits-  
analysen

Ingo Müller-Lyda

Juli 1999

### **Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02E8855-2 gefördert.

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

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei dem Autor.

**GRS - 151**  
**ISBN 3-931995-13-5**

**Deskriptoren:**

Ausbreitung, Geomechanik, Langzeitsicherheit, Modell, Permeabilität, Salz, Schadstofftransport, Strömung

## Vorwort

Die Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern erfordert ein leistungsfähiges und erprobtes Instrumentarium. Dafür werden Rechenprogramme und Daten eingesetzt, mit denen die relevanten physikalischen und chemischen Prozesse bei Freisetzung von Schadstoffen, deren Ausbreitung im Deckgebirge und Exposition in der Biosphäre beschrieben werden. Ziel des Vorhabens "Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern", FKZ 02 E 8855 2, war die Verfolgung nationaler und internationaler Entwicklungen sowie die Auswertung wissenschaftlicher Ergebnisse. Dabei standen experimentelle und theoretische FuE-Vorhaben im Vordergrund, die wichtige Beiträge zu Modellvorstellungen und Modelldaten für Langzeitsicherheitsanalysen lieferten. Eine weitere relevante Aufgabe stellte die Entwicklung von Instrumentarien für die Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagern in Hartgesteinsformationen dar.

Dieses sonderfinanzierte Vorhaben des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie wurde in der Zeit vom 01.04.1996 bis 30.09.1999 durchgeführt. Zu den schwerpunktmäßig während des Projektes bearbeiteten Themen wurden die folgenden sechs wissenschaftlichen Einzelberichte angefertigt.

- GRS-Bericht 129 Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle
- GRS-Bericht 148 Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsbeziehungen für Salzgrus
- GRS-Bericht 151 Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz. Ableitung einer Relation zur Modellierung von Auflockerungszonen innerhalb von Langzeitsicherheitsanalysen
- GRS-Bericht 154 Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany

GRS-Bericht 155 Zusammenstellung und Auswertung geochemischer Untersuchungen zum Radionuklidverhalten aus ausgewählten Studien über Natürliche Analoga

GRS-Bericht 156 Grundlegende Ausbreitungsrechnungen mit dem Transportprogramm CHETLIN

In einem zusammenfassenden Abschlußbericht wurden außerdem alle während der Laufzeit des Projekts durchgeführten Arbeiten in Kurzbeiträgen zusammengefaßt:

GRS-Bericht 153 Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Abschlußbericht

## Abstract

In den Randbereichen untertägiger Hohlräume bilden sich nach der Auffahrung als Folge der dabei auftretenden deviatorischen Spannungszustände sogenannte Auflockerungszonen aus, deren Mächtigkeit im Fall einer Strecke in Steinsalz 1-2 m beträgt. Gegenüber dem unverritzten Gebirge sind in einer Auflockerungszone die Werte einiger gesteinsmechanischer Parameter verändert. Als wichtigste dieser Änderungen wird die erhöhte Permeabilität in den Auflockerungszonen angesehen. Dadurch werden die Strömungswiderstände in einzelnen Bereichen reduziert und damit eine potentielle Ausbreitung von Schadstoffen begünstigt.

Natürliches, ungestörtes Steinsalz besitzt eine sehr niedrige Permeabilität im Bereich um  $10^{-21} \text{ m}^2$ , weshalb solche Formationen für Gase und Laugen im technischen Sinne undurchlässig sind. Am Rand einer Auflockerungszone kann die Permeabilität demgegenüber um mehrere Größenordnungen auf  $10^{-16}$  bis  $10^{-17} \text{ m}^2$  anwachsen. Dadurch entsteht eine Wegsamkeit für die Ausbreitung von Gasen und Flüssigkeiten, über die im Endlagerbereich Druckausgleichs- und Schadstofftransportvorgänge möglich oder begünstigt werden. Diese Wegsamkeiten bestehen jedoch nur vorübergehend, weil die Permeabilität der Auflockerungszonen im Salinar durch die Gebirgskonvergenz erfahrungsgemäß wieder in den Bereich der ungestörten Gesteinsformation zurückgeht.

Ein nennenswerter Transport von Gas oder Lauge durch Auflockerungszonen in oder aus einem verschlossenen Endlagerbereich kann dann auftreten, wenn ein Streckenschluß eine im Vergleich zum umgebenden Streckensaum ähnliche oder geringere Permeabilität besitzt. In Langzeitsicherheitsanalysen müssen daher für eine möglichst realitätsnahe Modellierung des Schadstofftransports im Nahfeld eines Endlagers die Ausdehnung der Auflockerungszonen und deren Permeabilität unter den dort langfristig bestehenden Randbedingungen berücksichtigt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, aus den vorhandenen experimentellen Daten aus Laborversuchen über die druck- und zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz Relationen zur Beschreibung der In-situ-Permeabilität der Auflockerungszonen in einem Endlager im Salinar abzuleiten. Da die experimentellen Randbedingungen bei den Laboruntersuchungen teilweise atypisch für die Verhältnisse in einem Endlager sind, werden in einem ersten Schritt die Untersuchungsergebnisse ausgewählt, die zum Er-

reichen der obengenannten Zielsetzung beitragen. In einem zweiten Schritt werden physikalisch begründete oder phänomenologische Funktionen an die ausgewählten Daten angepaßt.

Damit kann eine Relation für die Beschreibung der kurzzeitigen Permeabilitätsänderung von aufgelockertem Steinsalz unter Druckeinfluß abgeleitet werden. Für die langfristige Permeabilitätsabnahme unter Druckeinwirkung kann jedoch nur für den Fall der Durchströmung mit Lauge eine provisorische, noch unzureichend durch experimentelle Daten abgesicherte Relation abgeleitet werden. Bei der Beschreibung der Zeitabhängigkeit besteht die Schwierigkeit, daß die Zeiträume, die in Langzeitsicherheitsanalysen berücksichtigt werden müssen, ein Vielfaches der experimentell möglichen Meßzeiträume betragen können.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
	<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Permeabilität von Steinsalz</b> .....	<b>5</b>
2.1	Experimentelle Untersuchungsmethoden.....	5
2.2	Problematik der Permeabilitätsmessungen im festen Steinsalz.....	7
<b>3</b>	<b>Ableitung einer zeitunabhängigen Permeabilitäts-Spannungs- relation</b> .....	<b>9</b>
3.1	Experimentelle Ergebnisse zur druckabhängigen Permeabilität .....	9
3.1.1	Messungen von Borgmeier.....	10
3.1.2	Messungen von Schopper.....	13
3.1.3	Messungen von Jockwer .....	15
3.1.4	Messungen von Gloyna und Reynolds.....	18
3.1.5	Messungen von Lai .....	18
3.1.6	Messungen von Peach .....	21
3.2	Anpassung der Modelle zur Beschreibung der Druckabhängigkeit.....	22
3.2.1	Das Modell von Walsh.....	23
3.2.2	Ableitung einer phänomenologischen Permeabilitäts-Druck-Beziehung....	28
3.2.3	Bestimmung der Regressionskurven für die experimentellen Daten.....	30
3.3	Empfehlung für eine Permeabilitäts-Druck-Beziehung.....	33
<b>4</b>	<b>Ableitung einer Relation für die zeitabhängige Permeabilität</b> .....	<b>37</b>
4.1	Zusammenhang von Permeabilität und Auflockerung in Steinsalz .....	37
4.2	Zusammenhang von Permeabilität, Druck und Zeit .....	40
4.3	Experimentelle Ergebnisse aus Dauerversuchen.....	41
4.3.1	Messungen von Förster.....	42

4.3.2	Messungen von Peach .....	43
4.3.3	Messungen der TU Bergakademie Freiberg .....	45
4.3.4	Messungen von Borgmeier.....	48
4.4	Anpassung der Modelle zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit .....	52
4.4.1	Überprüfung des Dilatanzmodells .....	52
4.4.2	Überprüfung der Anwendbarkeit des Potenzgesetzes .....	55
4.4.3	Bewertung und Vergleich von Dilatanzmodell und Potenzgesetz .....	56
4.5	Empfehlung einer Relation für zeitabhängige Permeabilitätsänderungen..	59
<b>5</b>	<b>Temperaturabhängigkeit.....</b>	<b>61</b>
5.1	Zeitunabhängige Permeabilitätsänderungen.....	63
5.2	Zeitabhängige Permeabilitätsänderungen.....	64
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>71</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>75</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>77</b>

# 1 Einleitung

Erfahrungsgemäß bilden sich bei der Herstellung unterirdischer Hohlräume infolge der dabei auftretenden Spannungsumlagerungen im Gebirge sogenannte Auflockerungszonen. Auflockerungszonen umgeben die aufgefahrenen Hohlräume saumartig und besitzen mechanische und hydrologische Eigenschaften, die sich von denen im ungestörten Gebirge unterscheiden. Mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers haben die Änderungen der Gesteinseigenschaften zur Folge, daß in den Auflockerungszonen die mechanische Stabilität und das Isolationspotential für Gase und Flüssigkeiten verringert werden.

Auflockerungszonen bilden sich auch in viskoelastischen Salzgesteinen um Bohrlöcher, Strecken, Kammern und Schächte. Ihre Entstehung und die anschließenden zeitlichen Veränderungen vollziehen sich in Steinsalz in vier Phasen:

1. Ausbildung der Auflockerungszonen nach der Auffahrung durch spontane und verzögerte Rißbildungen infolge von deviatorischen Spannungen.
2. Änderung der Gesteinseigenschaften durch Feuchteaustausch mit der Umgebungsluft bzw. mit den Grubenwettern.
3. Allmähliche Verkleinerung der Auflockerungszonen durch Kriechkompaktion infolge der Gebirgskonvergenz.
4. Abnahme bzw. Verschwinden der Auflockerungszonen nach Rißausheilung bei behinderter Kriechverformung.

Im einzelnen können Auflockerungszonen durch die folgenden Merkmale charakterisiert werden:

- deviatorische Spannungsverteilung und geringerer petrostatischer Druck,
- erhöhte Porosität infolge der Bildung makro- und mikroskopischer Risse,
- erhöhte Permeabilität,
- geringere mechanische Festigkeit und
- geringere Sättigung mit Formationswasser bzw. Salzlauge

als im unverritzten Salzgestein [ 3 ]. Festkörperdrücke, die auf die Auflockerungszonen einwirken, können sich aufbauen, wenn die Stöße der Gebirgshohlräume auf ein Widerlager auflaufen. Dieses Auflaufen kann entweder durch die Gebirgskonvergenz oder durch Ausdehnung von technischen Barrieren hervorgerufen werden, wenn diese quellfähige Materialien enthalten. Als Widerlager können in einem Endlager entweder technische Barrieren wie Verschlüsse und Dämme oder der Versatz agieren. Konstruktion und Geometrie dieser technischen Barrieren beeinflussen so ebenfalls den zeitlichen Druckaufbau und damit auch die Durchlässigkeit in den angrenzenden Auflockerungszonen.

Durch den äußeren Druck wird das Salzgestein in der Auflockerungszone anfänglich elastisch verformt. Dabei wird zunächst die Weite der auflockerungsbedingten Risse reduziert, was vor allem dann leicht möglich ist, wenn die Rißflächen nicht gegeneinander verschoben sind. Wenn entweder der Druck zu niedrig ist oder die Rißflächen nicht mehr aufeinander passen, werden die Auflockerungsrisse durch die elastischen Verformungen nicht vollständig geschlossen. Dann können auch über Kriechprozesse plastische Verformungen stattfinden, durch die das Volumen der Auflockerungsrisse allmählich weiter reduziert wird. Bei einem schnellen Druckaufbau sind grundsätzlich auch bruchhafte Verformungen im Bereich von Spannungsspitzen an Berührungspunkten unebener Kontaktflächen möglich.

Die Bildung von Auflockerungszonen kann die Ausbreitung von Gasen oder Laugen in einem Endlager erleichtern, weil hierdurch ein Stofftransport vorbei an den technischen Barrieren möglich wird. Für eine realitätsnahe Modellierung der langfristigen Schadstoffausbreitung durch Auflockerungszonen ist insbesondere die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung der Permeabilität unter Druckeinfluß wichtig.

Wenn die Auflockerung des Steinsalzes unter der Druckeinwirkung durch diese Verformungen verringert wird, verschwinden die durchgängigen Strömungspfade allmählich, und die Permeabilität des Materials nimmt entsprechend ab. Eine Funktion zur Beschreibung der druckabhängigen Permeabilität muß demnach einen zeitunabhängigen Term, der den Einfluß der elastischen und gegebenenfalls auch bruchhaften Verformungen berücksichtigt, und einen zeitabhängigen Term für die anschließende Kriechverformung enthalten.

In Langzeitsicherheitsanalysen wird die druckabhängige Permeabilität wegen des derzeit noch geringen Kenntnisstandes im allgemeinen unter konservativen Annahmen beschrieben. So werden beispielsweise den Auflockerungszonen eine räumlich konstante Permeabilität und ein Querschnitt in der Größenordnung des Streckenquerschnitts zugeschrieben. Außerdem wird angenommen, daß die Permeabilität mit der Zeit nicht abnimmt, d.h. daß die Existenz dieser Auflockerungszonen für die gesamte Endlagerentwicklung unterstellt wird [ 17 ]. Bei der Modellierung der Auflockerungszonen um die Schächte der amerikanischen WIPP-Site wurden dagegen bereits orts- und zeitabhängige Permeabilitäten berücksichtigt [ 40 ].

In dieser Arbeit werden auf der Grundlage publizierter Ergebnisse von Laboruntersuchungen zunächst die bestimmenden Einflußgrößen für die Permeabilitätsentwicklung von aufgelockertem Steinsalz identifiziert. Daran anschließend wird eine hinreichend einfache Relation gesucht, mit der die Permeabilität der Auflockerungszone bei der Modellierung in Langzeitsicherheitsanalysen beschrieben werden kann. Wegen der dabei abzudeckenden langen Zeiträume wird besonders die Zulässigkeit der zeitlichen Extrapolation dieser Relation geprüft. Daher wird zunächst eine Anpassung an bestehende, theoretisch begründete Modelle versucht, mit denen die Druckabhängigkeit der Permeabilität kristalliner Gesteine beschrieben wird. Wenn sich herausstellt, daß eine derartige Anpassung für aufgelockertes Steinsalz nicht möglich ist, wird statt dessen eine Anpassung an eine phänomenologische Relation vorgenommen. Die Anwendung dieser Relation ist dann aber auf Sicherheitsanalysen für Steinsalz beschränkt.

In Kapitel 3 wird zunächst eine Relation für die zeitunabhängige Änderung der Permeabilität unter Druckeinwirkung ermittelt. Daran anschließend werden in Kapitel 4 die vorliegenden experimentellen Daten aus Langzeitversuchen für die Ableitung einer provisorischen Beziehung der zeit- und druckabhängigen Permeabilitätsabnahme von aufgelockertem Steinsalz ausgewertet.



## 2 Permeabilität von Steinsalz

Natürliche, unverritzte Salzformationen zeichnen sich gegenüber anderen potentiellen Wirtformationen für Endlager unter anderem durch ihre sehr niedrige Permeabilität aus. Messungen der In-situ-Permeabilität in unverritztem, festem Steinsalz haben Werte in der Größenordnung  $10^{-21} \text{ m}^2$  oder darunter ergeben [ 29 ], [ 42 ]. Damit kann dieses Material als völlig dicht im technischen Sinn angesprochen werden. Im Labor werden jedoch, wie die verschiedenen in Kapitel 3.1 beschriebenen Untersuchungen gezeigt haben, an entspannten natürlichen Steinsalzproben Permeabilitäten gemessen, die um mehrere Größenordnungen über denen von unverritztem Steinsalz liegen [ 1 ], [ 21 ], [ 32 ]. Ebenso haben In-situ-Messungen der Permeabilität in Steinsalzformationen die Existenz von Auflockerungszonen mit erhöhter Permeabilität bestätigt, die Strecken und Schächte mit einer Mächtigkeit bis zu 2-3 m umgeben [ 9 ], [ 29 ], [ 39 ], [ 42 ]. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Ausdehnung und der Eigenschaften der Auflockerungszonen in Steinsalz; sie haben keine quantitativen Ergebnisse über die Spannungs- und Zeitabhängigkeit der Permeabilität geliefert. Diese Abhängigkeiten wurden bei Steinsalz bisher nur im Labor untersucht, weshalb in diese Arbeit keine Ergebnisse aus In-situ-Untersuchungen einbezogen wurden.

Die Permeabilität aufgelockerter Gesteine wird von der Anzahl, Größe, Verteilung, Orientierung und Vernetzung der Risse bestimmt. Die Permeabilität ist daher richtungsabhängig und wird im allgemeinen Fall durch einen dreidimensionalen, symmetrischen Tensor  $k_{ij}$  beschrieben. Wegen der Symmetrie  $k_{ij} = k_{ji}$  hat dieser Tensor sechs unabhängige Elemente, die im Prinzip jeweils mit geeigneten Experimenten bestimmbar sind. In den nachfolgend beschriebenen experimentellen Laboruntersuchungen konnte aus technischen Gründen aber immer nur eine Komponente des Permeabilitätstensors gemessen werden, und zwar die axiale Komponente der Permeabilität zylindrischer Proben in Abhängigkeit vom Manteldruck und ggf. vom Axialdruck. Diese wird im folgenden mit  $k$  bezeichnet.

### 2.1 Experimentelle Untersuchungsmethoden

Grundlage für die Bestimmung der Permeabilität von porösen oder aufgelockerten Gesteinen für ein viskoses, einphasige Fluid ist das Darcy-Gesetz in der vereinfachten Form

$$q = -\frac{k}{\mu} \text{grad}(P). \quad (1)$$

Hierbei bedeuten  $\mu$  die dynamische Viskosität [Pa s],  $q$  die Strömungsgeschwindigkeit [ $\text{m s}^{-1}$ ] und  $P$  den Druck [Pa] des Fluids sowie  $k$  die Permeabilität des Gesteins [ $\text{m}^2$ ]. Für die Auswertung von Durchströmungsexperimenten an Gesteinsproben liefert die Integration von Gl. (1) eine Beziehung für  $k$ , die nur direkt meßbare Größen enthält. Dabei wird unterstellt, daß die Permeabilität innerhalb der Probe konstant ist. Für inkompressible Medien gilt

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{F \cdot (P_1 - P_2)} \quad (2)$$

und für kompressible Fluide wie Gase:

$$k = \frac{2 \cdot Q \cdot \mu \cdot L \cdot P_0}{F \cdot (P_1^2 - P_2^2)}. \quad (3)$$

Hierbei bedeuten  $Q$  die Durchflußrate des Fluids [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] und  $P_0$  den Druck, bei dem  $Q$  gemessen wird,  $F$  die Querschnittsfläche und  $L$  die Länge der Probe.  $P_1$  und  $P_2$  bezeichnen den Fluiddruck auf der Ein- bzw. Austrittsseite der Probe.

Neben den einfachen stationären Meßverfahren wurden für den Bereich sehr niedriger Gesteinspermeabilitäten auch spezielle instationäre Meßverfahren entwickelt. Hierbei wird eine feste Menge eines Fluids in den Probekörper eingepreßt und die Permeabilität aus dem beobachteten zeitlichen Druckverlauf abgeleitet. Derartige Verfahren wurden beispielsweise von Miehe et. al. [ 29 ] und Peach [ 32 ] bei den in Kapitel 4.3.2 angesprochenen Permeabilitätsmessungen mit Argon angewendet. Die Berichte enthalten allgemeine Beschreibungen dieser Verfahren, mit denen sich untere Nachweisgrenzen bis  $10^{-23} \text{ m}^2$  hinab erzielen lassen.

Borgmeier [ 4 ] weist in diesem Zusammenhang darauf hin, daß bei den instationären Verfahren auch die nicht durchgängigen Teile des Porenraums, die sogenannten „Sackporen“, zur gemessenen Permeabilität beitragen und diese Verfahren daher erhöhte Permeabilitätswerte liefern können als die mit stationärer Durchströmung. Dieses

wurde durch Vergleichsmessungen belegt, die Unterschiede von mehr als einer Größenordnung ergeben haben.

Bei Permeabilitätsmessungen werden Gase oder Flüssigkeiten als Testfluid verwendet. Obwohl die Permeabilität definitionsgemäß eine petrophysikalische Größe ist, die durch Eigenschaften des porösen Mediums vollständig bestimmt wird und daher unabhängig vom durchströmenden Fluid ist, werden in der Realität trotzdem Unterschiede beobachtet. Dieses zeigen beispielsweise die Vergleichsmessungen von Peach mit Salzlauge und Argon in aufgelockertem Steinsalz [ 32 ].

Bei Permeabilitätsmessungen mit Gasen können unter Umständen die Voraussetzungen für viskose Strömungen nicht erfüllt sein, weil der Durchmesser enger Kapillaren bis in den Bereich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle abnehmen und dadurch Gleitströmung auftreten kann. Die Verfälschung von Meßwerten durch dieses als Klinkenberg-Effekt bekannte Phänomen kann durch eine entsprechende Korrektur bei der Auswertung berücksichtigt werden [ 22 ]. Als weitere Ursachen für eine Abhängigkeit der Permeabilität vom Meßfluid kommen physikalische oder chemische Wechselwirkungen mit der Oberfläche des Gesteinskörpers in Frage.

## **2.2 Problematik der Permeabilitätsmessungen im festen Steinsalz**

Experimentelle und theoretische Arbeiten [ 16 ] zeigen einen Zusammenhang zwischen der Rißentwicklung und -ausweitung und den senkrecht zur Rißrichtung stehenden Spannungen in den Salzproben. Die Risse sind immer senkrecht zur kleinsten Druckspannung orientiert, da ihnen dort der geringste Öffnungswiderstand entgegensteht. Dadurch ist die Rißentwicklung und damit auch die hierdurch verursachte Permeabilität im allgemeinen anisotrop. Es gibt ferner Hinweise aus In-situ-Experimenten, daß die Permeabilität auch in festem Steinsalz anisotrop sein kann [ 20 ]. Die Ursache dieses Phänomens ist jedoch ungeklärt. Denkbar sind sowohl deformationsbedingte Auflockerungen als auch Unterschiede in der Textur der Salzformationen.

Daneben können auch Verunreinigungen, wie z.B. Sulfatlagen mit hohem Anhydrit- oder Polyhalitgehalt, die sich häufig bandförmig durch das natürliche Salzgestein ziehen, zur Permeabilität des unverritzten Steinsalzes beitragen. Wenn derartige Verunreinigungen oder eingeschlossene Fluide an Korngrenzen heranreichen, können Wegsamkeiten entstehen, die sich permeabilitätserhöhend auswirken. Solche Wegsamkei-

ten nehmen unter Druckeinwirkung nicht ab, weil sie entweder als Folge von Verunreinigungen o.ä. ständig erhalten bleiben oder als Mikrorisse durch deviatorische Spannungen offengehalten werden.

Phänomenologisch ganz andersartig verhält sich die Permeabilität dagegen, wenn die relevanten Fließwege nicht durch deviatorische Spannungen offengehalten oder die Wegsamkeiten durch Fluideinschlüsse gebildet werden. Hydrostatische Spannungen können die Risse, Poren und deren Verbindungen unter Auspressen der Fluide mit der Zeit schließen. Die Geschwindigkeit dieses Vorgangs ist eine Funktion des Drucks, der Temperatur und der Feuchte. Die Feuchte ist entweder die des natürlichen Steinsalzes oder wird im Labor mit dem Meßfluid zugeführt.

In Anwesenheit von Feuchte können gelöste Salze auskristallisieren oder es können Umlösungen stattfinden, welche die Rißstruktur und damit die Strömungswiderstände beeinflussen. Dazu kommt der Effekt, daß die Kriechfähigkeit von Steinsalz in Anwesenheit von Feuchte im Gestein oder in der umgebenden Atmosphäre erheblich erhöht wird [ 19 ], [ 25 ]. Deshalb ist zu erwarten, daß die Ausheilung von Auflockerungsrissen entweder durch eine hohe Feuchte des Salzes oder bei Durchströmung mit Lauge beschleunigt wird und die Permeabilität unter Druckeinwirkung dadurch entsprechend schneller reduziert wird. Daß dieses tatsächlich geschieht, belegen beispielsweise die in Kapitel 4.3.4 wiedergegebenen Meßergebnisse von Borgmeier [ 4 ].

Leider enthalten die bisher publizierten Untersuchungen zur Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz kaum Ergebnisse über die zeitliche Entwicklung der Permeabilität unter Druckeinfluß. Die wenigen bisher durchgeführten Untersuchungen decken zudem nur Zeiten bis zu einigen Wochen ab, so daß die extrapolierte Werte für die Zeiträume, die in Langzeitsicherheitsanalysen betrachtet werden, mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der zeitlichen Permeabilitätsänderung sind bisher überhaupt noch nicht bekannt geworden. Derzeit ist noch nicht abzuschätzen, welche Bedeutung solche zeitlichen Permeabilitätsänderungen der Auflockerungszonen auf die Funktion der Barrierensysteme in einem Endlager haben. Um dieser Frage nachzugehen, werden in Kapitel 3 als erster Schritt die vorliegenden experimentellen Daten analysiert. Danach wird eine Beschreibung der zeitabhängigen Permeabilitätsabnahme unter Druckeinwirkung abgeleitet, mit der das Verhalten solcher Barrierensysteme in Modellrechnungen untersucht werden kann.

### **3 Ableitung einer zeitunabhängigen Permeabilitäts-Spannungsrelation**

Im folgenden werden zunächst Labormeißdaten zur Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz unter kontrollierter Druckbeaufschlagung beschrieben. Diese wurden verschiedenen, zwischen 1962 und 1998 publizierten Arbeiten entnommen. Diese Meßdaten werden anschließend daraufhin untersucht, ob, bzw. in welchem Umfang, sie bei der Ableitung einer Permeabilitätsrelation berücksichtigt werden können, mit der in Endlager-Sicherheitsanalysen ein Fluidtransport durch die Auflockerungszonen im Salzgestein modelliert werden soll.

Den hier betrachteten experimentellen Untersuchungen ist gemeinsam, daß sie im Labor bei Raumtemperatur erfolgten und dabei die Änderungen der Permeabilität gemessen wurden, die nach Variation des effektiven Manteldrucks instantan auftreten. Bei diesen Messungen werden die Risse durch elastische Verformung verkleinert. Insbesondere bei hohen Drücken können auch bruchhafte Verformungen auftreten, die nicht oder nicht vollständig reversibel sind. Im Experiment können reversible und irreversible kurzzeitige Permeabilitätsänderungen bei zyklischer Variation des Druckes unterschieden werden. Derartige Spezialmessungen wurden jedoch nur in zwei Fällen durchgeführt (vgl. Kapitel 3.1.1 und 4.3.2).

Unter Druckeinfluß kann sich die Permeabilität nach der instantanen anfänglichen Abnahme zeitabhängig weiter verringern. Hierbei werden die Risse bzw. Wegsamkeiten durch plastische Verformungen an den Reißflächen weiter reduziert. Dieser Aspekt der Permeabilitätsänderung wird in Kapitel 4 näher untersucht.

#### **3.1 Experimentelle Ergebnisse zur druckabhängigen Permeabilität**

Ein allgemeiner Ansatz zur Beschreibung der Permeabilität in Abhängigkeit vom Spannungszustand im aufgelockerten Material muß die tensoriellen Eigenschaften von Permeabilität und Spannung berücksichtigen (vgl. Kapitel 2). Dieses wird in einzelnen Experimenten ansatzweise dadurch realisiert, daß bei den Permeabilitätsmessungen kontrollierte hydrostatische und deviatorische Spannungen eingestellt werden [ 24 ], [ 38 ]. Da sich im Salz aber die deviatorischen Spannungen langfristig durch Kriech-

In den folgenden Kapiteln wird verkürzend der Begriff „Druck“ bzw. das Symbol „ $P$ “ für den mittleren effektiven Überlagerungsdruck  $P_e$  in einer Probe verwendet. Diese Größe ist mit der mittleren angelegten Normalspannung  $P_o$  und dem mittleren Porendruck  $P_p$  in der Probe nach Walsh [ 41 ] über die Beziehung

$$P_e = P_o - s \cdot P_p \quad (4)$$

verknüpft. In Gl. (4) ist  $s$  ein Parameter, der u.a. von den Elastizitätskennwerten des Gesteins abhängt. Er wird in [ 35 ] als „Walsh-Parameter“ und in [ 8 ] als „Biot-Koeffizient“ bezeichnet und hat für sehr lockere Medien wie z.B. Böden den Wert 1. Die Arbeit von Peach [ 32 ] enthält die Aussage, daß auch für Steinsalz der Wert  $s = 1$  zutrifft. Der mittlere Porendruck  $P_p$  in einer von einem Fluid durchströmten Probe ergibt sich als Mittelwert des Drucks auf der Injektions- und Austrittsseite.

Der Wert  $s = 1$  wird von Cosenza [ 8 ] aufgrund von theoretischen Überlegungen und einer Analyse der Meßwerte von Jockwer (vgl. Kapitel 3.1.3 und 3.2.1) angezweifelt. Demnach liegt der  $s$ -Wert für aufgelockertes Steinsalz im Bereich  $0,1 < s < 0,2$ . Diese widersprüchlichen Angaben belegen die Aussage in [ 35 ], daß das Konzept des mittleren effektiven Porendrucks ( $s = 1$ ) bei Auswertungen von Meßergebnissen an Steinsalz möglicherweise nicht anwendbar ist. Die sich damit ergebenden Werte für die Effektivdrücke sind daher jeweils zu überprüfen. Im folgenden werden jedoch die von den jeweiligen Autoren angegebenen Druckwerte verwendet.

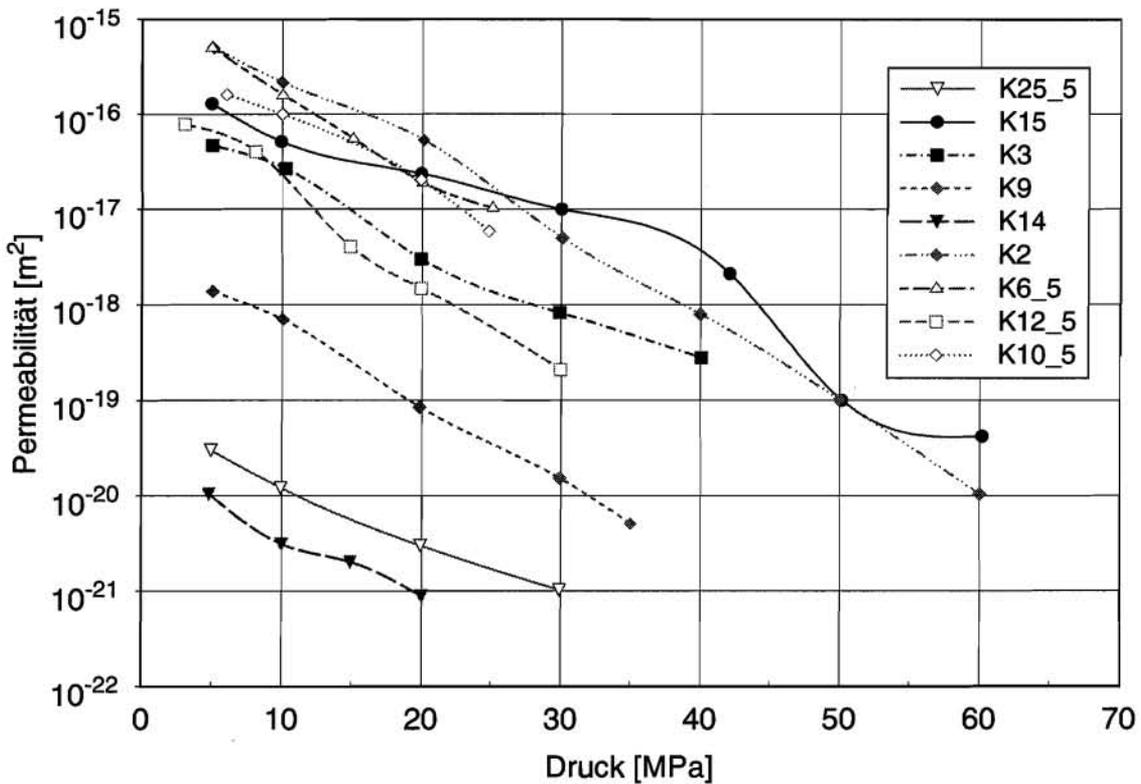
### 3.1.1 Messungen von Borgmeier

Borgmeier [ 4 ] bestimmte die druckabhängige Permeabilität aufgelockerter Steinsalzproben sowohl unter hydrostatischen Bedingungen als auch in Abhängigkeit vom Radialdruck unter einem konstantem Axialdruck von 5 MPa. Untersucht wurden sogenannte „Modellsalzkerne“ aus kompaktiertem Salzgrus mit einer Restporosität von ca. 5% und „natürliche“ Proben in Form von Kernen aus Kavernenbohrungen in nord- bzw. mitteldeutschen Salzstöcken. Da alle Proben vor dem Versuch getrocknet wurden, werden die Unterschiede in den Permeabilitäten nur durch die unterschiedliche Größe und Struktur der Porenräume und nicht durch unterschiedliche Feuchtesättigung hervorgerufen.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, sollten sich Risse vorzugsweise senkrecht zur Richtung der kleinsten Druckkomponente entwickeln, die in diesem Fall die Axialspannung ist. Wenn das zutrifft, haben die Risse somit nur einen geringen Einfluß auf die Durchströmung der Probe in axialer Richtung. Auf die Risse, die senkrecht zum Radialdruck orientiert sind, wirken dagegen keine öffnenden deviatorischen Spannungen ein. Solche Risse können unter einem Radialdruck entweder durch elastisch-reversible oder irreversibel-plastische Verformung geschlossen werden. Da diese Risse in der Durchflußrichtung verlaufen, bestimmen sie in diesem Fall die Permeabilität. Da sie außerdem nicht durch deviatorischer Belastung entstehen, sondern infolge vorheriger Auflockerungen und sonstiger Strukturunterschiede, werden die Anfangspermeabilitäten der Proben zwangsläufig durch ihre Vorgeschichte bestimmt und können stark streuen. Bei langen Meßzeiten sind außerdem wegen der unter Druck ablaufenden Kriechprozesse auch zeitabhängige Änderungen zu erwarten.

In Abb. 3-1 sind die Permeabilitätsmeßdaten in logarithmischem Maßstab als Funktion des effektiven Manteldrucks dargestellt. Die Meßwerte wurden den Abbildungen in der Veröffentlichung von Borgmeier [ 4 ] entnommen. Der effektive Manteldruck ergibt sich aus der Differenz zwischen der angelegten Radialspannung und dem mittleren Gasdruck in der Probe und ist nach Gl. (4) die bestimmende Größe für die Verringerung der Hohlräume in Durchflußrichtung. Die Ergebnisse der Messungen mit konstantem Axialdruck von 5 MPa sind in der Legende durch die Endung „\_5“ gekennzeichnet, während die übrigen unter hydrostatischer Belastung ermittelt wurden.

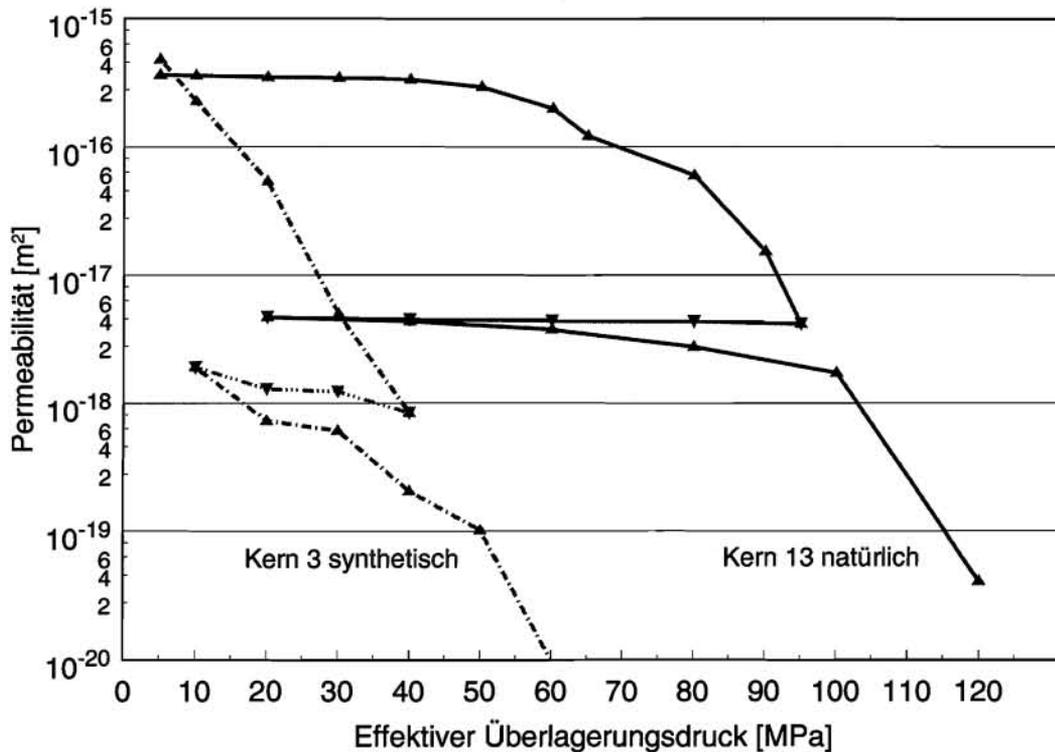
Das Diagramm zeigt, daß sich der Streubereich der Anfangspermeabilitäten mit  $10^{-15} \text{ m}^2 > k > 10^{-20} \text{ m}^2$  über 5 Größenordnungen erstreckt. Die Meßdaten zeigen in der halblogarithmischen Darstellung eine weitgehend lineare Abnahme mit einer nahezu einheitlichen Steigung von ca. einer Größenordnung bei 12 MPa Drucksteigerung. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit hydrostatischer bzw. deviatorischer Druckbelastung lassen in dieser Darstellung keine Unterschiede erkennen.



**Abb. 3-1** Permeabilität von aufgelockerten Steinsalzproben in Abhängigkeit vom Druck nach Messungen von Borgmeier [ 4 ]

Neben diesen Messungen mit steigender Druckbelastung wurde noch die Permeabilität von zwei Proben bei kontrollierter zyklischer Druckvariation untersucht. Dabei wurde der Druck, wie Abb. 3-2 zeigt, zunächst so weit erhöht, bis die Permeabilität der Proben auf weniger als 1% des Anfangswertes bei 5 MPa zurückging. Anschließend wurde der Druck wieder über mehrere Zwischenstufen auf 5 bzw. 20 MPa erniedrigt.

Man erkennt aus Abb. 3-2, daß die Zunahme der Permeabilität bei der Druckreduktion viel geringer ist als die entsprechende Abnahme bei der ersten Drucksteigerung. Während der wiederholten Drucksteigerung ist die Permeabilitätsabnahme solange gering, bis wieder der frühere Maximaldruck erreicht wird. Die weitere Permeabilitätsabnahme verläuft nach einer Kurve, die eine Fortsetzung des Verlaufs bei der ersten Drucksteigerung darstellt. Während der ersten Druckerhöhung wurde bei der künstlichen Probe sofort eine starke Abnahme der Permeabilität gemessen. Bei der natürlichen Probe setzte die Abnahme dagegen erst oberhalb 40 MPa ein und erreichte schließlich nach etwa 80 MPa die Steigung der künstlichen Probe.



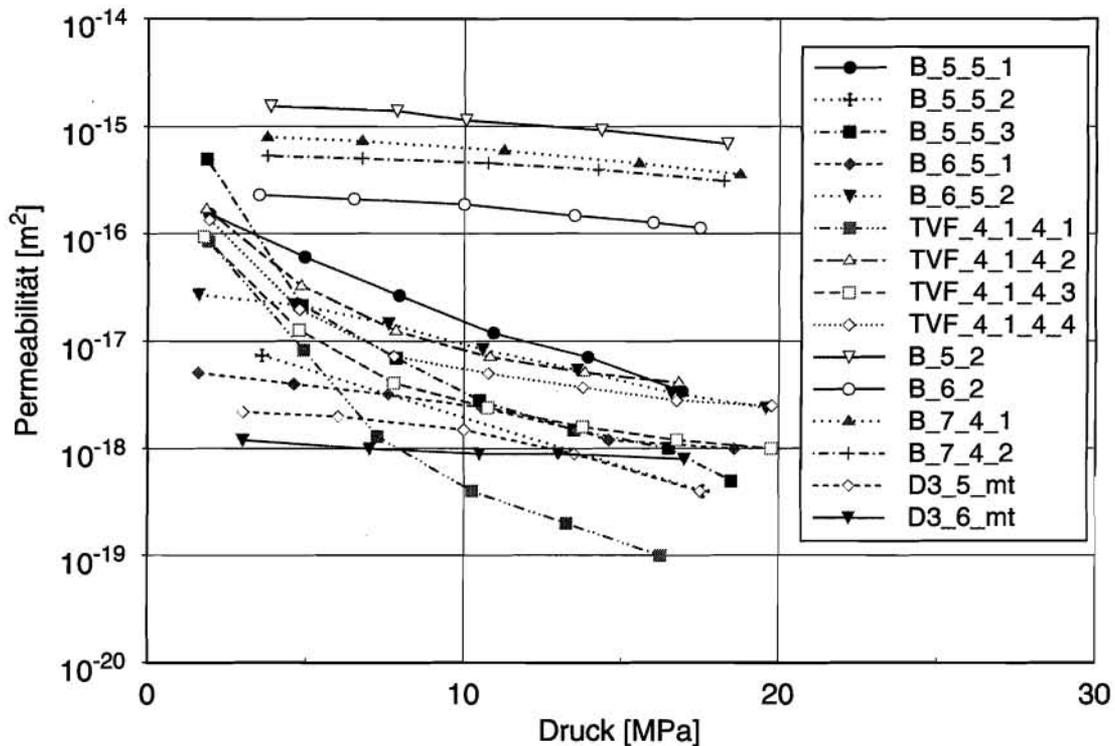
**Abb. 3-2** Permeabilität einer natürlich und einer künstlich aufgelockerten Steinsalzprobe nach Borgmeier bei zyklischer Variation des Überlagerungsdrucks [ 4 ] Δ: Druckerhöhung, ∇: Druckabsenkung

Diese Ergebnisse belegen, daß bereits bei den Kurzzeitmessungen unter Druckeinwirkung irreversible Veränderungen der Porenstruktur auftreten, daß also die Verformungen nicht rein elastisch sind. Wegen der kurzen Versuchsdauern kommen hierfür weniger Kriechvorgänge als vielmehr bruchhafte Veränderungen an den Rißflächen in Frage. Insofern ist hierbei nicht der aktuelle Druck die bestimmende Größe für die Permeabilität, sondern eher der höchste Druck, dem die Probe jemals ausgesetzt war. Alternativ kommt hierfür auch die niedrigste Permeabilität, die sich im Salz unter der Druckeinwirkung eingestellt hat, in Betracht. Diese Vorstellung erklärt auch das unterschiedliche Anfangsverhalten der künstlichen und der natürlichen Probe, wenn die natürliche Probe durch die Entnahme vom Gebirgsdruck entlastet und dadurch aufgelockert wurde.

### 3.1.2 Messungen von Schopper

1982 wurden vom Institut für Geophysik der TU Clausthal Permeabilitäten von Steinsalz bestimmt [ 34 ]. Die Messungen erfolgten in der gleichen Weise wie bei Borgmeier

[ 4 ], jedoch an wesentlich kleineren Proben, die ebenfalls vorher getrocknet wurden. Der Effektivdruck wurde im Bereich zwischen 2 und 20 MPa variiert. Die Meßwerte sind in Abb. 3-3 in Abhängigkeit vom Druck dargestellt. Das Diagramm zeigt, daß die Anfangspermeabilitäten der Proben zwischen  $2 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  und  $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  und damit ebenfalls in einem breiten Streubereich liegen.



**Abb. 3-3** Meßwerte der Permeabilität von 15 Steinsalzproben in Abhängigkeit vom effektiven Manteldruck nach Schopper [ 34 ]

Die Ergebnisse von Borgmeier in Abb. 3-1 zeigen in einfach-logarithmischer Darstellung eine annähernd lineare Spannungsabhängigkeit. Dieses gilt für die Meßwerte von Schopper nicht generell, da die Meßkurven in dieser Darstellung mehr oder weniger gekrümmt sind. Bei vier der fünf Proben mit hoher (B.5.2, B.5.5.2, B.6.2 und B.7.4.2) und einer mit niedriger Anfangspermeabilität (D3\_5\_mt) haben die Meßkurven eine deutlich von den übrigen abweichende Charakteristik, weil deren Steigung mit dem Druck abnimmt.

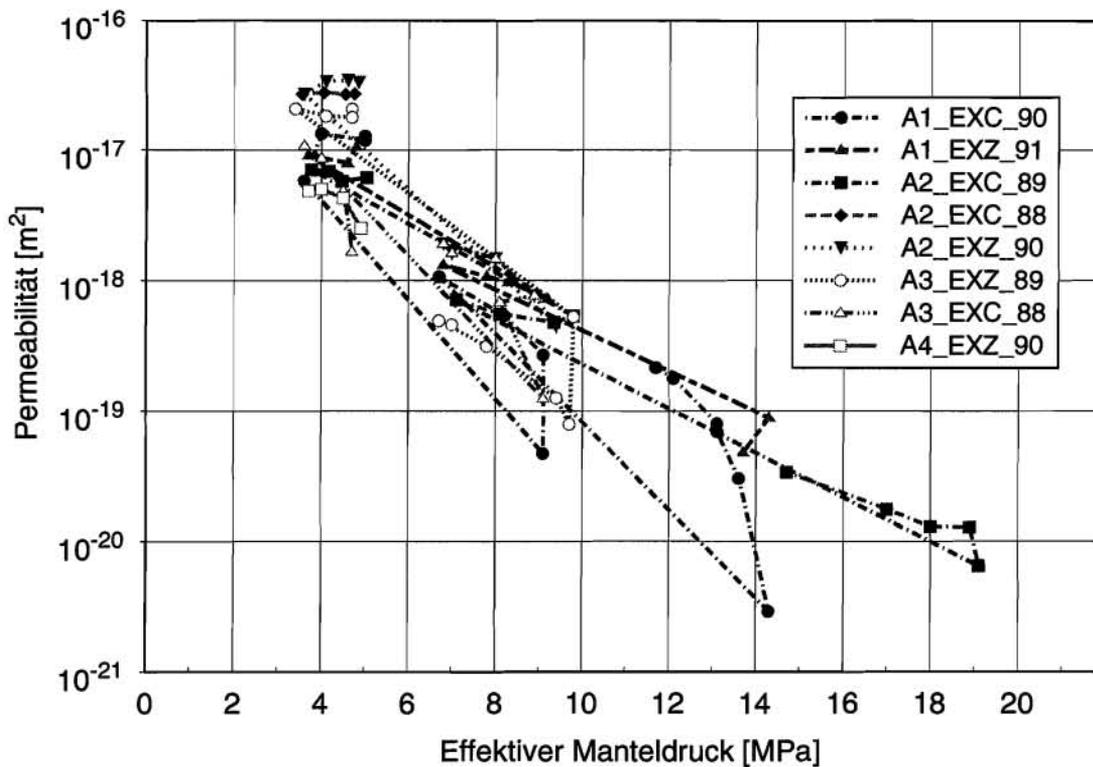
Die Meßreihen TVF-4-1-4 und B-5-5-3 in Abb. 3-3 zeigen deutliche Linearitätsabweichungen. Bei der Probe B-5-5-3 ließe sich die Anomalie des ersten Meßwerts noch dadurch erklären, daß man einen Übertragungsfehler um den Faktor 10 unterstellt. Bei den Proben TVF-4-1-4-1 bis TVF-4-1-4-4 jedoch liegen offensichtlich andere Gründe

vor. So kann sich z.B. eine andere Spannungs-Permeabilitäts-Beziehung ergeben, wenn in der Probe weit geöffnete Risse vorhanden sind. Diese verhalten sich bei der Annäherung der Reißflächen unter dem Manteldruck zunächst sehr nachgiebig, bis die Reißflächen in Kontakt kommen. Je nach der Paßgenauigkeit der beiden Reißflächen kann die Abnahme der Permeabilität anfänglich sehr groß sein, um dann immer weiter abzunehmen. Die Geometrie dieser Risse und ihre Orientierung zur einwirkenden Spannung können daher sowohl den Anfangswert der Permeabilität als auch deren relative Änderung mit dem Druck wesentlich beeinflussen.

### **3.1.3 Messungen von Jockwer**

Im Rahmen der Vorbereitungen eines In-situ-Versuches zur Bohrlochlagerung hochradioaktiver Abfälle wurde die Permeabilität von Steinsalzproben, die in einem Versuchsfeld auf der 800-m-Sohle im Salzbergwerk Asse als Bohrkerne genommen wurden, im Labor bestimmt [ 14 ], [ 18 ]. Die Messungen erfolgten bei stationärer Durchströmung mit Argon nach demselben Grundprinzip wie bei den beiden vorgenannten Untersuchungen. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch darin, daß die Proben mit ihrem unveränderten, natürlichen Feuchtegehalt in die Meßapparatur eingebracht und nicht vor der Messung getrocknet wurden. Weil der Feuchtegehalt in den untersuchten Proben nicht bestimmt wurde, ist unbekannt, ob während der Messungen Wasser verdunstet ist und mit dem Argon aus den Proben entfernt wurde.

Die Proben hatten im Vergleich zu denen in den Untersuchungen von Schopper (Kapitel 3.1.2) größere Abmessungen. Der Manteldruck wurde im Verlauf einer Versuchsreihe stufenweise erhöht, wobei der Injektionsdruck auf jeder Stufe ebenfalls schrittweise erhöht wurde. Dadurch verringerte sich der Effektivdruck wieder, der sich nach Gl. (4) mit  $s = 1$  als Differenz zwischen dem Manteldruck und dem mittleren Gasdruck in der Probe ergibt. Dieses wiederholte sich auf der folgenden höheren Druckstufe, wodurch sich die schlaufenförmigen Verläufe von Manteldruck und Permeabilität in Abb. 3-4 ergaben.



**Abb. 3-4** Permeabilität von ungetrockneten natürlichen Steinsalzproben, in Abhängigkeit vom Effektivdruck nach [ 14 ]

Im Vergleich zu den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen von Borgmeier und Schopper fallen die niedrigen Werte ( $k < 3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ) und die geringe Streubreite der Anfangspermeabilitäten der Proben auf. Der in Abb. 3-4 erkennbare ungleichförmige Zusammenhang zwischen Permeabilität und effektivem Manteldruck hat vermutlich folgende Gründe:

1. Durch die teilweise sehr hohe Druckdifferenz zwischen der Ein- und -Austrittsseite des Gasstromes werden die Risse auf der Eintrittsseite stärker aufgeweitet, wodurch dort die Permeabilität stark erhöht und der Druckabfall in Richtung Austrittsseite verlagert wird. Dadurch wird die mittlere Permeabilität in der Probe in einem nichtlinear vom Effektivdruck abhängigen Maß erhöht.
2. Wegen der in natürlichem Steinsalz vorhandenen Feuchtegehalte, die in der Größenordnung von 0,1% liegen, können Zweiphaseneffekte auftreten. Insbesondere können bei engen Strömungskäneln durch dünne Wasserfilme Sperren gebildet werden, die erst wieder verschwinden, wenn entweder der Kapillardruck überwunden wird oder die Risse aufgeweitet werden. Beide Voraussetzungen werden durch hohen Druck auf der Gasinjektionsseite begünstigt.

3. Durch Gleitströmung und Ablagerung von Gasmolekülen auf der Matrixwand kann es in Abhängigkeit von der Durchströmungsgeschwindigkeit zu nichtlinearen Effekten kommen, die in der Auswertung dieser Versuchsreihen nicht berücksichtigt werden konnten.

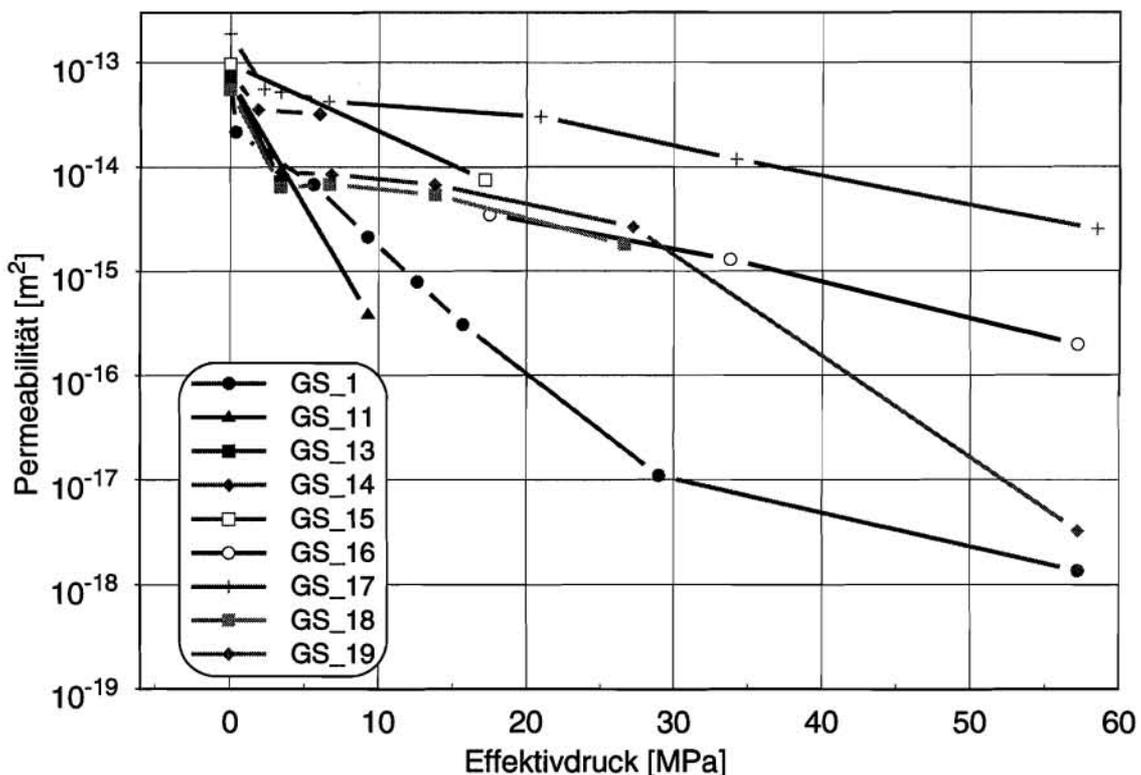
Diese Versuchsreihe zeigt eine ausgeprägtere Druckabhängigkeit als die von Borgmeier und von Schopper. Dieses ist vermutlich auf den höheren Feuchtegehalt der Proben zurückzuführen, durch den die Kriech- und Kompaktionsfähigkeit gegenüber getrocknetem Material sehr stark erhöht wird. Dadurch kann die Feuchte bereits während der Kurzzeitmessungen, deren Dauer aus technischen Gründen nicht beliebig reduzierbar ist, einen meßbaren Einfluß zeigen. Dieses wird auch durch die in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Messungen von Borgmeier unter Feuchteeinfluß belegt.

in Hinweis, daß der 2. Grund eine Rolle gespielt hat, ist der Abb. 3-4 zu entnehmen, wenn man die Meßwerte betrachtet, bei denen der effektive Manteldruck durch einen höheren Gasinjektionsdruck reduziert wurde. Hier werden Permeabilitäten gemessen, die teilweise deutlich über den entsprechenden Trendlinien für steigenden Manteldruck liegen. Dieses ist vor allem bei den hohen Manteldrücken der Fall, während dieser Effekt bei niedrigen Manteldrücken und somit relativ großen Wegsamkeiten dagegen kaum auftritt. Das abweichende Verhalten der Proben A3 EXZ 89 und A4 EXZ 90 könnte darauf zurückzuführen sein, daß sich noch keine hinreichend stabilen Wassersperren ausbilden konnten, so daß die Permeabilität entweder konstant blieb oder infolge von Kriechverformungen sogar abnahm.

Die Gasdruckgradienten im Endlager werden wegen der räumlichen Ausdehnung und der Langsamkeit der ablaufenden Vorgänge kleiner als bei den hier beschriebenen Messungen sein. Deshalb sind für die Randbedingungen im Endlager die unteren Permeabilitätswerte in Abb. 3-4 repräsentativ, bei deren Messung der Druckgradient geringer war und der obengenannte Zweiphaseneffekt keine Rolle spielt. Dieses könnte bei einem Laugenzutritt ebenfalls zutreffen, wenn eingeschlossene Gase durch eine Auflockerungszone ausgepreßt werden. Ein einphasiger Laugentransport ohne Gaseinschlüsse sollte dagegen eher durch die Meßwerte mit hohen Gradienten ohne Flüssigkeitssperwirkung beschreibbar sein.

### 3.1.4 Messungen von Gloyna und Reynolds

Anfang der 60er Jahre bestimmten Gloyna und Reynolds [ 15 ] im Rahmen von grundlegenden Untersuchungen über die Eignung von Salzlagerstätten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle die Permeabilität natürlicher Steinsalzproben unterschiedlicher Herkunft. Bei diesen Messungen wurden verschiedene Fluide eingesetzt, um einen eventuellen Einfluß spezifischer Fluideigenschaften identifizieren zu können. Die Ergebnisse sind aber für gesicherte Rückschlüsse auf die Permeabilitäten für Gas unzureichend.



**Abb. 3-5** Gemessene Permeabilitäten von aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom effektiven Manteldruck nach Gloyna und Reynolds [ 15 ]

Die Proben erwiesen sich als sehr bruchempfindlich und mußten mit größter Sorgfalt präpariert werden. Dem Untersuchungsbericht zufolge wurden sie vor der Messung getrocknet, es gibt aber keine Information über die Größe der Restfeuchte.

Die Permeabilitätsdaten wurden einer graphischen Darstellung in [ 15 ] entnommen und in Abb. 3-5 in einfach-logarithmischer Darstellung in Abhängigkeit vom Druck aufgetragen. Die Anfangspermeabilitäten der Proben liegen innerhalb eines engen Inter-

valls mit Werten um  $1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$  und damit vergleichsweise sehr hoch. Die hohen Werte sind vermutlich darauf zurückzuführen, daß die Proben aus mechanisch sehr stark belasteten Formationen entnommen wurden. Die Ursachen für die großen Unterschiede in den gemessenen Permeabilitätsänderungen unter Druckeinfluß sind unklar. Sie sind möglicherweise eine Folge dieser starken Auflockerungen, eventuell aber auch auf unterschiedliche Feuchtegehalte der Proben zurückzuführen.

### 3.1.5 Messungen von Lai

Lai untersuchte im Rahmen einer Dissertation die Permeabilität von Steinsalz unter deviatorischen und hydrostatischen Spannungszuständen [ 24 ]. Die Auswertung der primären Meßdaten in der Dissertationsschrift enthält aber offensichtliche Fehler, die jedoch, wie im folgenden gezeigt wird, korrigiert werden können. Daher ist es möglich, aus dieser Arbeit trotz der Mängel Informationen über das Permeabilitätsverhalten von Steinsalz in Abhängigkeit von hydrostatischen und deviatorischen Spannungszuständen abzuleiten.

Untersucht wurden zylindrische, mit definierten Axial- und Radialdrücken beaufschlagte Steinsalzproben. Dabei war der Axialdruck immer größer als der Radialdruck, so daß im Probenkörper eine deviatorische Spannungsverteilung entstand, die grundsätzlich die Entstehung axial ausgerichteter Risse begünstigt [ 16 ]. Die Proben wurden bei der Permeabilitätsmessung in Axialrichtung mit Kerosin durchströmt. Daher können hier Lösungs- und Kristallisationsvorgänge, die bei Salzläugen möglich sind, ausgeschlossen werden. Unter konstanten Druckverhältnissen stellte sich nach maximal 10 000 min Dauer ein stationärer Fluß ein. Dieser Endwert wurde in die Auswertung mit aufgenommen.

In den ersten vier Spalten der Tab. 3-1 sind die in der Originalarbeit angegebenen Werte der Radial- ( $\sigma_{\text{ax}}$ ) und Axialspannung ( $\sigma_{\text{rad}}$ ) und die daraus abgeleiteten hydrostatischen und deviatorischen Spannungen  $\sigma_{\text{o,Lai}}$  und  $\tau_{\text{o,Lai}}$  wiedergegeben. Mit der Wahl der  $\sigma_{\text{ax}}$  und  $\sigma_{\text{rad}}$  Werte sollten alle Kombinationen von 5 Niveaus der deviatorischen ( $\tau_{\text{o,Lai}}$ ) und 6 der hydrostatischen Spannung ( $\sigma_{\text{o,Lai}}$ ) eingestellt werden.

**Tab. 3-1** Axial- ( $\sigma_{ax}$ ) und Radialspannungen ( $\sigma_{rad}$ ) bei den Untersuchungen von Lai, entsprechende deviatorische ( $\tau_o$ ) und hydrostatische Spannungen ( $\sigma_o$ ) nach Lai und nach Gl. (5) und (6). (1 psi = 689,5 Pa)

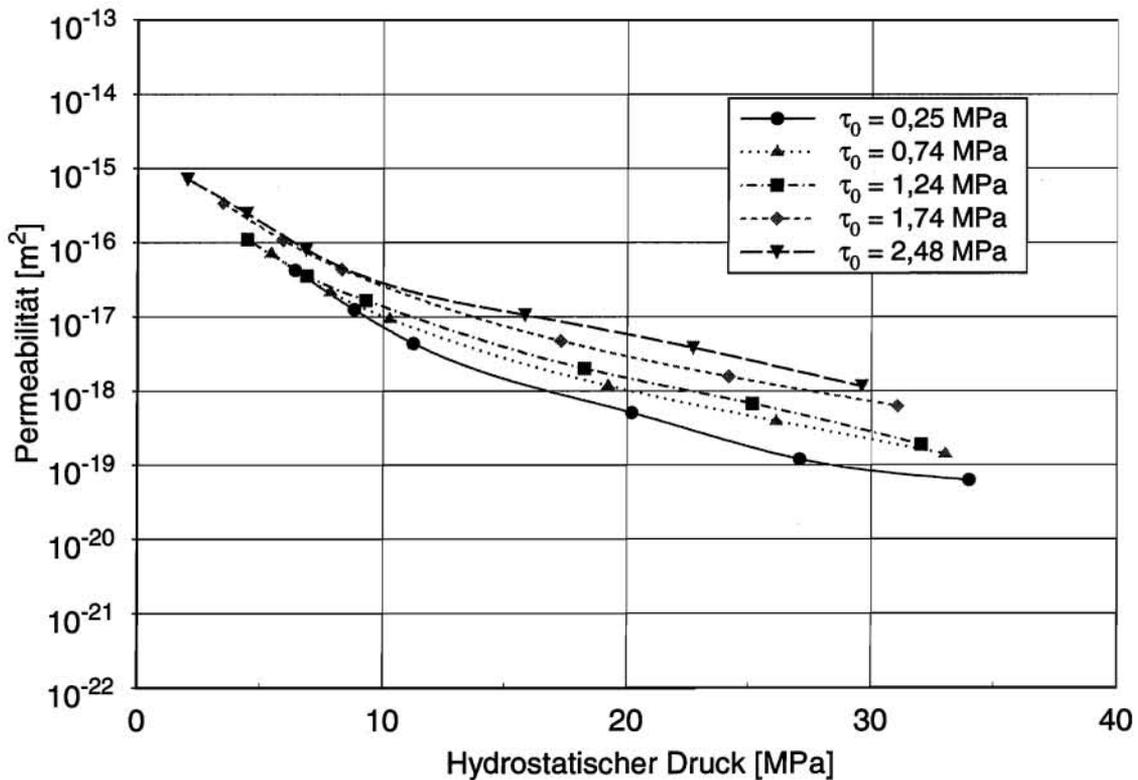
$\sigma_{ax}$ [psi]	$\sigma_{rad}$ [psi]	$\tau_{o,Lai}$ [psi]	$\sigma_{o,Lai}$ [psi]	$\tau_o$ [psi]	$\sigma_o$ [psi]	$\sigma_{ax}$ [psi]	$\sigma_{rad}$ [psi]	$\tau_{o,Lai}$ [psi]	$\sigma_{o,Lai}$ [psi]	$\tau_o$ [psi]	$\sigma_o$ [psi]
1006	929	100	1000	36.3	954.6	3028	2823	500	3000	96.6	2891.3
1356	1280	100	1350	35.8	1305.3	4028	3647	500	4000	179.6	3774.0
1706	1629	100	1700	36.3	1654.7	5028	4647	500	5000	179.6	4774.0
3006	2898	100	3000	50.9	2934.0	1040	505	700	1000	252.2	683.3
4006	3929	100	4000	36.3	3954.7	1390	855	700	1350	252.2	1033.3
5006	4929	100	5000	36.3	4954.7	1740	1205	700	1700	252.2	1383.3
1017	788	300	1000	108.0	864.3	3040	2505	700	3000	252.2	2683.3
1367	1138	300	1350	108.0	1214.3	4040	3505	700	4000	252.2	3683.3
1717	1538	300	1700	84.4	1597.7	5040	4505	700	5000	252.2	4683.3
3017	2788	300	3000	108.0	2864.3	1057	293	1000	1000	360.2	547.7
4017	3788	300	4000	108.0	3864.3	1407	643	1000	1350	360.2	897.7
5017	4788	300	5000	108.0	4864.3	1757	993	1000	1700	360.2	1247.7
1028	823	500	1000	96.6	891.3	3057	2293	1000	3000	360.2	1247.7
1378	997	500	1350	179.6	1124.0	4057	3293	1000	4000	360.2	1247.7
1728	1347	500	1700	179.6	1474.0	5057	4293	1000	5000	360.2	4547.7

Die in der Arbeit angegebenen Werte für die Stufen der deviatorischen und hydrostatischen Spannung ( $\tau_{o,Lai}$  bzw.  $\sigma_{o,Lai}$ ) weichen größtenteils weit von den korrekten, mit den bekannten Relationen (5) und (6)

$$\tau_o = (\sigma_{ax} - \sigma_{rad}) \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (5)$$

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{ax} + 2 \cdot \sigma_{rad}}{3} \quad (6)$$

berechneten Werten für  $\tau_o$  und  $\sigma_o$  ab. Die von Lai angegebenen deviatorischen Spannungen sind etwa um den Faktor 3 zu hoch, wogegen die Abweichungen bei den hydrostatischen Spannungen relativ klein sind. Bei den korrekten  $\tau_o$ -Werten sind "Ausreißer" zu erkennen, bei denen nicht zu klären ist, ob auf Aufzeichnungsfehler oder falsch eingestellte Spannungen vorlagen. Wenn man unterstellt, daß im Experiment jeweils gleiche deviatorische Spannungen realisiert wurden, ergeben sich die in Abb. 3-6 in Abhängigkeit von den korrekten hydrostatischen Spannungen dargestellten Verläufe.



**Abb. 3-6** Permeabilität von Steinsalz nach Lai, in Abhängigkeit vom abgeleiteten hydrostatischen Druck für verschiedene deviatorische Spannungen.

Ein weiterer offensichtlicher Fehler in Lais Auswertung besteht darin, daß eine notwendige Umrechnung von Minuten auf Sekunden fehlt, so daß die angegebenen Permeabilitätswerte um den Faktor 60 zu hoch liegen. Die unrealistisch hohen Permeabilitäten wurden auch von anderen Autoren, wie z.B. Stormont [ 38 ], bemerkt.

Diese Fehler sind aufgrund der in seiner Dissertation ausführlich wiedergegebenen Meßdaten belegbar und können somit auch korrigiert werden. Außerdem erscheinen die angegebenen Druckdifferenzen unglaublich, die sich aus dem Produkt des hydraulischen Gradienten und des Probenquerschnitts ergeben, da gerade bei großem Radialdruck und damit geringerer Durchlässigkeit kleinere Werte angegeben werden als bei den übrigen Messungen.

In Abb. 3-6 sind die korrigierten Permeabilitätsmeßwerte in Abhängigkeit von den korrigierten hydrostatischen Spannungen für die verschiedenen „Sollwerte“ der deviatorischen Spannungen dargestellt. Es ergeben sich ziemlich glatte Kurvenverläufe, die den Effekt der deviatorischen Spannungen, nämlich die Permeabilitätsabnahme durch den hydrostatischen Druck signifikant zu verringern, klar aufzeigen. Insofern eignen

sich diese Daten zur Ableitung einer zweiparametrischen Relation der Form  $k(\sigma_0, \tau_0)$ . Auf eine solche Analyse wird hier jedoch verzichtet, da derartige Relationen in den Rechencodes für Endlagersicherheitsanalysen aus heutiger Sicht nicht benötigt werden.

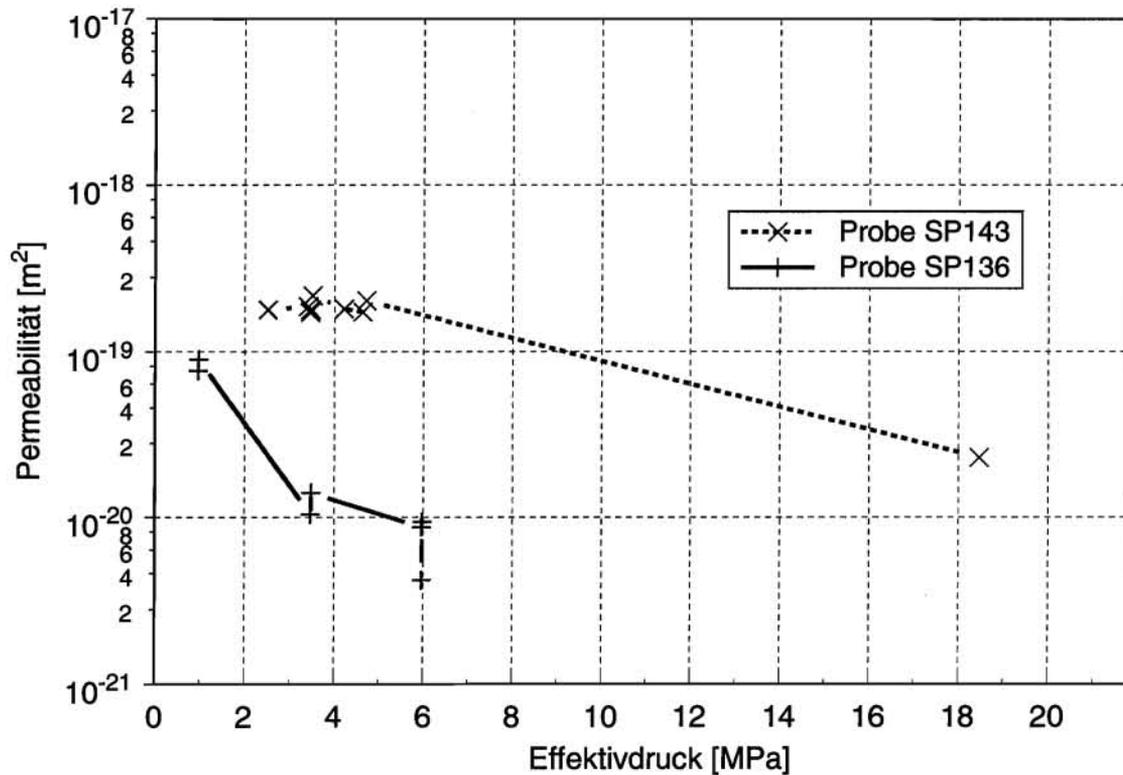
### 3.1.6 Messungen von Peach

Peach [ 32 ] untersuchte die Permeabilität von Steinsalz einmal in derselben Weise wie Lai, d.h. mit konstantem hydrostatischen Druck und verschiedenen deviatorischen Spannungen, aber auch unter rein hydrostatischer Druckbelastung. Nachfolgend werden zunächst die Ergebnisse aus Kurzzeitmessungen betrachtet. Die in derselben Arbeit enthaltenen Ergebnisse über die Abhängigkeit von der Auflockerung werden in Kapitel 4.1 und die der Langzeitmessungen in Kapitel 4.3.2 angesprochen

Die Permeabilitäten natürlicher Steinsalzproben von der 800-m-Sohle des Salzbergwerks Asse erstrecken sich unter hydrostatischer Belastung über ca. 4 Größenordnungen und zeigen damit ähnlich hohe Streuungen wie die Untersuchungen von Borgmeier und Schopper. Peach weist nach, daß die Permeabilität der Proben und der Abstand des Entnahmeortes vom Streckenstoß deutlich korreliert sind. Innerhalb von ca. 1 bis 2 m Abstand nimmt die bei Überlagerungsdrücken von 2,5 bzw. 5 MPa gemessene Permeabilität der Proben auf Werte im Bereich von  $10^{-20}$  bis  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> ab.

Die Anzahl von lediglich zwei Untersuchungen mit systematischer Druckvariation reicht nicht für eine Auswertung in der Art wie in den vorangegangenen Kapiteln aus. Außerdem liegen die Meßwerte bis auf einen Einzelwert bei 18,5 MPa in dem engen Druckintervall zwischen 1 und 6 MPa. Andererseits gestatten die Meßergebnisse für diese Proben einen Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Experimentatoren.

Die beiden Proben, deren Permeabilitäten in Abb. 3-7 in Abhängigkeit vom Druck dargestellt sind, entstammen einer randnahen Zone einer Strecke im Forschungsbergwerk Asse. Sie wurden vor der Messung zwar nicht getrocknet, wohl aber in einer relativ trockenen Atmosphäre mit etwa 15% r. F. gelagert. Damit ist das Probenmaterial am ehesten mit dem von Jockwer untersuchten vergleichbar. Ein Vergleich der Meßergebnisse zeigt aber, daß die Anfangspermeabilität der Proben und die druckbedingten Änderungen hier erheblich kleiner sind.



**Abb. 3-7** Permeabilität von zwei natürlichen Steinsalzproben nach den Messungen von Peach in Abhängigkeit vom abgeleiteten hydrostatischen Druck

### 3.2 Anpassung der Modelle zur Beschreibung der Druckabhängigkeit

In der Vergangenheit wurden verschiedene Modellansätze zur Verknüpfung der Porenraum- bzw. Rißgeometrie poröser oder aufgelockerter Gesteine mit deren hydraulischen Eigenschaften entwickelt, siehe beispielsweise die Arbeiten [ 7 ], [ 30 ], [ 33 ], [ 41 ]. Eine Diskussion der bestehenden Modelle über die damit verbundenen Zusammenhänge zwischen dem mechanischen Spannungszustand und der Permeabilität von Festgesteinen ist in der Dissertation [ 43 ] enthalten, auf die hier verwiesen wird.

#### 3.2.1 Das Modell von Walsh

Nach einem theoretisch begründeten Modellansatz von Walsh [ 41 ] besteht zwischen der Permeabilitätsänderung eines einzelnen Risses in natürlichem, aufgelockertem Salzgestein und dem angelegten Druck  $P$  die Proportionalität

$$\sqrt[3]{k(P)} = \sqrt[3]{k_{ref}} \cdot \left( 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot h}{a_{ref}} \cdot \ln(P / P_{ref}) \right) \cdot B(P) \quad (7)$$

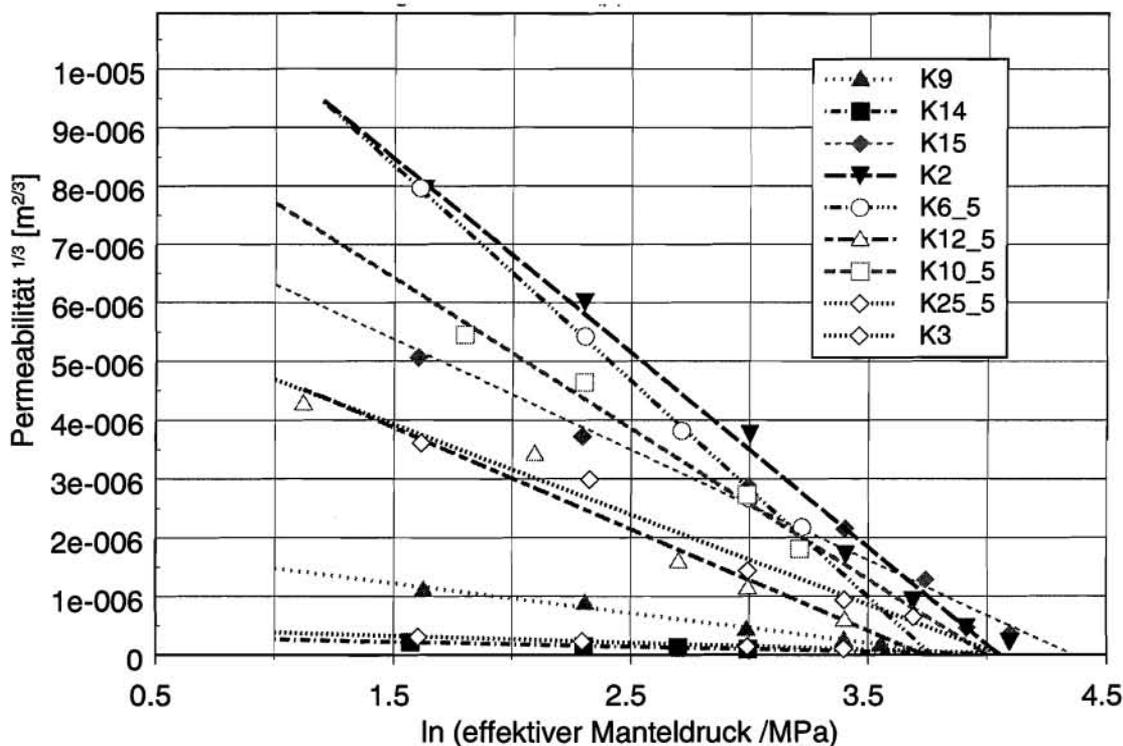
wenn die Druckspannungen senkrecht zu den Rißflächen orientiert sind und die Riweite durch elastische Verformungen der Rauigkeit auf den Rißflächen verringert wird. Hierin bezeichnet  $P_{ref}$  einen Referenzdruck, bei dem das aufgelockerte Material die Permeabilität  $k_{ref}$  und die mittlere Riweite den Wert  $2a_{ref}$  haben. Die Größe  $h$  ist ein Maß für die Rauigkeit, das sich aus dem quadratischen Mittel der Abweichungen der Riweite vom Mittelwert ergibt. Der Faktor  $B(P)$  beschreibt die relative Änderung der Tortuosität durch die Annäherung und Verformung der Rißflächen unter dem Druckeinflu. Die Auswirkung der Tortuosität der Strömungen durch den Riß bei dem Referenzdruck ist in  $k_{ref}$  eingeschlossen. Nach [ 41 ] sind unter den Randbedingungen der hier beschriebenen Experimente die beim Schließen des Risses auftretenden Änderungen der Tortuosität vernachlässigbar. Daher ist die Näherung  $B(P) = \text{const.} = 1$  zulässig. Die Permeabilität des Risses verschwindet nach diesem Modell bei einem endlichen Druck, dessen Höhe nur von  $P_{ref}$  und dem Verhältnis  $h/a_{ref}$ , aber nicht explizit von den Festigkeitsparametern des komprimierten Materials abhängt. Wegen der Proportionalität  $k \propto \ln(P)^3$  wird (7) auch als „cubic law“ bezeichnet.

**Tab. 3-2** Regression der Meßdaten von Borgmeier nach dem Walsh-Modell

Probe	$\sqrt[3]{k_{ref}}$	$k_{ref}$	$d(\sqrt[3]{k})/d(\ln(P))$	$P/P_{ref}(k=0)$	$h/a_{ref}$	$r$
K-14	$3.4823 \cdot 10^{-7}$	$4.2228 \cdot 10^{-20}$	$-8.4150 \cdot 10^{-8}$	4.1382	0.1709	0.9861
K25-5	$5.0184 \cdot 10^{-7}$	$1.2639 \cdot 10^{-19}$	$-1.1854 \cdot 10^{-7}$	4.2335	0.1671	0.9995
K-9	$1.9818 \cdot 10^{-6}$	$7.7836 \cdot 10^{-8}$	$-5.0781 \cdot 10^{-7}$	3.9026	0.1812	0.9896
K-3	$6.2236 \cdot 10^{-6}$	$2.4106 \cdot 10^{-16}$	$-1.5312 \cdot 10^{-6}$	4.0624	0.1741	0.9339
K-12-5	$6.4647 \cdot 10^{-6}$	$2.7017 \cdot 10^{-16}$	$-1.1788 \cdot 10^{-6}$	3.7394	0.1891	0.9534
K-15	$8.1856 \cdot 10^{-6}$	$5.4847 \cdot 10^{-16}$	$-1.8776 \cdot 10^{-6}$	4.3596	0.1622	0.9764
K-10-5	$1.0265 \cdot 10^{-5}$	$1.0816 \cdot 10^{-15}$	$-2.5658 \cdot 10^{-6}$	4.0007	0.1768	0.9780
K-6-5	$1.3854 \cdot 10^{-5}$	$2.6590 \cdot 10^{-15}$	$-3.6760 \cdot 10^{-6}$	3.7688	0.1876	0.9972
K-2	$1.3411 \cdot 10^{-5}$	$2.4120 \cdot 10^{-15}$	$-3.3158 \cdot 10^{-6}$	4.0536	0.1745	0.9903

Wenn eine solche Proportionalität auch für Permeabilitätsänderungen eines makroskopischen, von vielen miteinander verbundenen Mikrorissen durchzogenen Probekörpers gilt, muß die Darstellung der Permeabilittsmewerte in Abhängigkeit vom Druck in der Form  $\sqrt[3]{k}$  über  $\ln(P/P_{ref})$  Geraden ergeben, deren Parameter eine anschauliche Bedeutung haben. Die Geraden schneiden die Ordinate bei dem Wert  $\sqrt[3]{k_{ref}}$  und die Abszisse bei  $P/P_{ref} = a_{ref} / \sqrt{2 \cdot h}$ . Die Bestwerte für  $k_{ref}$  und  $a_{ref} / h$  las-

sen sich mit einer linearen Regression ermitteln. Die Ergebnisse der Regressionsanalysen für die einzelnen Meßreihen von Borgmeier sind in Tab. 3-2 aufgeführt.

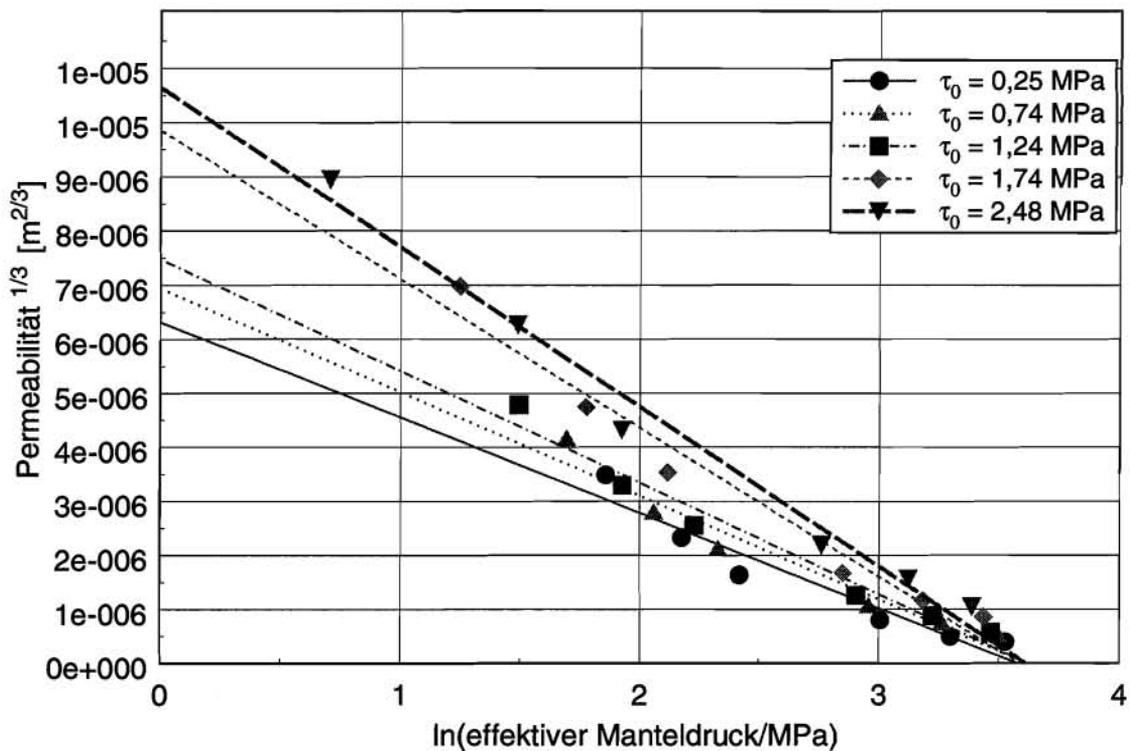


**Abb. 3-8** Druckabhängige Permeabilitäten verschiedener aufgelockerter Steinsalzproben nach Borgmeier mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell

Die Borgmeierschen Meßdaten können, wie aus Abb. 3-8 hervorgeht, in dieser Darstellung mit guter Genauigkeit durch Ausgleichsgeraden approximiert werden. Dieser Tatsache entsprechen die nahe bei dem Wert 1 liegenden Korrelationskoeffizienten  $r$  zwischen den Meßwerten und den Werten der Ausgleichsgeraden, die in der letzten Spalte von Tab. 3-2 aufgeführt sind. Diese zeigt, daß die Druckabhängigkeit der Permeabilität der untersuchten Proben gut durch das Walsh-Modell beschrieben wird. Die Ausgleichsgeraden schneiden die Abszisse ( $k = 0$ ) nahe bei dem Wert  $\ln(P/P_{ref}) \approx 4$ . Das bedeutet, daß der Einfluß der Auflockerung unabhängig von den über mehrere Größenordnungen streuenden Anfangspermeabilitäten (siehe Abb. 3-1) bei Drücken von  $\approx e^4$  MPa, d.h. bei ca. 56 MPa, verschwindet. Die genaue Rechnung liefert für den Schnittpunkt den Mittelwert  $4,029 \pm 0,201$ .

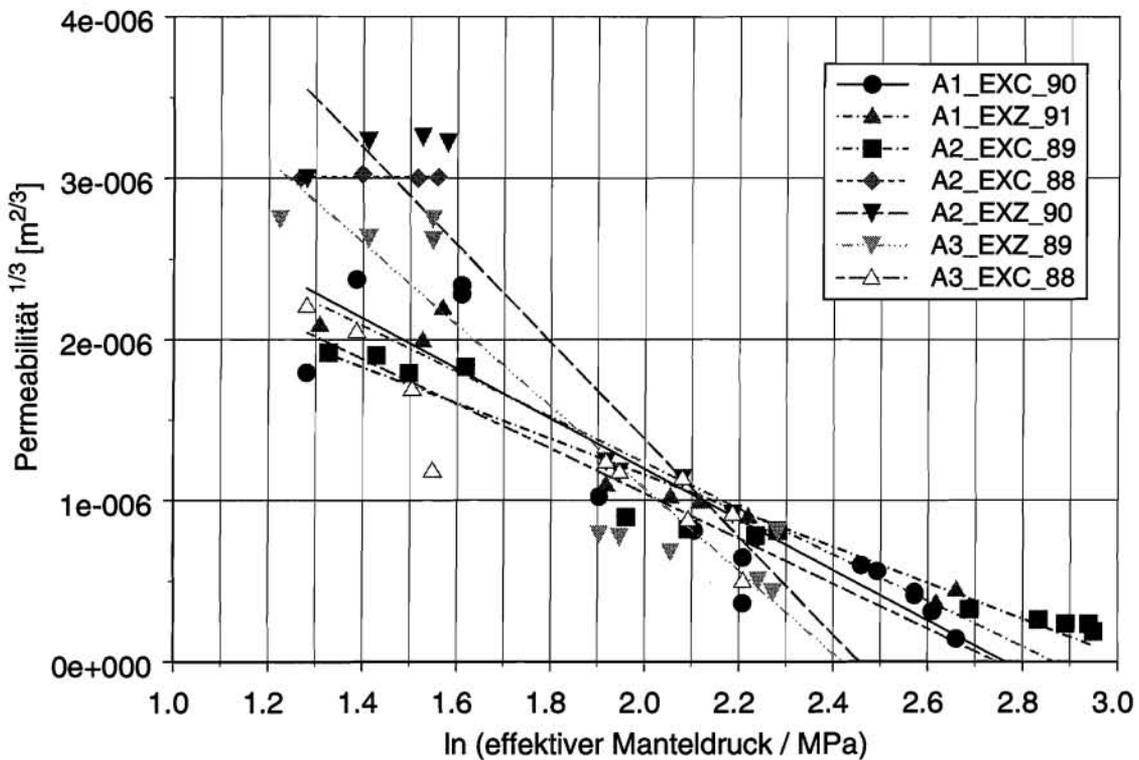
Eine entsprechende Korrelationsanalyse der korrigierten Meßdaten von Lai zeigt, daß diese noch befriedigend mit dem Walsh-Modell beschrieben werden. Die entsprechen-

de Darstellung der Meßwerte zeigt Abb. 3-9. Die Korrelationskoeffizienten liegen bis auf den der Meßreihe 1 ( $r \approx 0,928$ ) im Bereich  $0,95 < r < 0,99$ .



**Abb. 3-9** Druckabhängige Permeabilitäten von aufgelockertem Steinsalz nach Messungen von Lai mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell

Die Darstellung in Abb. 3-10 der Meßergebnisse von Jockwer aus Kap. 3.1.3 zeigt dagegen, daß deren Druckabhängigkeit unzureichend beschrieben wird. Die Korrelationskoeffizienten für die Meß- und die Fitwerte liegen zwischen 0,8 und 0,85 und sind damit deutlich niedriger als in den beiden vorangegangenen Analysen. Ähnlich schlecht war auch die Anpassung der Daten von Gloyna und von Schopper, wofür die Ursachen aber unklar sind. In [ 8 ] wird jedoch gezeigt, daß eine der Jockwerschen Meßreihen durch das Walsh-Modell linearisiert werden kann, wenn bei der Ableitung der Effektivdruckwerte anstelle des Biot-Koeffizienten  $s = 1$  (vgl. Formel (4) auf Seite 10) der Wert von 0,1 verwendet wird. Eigenen Rechnungen haben gezeigt, daß die Linearisierung bei den übrigen Meßreihen von Jockwer mit diesem Wert jedoch nicht verbessert wird. Mit dem Wert  $s = 0,75$  wird die beste Anpassung für alle Meßreihen erreicht.



**Abb. 3-10** Druckabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz nach Messungen von Jockwer mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell

Zusammenfassend kann man feststellen, daß das Walsh-Modell auch für Steinsalz wohl als Grundlage für eine theoretisch fundierte Beschreibung der Permeabilität rißdurchzogener Materialien geeignet ist, aber in der vorliegenden Form nicht ausreicht, sämtliche vorliegenden experimentellen Ergebnisse hinreichend quantitativ zu beschreiben. Dieses trifft insbesondere für die Messungen von Jockwer zu, bei denen die Proben im Gegensatz zu den übrigen Untersuchungen nicht getrocknet wurden und diese daher am ehesten die Verhältnisse in natürlichem, unbewettertem Salzgestein repräsentieren.

Die Anwendbarkeit des cubic law in Endlagersicherheitsanalysen ist dadurch eingeschränkt, daß die Parameter für alle aufgelockerten Bereiche angegeben werden müssen. Diese Parameter sind aber schwierig zu ermitteln oder nicht von vornherein bekannt. Daher ist ein Modell wie das von Walsh eher für die Interpretation von Labor-meßdaten im Rahmen spezieller Grundlagenuntersuchungen geeignet und weniger als Teilmodell in Rechencodes für Endlagersicherheitsanalysen, in dem die Permeabilität aufgelockerter Gebirgsbereiche aus den im Programm verfügbaren Parametern be-

stimmt wird. Für diesen Fall ist daher eine phänomenologische Permeabilitäts-Druck-Beziehung geeigneter.

### **3.2.2 Ableitung einer phänomenologischen Permeabilitäts-Druck-Beziehung**

Innerhalb von Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager im Salinar sind Detailmodelle für die ablaufenden Vorgänge zur Berechnung der Fluidströme nicht zweckmäßig. Der wesentliche Grund hierfür sind die Unsicherheiten bzw. die hohe Variabilität der Gebirgseigenschaften, so daß die erforderlichen Eingangsparameter für die Anwendung komplizierter Modelle wie das von Walsh nicht hinreichend bekannt sind. Deswegen werden in solchen Rechencodes vorzugsweise phänomenologische Modelle implementiert, in die nur wenige Eingangsparameter eingehen, die entweder vorgegeben werden, wie z.B. die Konvergenzrate und der Auflockerungsgrad, oder intern berechnet werden, wie Temperatur, Druck, Konzentration etc.

Zur Ableitung eines derartigen phänomenologischen Modells muß eine Funktion gesucht werden, welche die gemessenen Permeabilitäten möglichst gut in Abhängigkeit von den Meßparametern wie Druck, Zeit, o.ä. approximiert. Daneben muß die Approximationsfunktion in den Grenzfällen, für die normalerweise keine Meßdaten vorliegen, plausible Werte liefern. Für die Permeabilität von Auflockerungszonen bedeutet das, daß die Funktion für sehr hohe Drücke bzw. lange Zeiten die Permeabilität von ungestörtem Steinsalz liefern muß.

Ein Maß für die erreichte Güte der Approximation ist z.B. der Korrelationskoeffizient zwischen den Meß- und den Funktionswerten. Die Koeffizienten für die Funktionen können mit Hilfe von Regressionsrechnungen ermittelt werden. Eine solche statistische Analyse liefert auch Aussagen über die Güte der Approximation, den Erwartungswert für die Abweichung der Meßwerte von der Regressionskurve und die Konfidenzintervalle für die Formelkoeffizienten. Letztere sind insbesondere für probabilistische Sicherheitsanalysen erforderlich.

Eine Approximationsfunktion  $k(P)$  zur Beschreibung der Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom Druck muß die im folgenden genannten Bedingungen erfüllen.

Die Funktion  $k(P)$  nimmt für  $P = 0$  einen endlichen Wert an:

$$k(P \rightarrow 0) = k_0 \quad (8)$$

Für sehr hohe Drücke muß die Permeabilität der Auflockerungszonen gegen die Permeabilität von unaufgelockertem, natürlichen Steinsalz  $k_\infty$  konvergieren:

$$k(P \rightarrow \infty) = k_\infty. \quad (9)$$

Die Funktion  $k(P)$  ist eine monoton mit dem Druck abnehmende Funktion:

$$k(P_1) < k(P_2) \text{ wenn } P_1 > P_2. \quad (10)$$

Die Experimente haben gezeigt, daß  $k(P)$  sehr empfindlich vom Druck  $P$  abhängt. Innerhalb der in den einzelnen Untersuchungen abgedeckten Druckbereiche ändert sich  $k$  um etwa 4 bis 5 Größenordnungen. Wenn man eine Regressionskurve für  $k(P)$  nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate für den Ansatz

$$k_{fit}(P_j) = k_{mess}(P_j) + \varepsilon'_j \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

bestimmt, erhält man einen Verlauf, für den die Quadratsumme der Residuen  $\varepsilon'_j$ , also der Abstände zwischen den  $N$  Meßwerten  $k_{mess}(P_j)$  und den entsprechenden Funktionswerten  $k_{fit}(P_j)$ , minimal wird. Es ergeben sich Ausgleichskurven, die zwar nahe bei den hohen  $k$ -Werten im Bereich um  $10^{-15} \text{ m}^2$  liegen, aber bei den niedrigen Werten große Abweichungen zeigen, die ein vielfaches des Meßwertes betragen können. Eine gleichmäßige Verteilung der relativen Abweichungen ergibt der Ansatz:

$$k_{fit}(P_j) = k_{mess}(P_j) \cdot \varepsilon_j. \quad (12)$$

Gl. (12) geht durch Logarithmierung in die übliche Form für die lineare Regression über, bei der jetzt die Quadratsumme  $S$  der Residuen  $\log(\varepsilon_j)$  minimiert wird:

$$\log(k_{fit}(P_j)) = \log(k_{mess}(P_j)) + \log(\varepsilon_j) \quad (13)$$

Durch die Regression der logarithmierten Variablen werden daher nicht die absoluten, sondern die relativen Fehler minimiert. Die Bedingungen (8) bis (10) werden durch eine Approximationsfunktion der Form

$$\overline{\log(k)} = u_1 + \frac{u_2}{1+u_3 \cdot P^{u_4}} \quad (14)$$

mit  $u_3 > 0$  erfüllt. Darin bedeuten die Koeffizienten  $u_1$  den Wert der Permeabilität für  $P \rightarrow \infty$ , d.h.  $u_1 = \log(k_\infty)$  und  $u_2$  die in dekadischen Größenordnungen gemessene maximale relative Permeabilitätszunahme bei Entlastung auf  $P = 0$ . Der Koeffizient  $u_1$  entspricht somit der Permeabilität von unaufgelockertem Steinsalz und die Summe  $u_1 + u_2$  der Permeabilität  $k_0$  bei maximaler Auflockerung. Die Koeffizienten  $u_3$  und  $u_4$  haben keine unmittelbar anschauliche Bedeutung und bestimmen als Formparameter Lage und Krümmung der Approximationsfunktion im mittleren Druckbereich. Die Bestwerte für die Koeffizienten  $u_i$  ergeben sich aus der Bedingung (16) über eine Minimierung der Fehlerquadratsumme  $S$  nach Gl. (15). Da Gl. (14) bzw. (15) keine linearen Funktionen der Parameter  $u_i$  sind, können die Bestwerte nicht direkt nach den Standardverfahren der linearen Regression über die Normalgleichungen bestimmt werden.

$$S(u_i) = \sum_j (\log(k)_j - \overline{\log(k)_j})^2 = \sum_j [\log(k)_j - \log(k(P_j, u_i))]^2 \quad (15)$$

$$S_0 = \min(S(u_i)) \quad (16)$$

Am Minimum von  $S$  in Gl. (15) gilt  $\partial S / \partial u_i = 0$  für alle  $i$ . Die Berechnung der Bestwerte für die Koeffizienten  $u_i$  erfolgt mit Hilfe der Funktion `genfit`, die in der PC-Anwendungssoftware MATHCAD Version 6 Professional implementiert ist. Diese Funktion basiert auf dem iterativen numerischen Standardverfahren nach Marquardt-Levenberg [ 36 ]. Grundlagen und Details zur Durchführung derartiger Rechnungen sind in der Anleitung zu MATHCAD [ 28 ] ausführlich dokumentiert.

### 3.2.3 Bestimmung der Regressionskurven für die experimentellen Daten

Die Anpassung der Meßdaten aus Kapitel 3.1 an die in Kapitel 3.2.2 beschriebene vierparametrische Approximationsfunktion wird zunächst gemeinsam für sämtliche Meßreihen aus einer Untersuchung vorgenommen. Die berechneten Regressionsparameter sowie die Standardabweichung und der Korrelationskoeffizient zwischen den Meß- und Fitwerten von  $\log(k)$  als Maße für die Güte der Approximation sind in jeweils in der o-

ren Zeile zu einer Meßreihe aufgeführt. Die Effektivdrücke für die Daten von Jockwer wurden nach Gl. (4) einmal mit  $s = 1,0$  (a) und alternativ mit  $s = 0,75$  (b) berechnet, womit die beste Anpassung an das Walsh-Modell erreicht wurde (s. Kapitel 3.2.1).

Aus den Korrelationskoeffizienten  $r$  in Tab. 3-3 geht hervor, daß insbesondere die Meßdaten von Jockwer und Lai durch die phänomenologische Beziehung gut wiedergegeben werden können. Für die Daten von Jockwer und Schopper ergeben die Rechnungen mit  $u_1$ - bzw.  $\log(k_\infty)$ -Werten im Bereich um -20 plausible Werte, während die Ergebnisse für die von Lai- und Gloyna-Daten mit  $\log(k_\infty) < -50$  trotz der großen Korrelationskoeffizienten unrealistisch sind. Die Ursache für die hohen Werte liegt darin, daß diese Datensätze keine Meßwerte für niedrige Spannungen enthalten. Für diese Datensätze ergeben sich außerdem entsprechend hohe druckabhängige Permeabilitätsänderungen, die sich in den  $u_2$ -Werten widerspiegeln, und  $u_4$ -Werte im Bereich von 0,3. Die  $u_4$ -Werte für die Messungen von Jockwer und Schopper liegen dagegen bei  $\approx 2$ . Die Anpassung an die Peach-Daten liefert einen negativen  $u_3$ -Bestwert und damit keine monoton mit dem Druck abnehmende Permeabilität. Dieses Ergebnis ist daher nicht verwertbar.

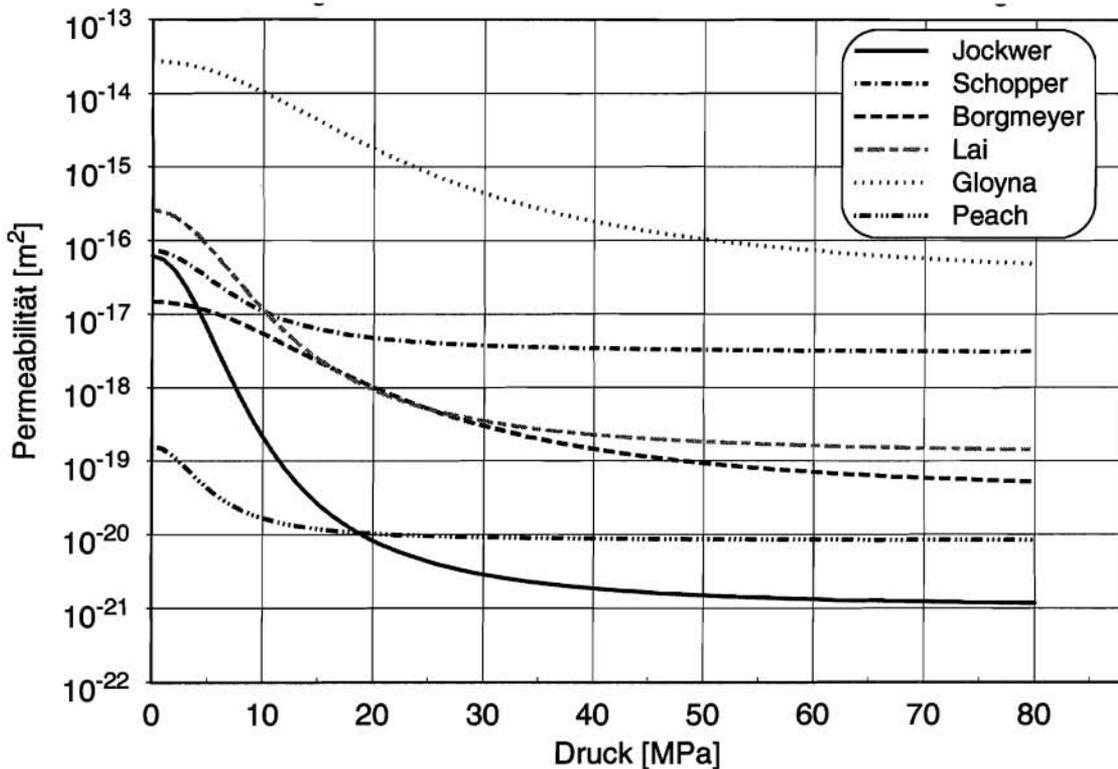
Vergleichsrechnungen mit verschiedenen, festgehaltenen Werten für den Parameter  $u_4$  haben ergeben, daß die Güte der Approximation durch diesen Parameter nur wenig beeinflußt wird. Daher wurden die Regressionsrechnungen mit  $u_4 = \text{const.} = 2,0$  als 3-parametrische Regression wiederholt. Der Wert von 2,0 entspricht ungefähr dem Ergebnis der vierparametrischen Regression der Meßdatengruppen von Jockwer und Schopper. Die Resultate stehen in der Tab. 3-3 unter den Bestwerten für die vierparametrische Regression. Man erkennt, daß die  $\sigma$ - und  $r$ -Werte für die dreiparametrische Regression nur geringfügig schlechter als für die vierparametrische Regression sind und daß die  $u_1$ -Werte für die Meßdaten von Lai, Gloyna und Borgmeier in realistische Bereiche verschoben werden. Die Approximation der Daten von Peach verschlechtert sich zwar merklich, dafür ist der Kurvenverlauf aber monoton fallend. Die geringfügige Variation des  $s$ -Wertes bei der Ableitung der Effektivdrücke aus den Daten von Jockwer zeigt keinen signifikanten Einfluß.

**Tab. 3-3** Ergebnisse der Regression der sechs Meßdatengruppen an die Approximationsfunktion Gl. (14) mit 4 bzw. 3 freien Parametern  $u_i$ . ( $N$  = Anzahl der Einzelmeßwerte,  $u_1 - u_4$  Formelkoeffizienten,  $\sigma$  = einfache Standardabweichung und  $r$  = Korrelationskoeffizient zwischen Meß- und Fitwerten).

Messung	$N$	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_1 + u_2$	$\sigma$	$r$
Borgmeier	46	-31,114	15,381	$33,52 \cdot 10^{-3}$	0,5388	-15,733	1,6076	0,4280
	46	-19,428	2,6504	$1,956 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-16,778	1,5925	0,4236
Schopper	86	-17,473	1,3138	$10,46 \cdot 10^{-3}$	2,1841	-16,159	1,0463	0,3402
	86	-17,523	1,3876	$14,77 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-16,135	1,0401	0,3401
Jockwer (a)	73	-20,776	4,4607	$7,268 \cdot 10^{-3}$	2,1900	-16,315	0,3590	0,9392
(a)	73	-20,999	4,7927	$10,55 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-16,206	0,3560	0,9392
(b)	73	-20,765	4,6048	$10,45 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-16,160	0,3619	0,9374
Gloyna	38	-157,01	143,88	$2,153 \cdot 10^{-3}$	0,3420	-13,130	0,7777	0,7815
	38	-18,924	3,0168	$1,633 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-15,907	0,8304	0,7369
Lai	30	-59,253	46,738	$45,97 \cdot 10^{-3}$	0,3420	-12,515	0,3179	0,9630
	30	-18,924	3,3365	$6,636 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-15,588	0,3526	0,9514
Peach	16	-19,645	0,5746	$-7,22 \cdot 10^{-3}$	7,0473	-19,070	0,4244	0,7921
	16	-20,080	1,2857	$32,33 \cdot 10^{-3}$	2,0000	-18,794	0,5974	0,4471

Tab. 3-3 ist auch zu entnehmen, daß sowohl bei der drei- als auch der vierparametrischen Regression  $u_1$  und  $u_2$  stark miteinander gegenläufig korreliert sind. Daher ist in der Tabelle noch die Summe von  $u_1$  und  $u_2$  aufgeführt, die in der gewählten Approximationsfunktion die Bedeutung der Permeabilität bei größter Auflockerung ( $P = 0$ ) hat. Die Werte liegen in einem plausiblen Bereich, und ihre Streuung ist wegen der Art der Korrelation wesentlich kleiner als die von  $u_1$  und  $u_2$ . Aus der starken Korrelation von  $u_1$  und  $u_2$  läßt sich schließen, daß diese beiden Parameter ohne große Genauigkeitsverluste durch einen einzelnen Parameter ersetzt werden können. Das bedeutet dann, daß die gesuchte Permeabilitäts-Druckrelation mit einem gegenüber dem allgemeinen Ansatz nach Gl. (14) reduzierten Ansatz beschrieben werden kann, der nur noch zwei anzupassende Koeffizienten enthält.

Die Ergebnisse der dreiparametrischen Regressionen, d.h. mit festem  $u_4 = \text{const.} = 2$ , für alle Datengruppen mit den Bestwerten aus Tab. 3-3 sind in Abb. 3-11 einander gegenübergestellt.



**Abb. 3-11** Ausgleichskurven der verschiedenen Meßdatengruppen zur Permeabilität in aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom Druck

### 3.3 Empfehlung einer Permeabilitäts-Druck-Beziehung

Die wichtigsten Kriterien, nach denen die Relevanz der einzelnen Experimente im Hinblick auf die Beschreibung der Verhältnisse in den Auflockerungszonen in einem Endlager im Salinar bewertet werden kann, sind in Tab. 3-4 zusammengestellt.

Hieraus geht hervor, daß die Proben in den meisten Fällen vor der Messung getrocknet wurden. Diese Vorgehensweise, die beispielsweise bei Sandsteinproben zur Vermeidung von Zweiphaseneffekten üblich ist, ist jedoch bei der Ermittlung repräsentativer Daten für ein Endlager im Salinar nachteilig, weil die plastischen Eigenschaften von Steinsalz im Gegensatz zu den nicht-viskoplastischen Gesteinen durch Feuchteinwirkung stark beeinflusst werden. So erhöhte sich beispielsweise in einem einachsigen Kriechversuch mit Steinsalz die Kriechgeschwindigkeit um den Faktor 55, nachdem die relative Luftfeuchte in der umgebenden Atmosphäre von 0 auf 70% erhöht wurde [ 19 ]. Solche Feuchtigkeitseinflüsse zeigen auch die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Langzeitmessungen sehr deutlich. Als weiterer Hinweis auf einen Feuchteinfluß kann auch die Beobachtung gedeutet werden, daß die Meßwerte für getrocknete Pro-

ben recht gut durch das Walsh-Modell beschrieben werden, was gerade bei den Meßwerten von Jockwer für ungetrocknetes Material nicht der Fall war (vgl. Kapitel 3.2.1). Deshalb sind die Ergebnisse für getrocknete Proben vermutlich nicht repräsentativ für die Verhältnisse in situ und werden daher nicht verwendet.

**Tab. 3-4** Gegenüberstellung der wesentlichen Charakteristika der verschiedenen experimentellen Laboruntersuchungen an natürlichem Salzgestein zur kurzzeitigen Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß

Experiment	$P$ [MPa]	Anzahl Msgn. $N$	$k (P \approx 0)$ min/max [m <sup>2</sup> ]	Trocknung	Salzproben Herkunft	künstl. aufge- lockert	Meß- fluid
Borgmeier	3-60	46	$1 \cdot 10^{-20}$ - $5 \cdot 10^{-15}$	ja	Kavernen	nein	N <sub>2</sub>
Schopper	2-19	86	$1 \cdot 10^{-18}$ - $2 \cdot 10^{-15}$	ja	Asse	nein	N <sub>2</sub>
Jockwer	4-19	73	$3 \cdot 10^{-18}$ - $3 \cdot 10^{-17}$	nein	Asse	nein	Luft
Gloyna	≈0-57	38	$9 \cdot 10^{-15}$ - $2 \cdot 10^{-13}$	ja	Grd. Saline	nein	Öl
Peach	1-19	16	$8 \cdot 10^{-20}$ - $2 \cdot 10^{-19}$	gering	Asse	ja	Ar
Lai	2-34	30	$4 \cdot 10^{-17}$ - $7 \cdot 10^{-16}$	nein	Louisiana	nein	Kerosin

Die Ergebnisse von Peach bleiben wegen der bereits in Kapitel 3.1.6 erwähnten geringen Anzahl und der Verteilung der Druckwerte unberücksichtigt. Auf Grund der Verwendung ungetrockneter Steinsalzproben wären auch die Meßergebnisse von Lai einzubeziehen. Da bei diesen Untersuchungen aber besonders der Einfluß der deviatorischen Spannungen im Vordergrund stand, sind nur einzelne Meßwerte für diese Untersuchung geeignet. Wegen der Unklarheiten bei der Auswertung werden diese aber nicht einbezogen.

Hieraus folgt die Empfehlung, für Anwendungsrechnungen mit Bezug auf die Verhältnisse in norddeutschen Salzstöcken die Relation

$$\log\left(\frac{k(P)}{1 \text{ m}^2}\right) = -21 + \frac{4,8}{1 + 10,55 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-2} \cdot P^2} \quad (17)$$

zur Beschreibung der Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom Druck anzuwenden, die aus der Gesamtheit der Meßwerte von Jockwer abgeleitet wurde: Die Koeffizienten wurden aus den Meßdaten über eine dreiparametrische nichtlineare Regression bestimmt (vgl. Tab. 3-3). Die Relation liefert die Permeabilität, die

sich im aufgelockerten Steinsalz unmittelbar nach einer Druckbeaufschlagung einstellt. Die nachfolgende zeitabhängige Permeabilitätsabnahme durch Kriechvorgänge wird dadurch nicht beschrieben.

In die Relation (17) sind auch die Laborergebnisse eingegangen, bei deren Messung ein hoher Gasdruckgradient aufgetreten ist. Aus der Ausführung am Schluß von Kapitel 3.1.3 geht hervor, daß die Relation deswegen vermutlich höhere Permeabilitäten als unter Endlagerbedingungen liefert. Diesen Einfluß könnte man mit einer Regression eliminieren, in der nur die Meßwerte mit den niedrigsten Druckgradienten berücksichtigt werden. Diese Meßwerte wurden mit Gas als Testfluid ermittelt. Es ist nicht sicher, ob sie auch für den Fall der Durchströmung mit Lauge gültig sind. Die in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Meßdaten von Borgmeier mit kurzzeitigen Druckwechseln legen außerdem nahe, die Permeabilitätsänderungen unter Druckeinfluß als irreversibel anzusehen. Da diese Aussage nur auf dem Ergebnis einer Einzeluntersuchung beruht, ist sie noch unsicher.



## 4 Ableitung einer Relation für die zeitabhängige Permeabilität

Wenn das Niveau des Manteldrucks nach einer Drucksteigerung aufrecht erhalten bleibt, nimmt die Permeabilität der aufgelockerten Proben im Laufe der Zeit weiter ab. Unter Druckeinwirkung werden in den Proben Prozesse ausgelöst, durch die das in Form von Rissen und Poren noch existierende Leervolumen allmählich weiter reduziert wird. Dementsprechend werden die Wegsamkeiten für Fluide und damit auch die Permeabilität mit der Zeit weiter verringert.

Für die Modellierung der Strömungsvorgänge in der Nachbetriebsphase eines Endlagers müssen die Permeabilitäten in den Verschlüssen und im umgebenden Gestein für lange Zeiträume prognostizierbar sein. Da derart lange Meßzeiträume nicht praktikabel sind, müssen hinreichend abgesicherte Gesetzmäßigkeiten über das Zeitverhalten bekannt sein, die Extrapolationen weit über die im Labor realisierten Meßzeiten hinaus gestatten. Dabei liegt es auf der Hand, daß Extrapolationen nach unterschiedlichen Modellansätzen mit wachsender Zeitdauer extrem unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Dieses trifft vor allem dann zu, wenn die Variablen in Exponential- oder Potenzfunktionen eingehen.

### 4.1 Zusammenhang von Permeabilität und Auflockerung in Steinsalz

Die Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus ist bereits in zahlreichen Experimenten untersucht worden und kann nach [ 10 ], [ 31 ] im Porositätsbereich  $0,003 < n < 0,42$  in guter Näherung durch eine Potenzfunktion in Abhängigkeit von der Porosität  $n$  mit  $m \approx 4$  wiedergegeben werden.

$$k_{\text{Salzgrus}} = A \cdot n^m \quad (18)$$

Im folgenden wird geprüft, ob sich die gemessenen Permeabilitäten von kontrolliert aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit von der Dilatation ebenfalls durch Gl. (18) oder eine analoge Beziehung beschreiben lassen.

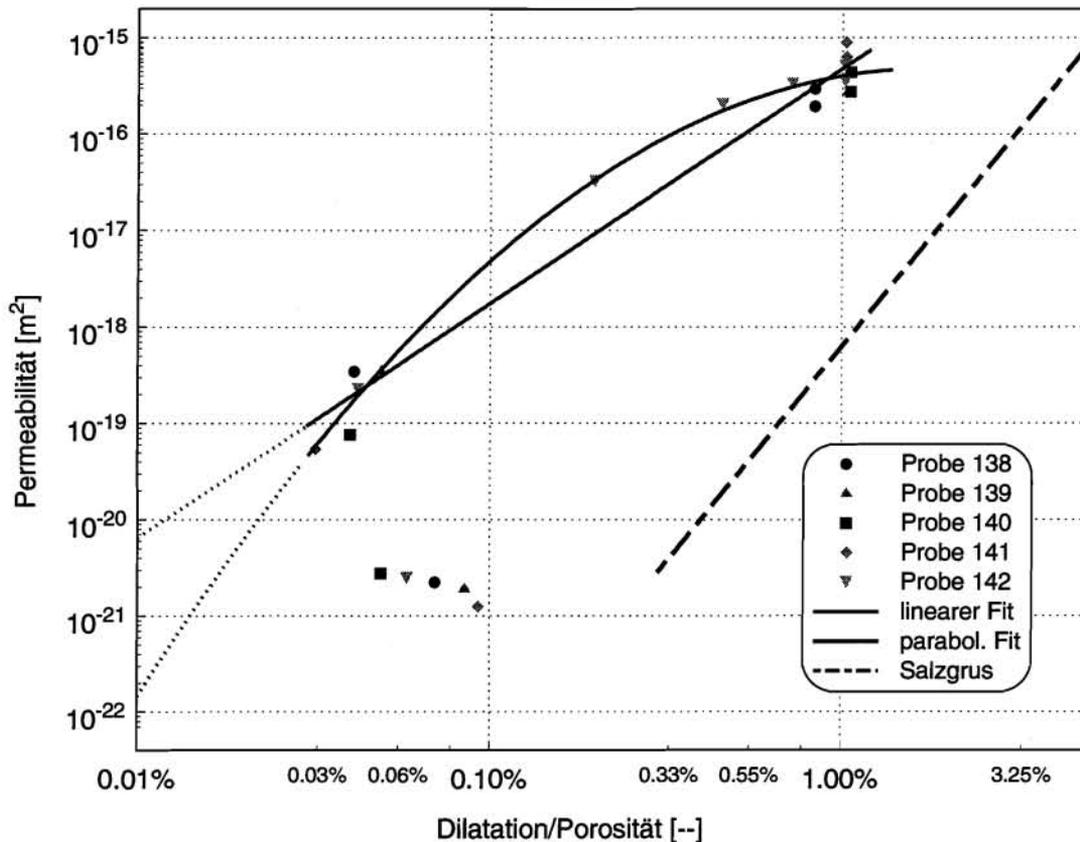
Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und Dilatation natürlicher Steinsalzproben wurde von Peach systematisch untersucht [ 32 ]. Fünf Steinsalzproben wurden unter deviatorischer Belastung bei konstantem effektivem Manteldruck von 3,5 MPa in einer Triaxialpresse mit einer Geschwindigkeit von  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  axial um etwa 10% gestaucht.

Dabei wurden die Axialspannung und die Volumenänderung der Probe kontinuierlich und die Permeabilität diskontinuierlich gemessen. Die Proben wurden im Salzbergwerk Asse aus ungestörten Bereichen im Älteren Steinsalz erbohrt und vor den Permeabilitätsmessungen nicht getrocknet. Sie hatten vor der Deformation Permeabilitäten im Bereich zwischen  $1 \cdot 10^{-21}$  und  $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  bei einem hydrostatischen Effektivdruck von 3,5 MPa.

Bis etwa 1% Stauchung liegt die deviatorische Spannung unter der Dilatanzgrenze, so daß die Proben zunächst komprimiert werden. Die maximalen Dichtezunahmen betragen zwischen 0,05 und 0,09%. Danach lockern die Proben auf und erreichen bei ca. 3% Stauchung wieder ihre Ausgangsdichte. Zwischen 3% und 10% Stauchung wird eine annähernd lineare Zunahme der Probenvolumina beobachtet, die nach Abzug des elastischen Anteils einer Dilatation von maximal ca. 1% entspricht. In Abb. 4-1 sind die Permeabilitäten in Abhängigkeit von der Dilatation dargestellt. Diese ist auf die höchste im Versuch erreichte Probendichte bezogen und daher immer positiv.

Während der ersten 4% axialer Stauchung, bei der die Probendichte ein Maximum durchläuft, steigt die Permeabilität um etwa fünf Größenordnungen auf ca.  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  an. Danach verläuft der Anstieg langsamer und die Permeabilität erhöht sich bis 10% Stauchung bzw. 1% Auflockerung asymptotisch auf etwa  $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Peach folgert daraus, daß die Permeabilität nicht nur durch die axial verlaufenden Risse bestimmt wird, sondern auch durch Verbindungen zwischen diesen Rissen, die teilweise ausgeprägte radiale Komponenten haben müssen. Diese werden jedoch auch durch die Axiallast begrenzt. Dies wäre dann auch eine plausible Erklärung dafür, daß die Beschreibung durch den hydrostatischen Druck bessere Ergebnisse liefert als durch den Radialdruck. Darüber hinaus erklärt dies auch den geringeren Anstieg der Permeabilität bei hohen deviatorischen Spannungen. Nach Ansicht von Peach belegen diese Messungen, daß der Anstieg der Permeabilität bis  $10^{-19} \text{ m}^2$  ohne merkliche Zunahme der Dilatation erfolgt und erst darüber eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Dilatation besteht. Die Dilatation von aufgelockertem Steinsalz verhält sich in Bezug auf die Permeabilität analog wie die Porosität bei Salzgrus. Die Permeabilitäten von Salzgrus, die sich bei der Extrapolation des Potenzgesetzes auf niedrigere Porositäten ergeben, wurden zum Vergleich mit in die Abb. 4-1 aufgenommen. Man erkennt, daß dilatiertes Steinsalz eine höhere Permeabilität besitzt als kompakter Salzgrus mit demselben Leervolumenanteil, d.h. daß Gl. (18) nicht die Permeabilitätsentwicklung von aufgelockertem Stein-

salz wiedergibt. Dieses ist vermutlich auf die unterschiedliche Struktur der durch Risse bzw. Poren gebildeten Strömungskanäle zurückzuführen.



**Abb. 4-1** Permeabilität von fünf Steinsalzproben bei Verformung in Abhängigkeit von der gemessenen Dilatation nach Peach, mit Ausgleichsgerade und –parabel durch die Meßpunkte mit  $k > 5 \cdot 10^{-19} m^2$  im Vergleich zur porositätsabhängigen Permeabilität von kompaktiertem Salzgrus nach [ 31 ]

Die Regression der Permeabilität nach der Dilatation ergibt die Abb. 4-1 dargestellte Ausgleichsgerade mit der Steigung 2,4. Bei dieser Regression wurden nur die Werte aus dem Bereich  $k > 5 \cdot 10^{-19} m^2$  berücksichtigt, in dem eine Dilatationsabhängigkeit beobachtet wurde (s.o.). Dieselben Meßwerte können jedoch viel besser durch eine Ausgleichsparabel approximiert werden, d.h. der Exponent  $m$  ist in diesem Bereich nicht konstant, sondern dilatationsabhängig. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Aussagekraft dieser Schlußfolgerung gering ist, da sie lediglich auf dem Ergebnis der Meßreihe für die Probe 143 beruht, die als einzige überhaupt Zwischenwerte im Bereich von 0,05% und 1% Dilatation enthält.

## 4.2 Zusammenhang von Permeabilität, Druck und Zeit

Die temperatur- und druckabhängige Kompaktion von Salzgrus kann nach den Messungen verschiedener Autoren in guter Näherung durch die Änderung der Porenzahl  $e$  bzw. der Porosität  $n$  mit einer Relation der Form

$$\dot{n} = -a(T, \sigma) \cdot t^{-1} \quad (19)$$

beschrieben werden [ 2 ], [ 18 ], [ 37 ], [ 44 ]. Darin bezeichnet  $a$  eine Größe, deren Wert von der Spannung  $\sigma$  und der absoluten Temperatur abhängig ist und  $t$  die Zeit. Für Kompressionsvorgänge bei konstanter Spannung  $\sigma$  und Temperatur  $T$  ergibt die Integration von Gl. (19) ein logarithmisches Zeitgesetz für die Porositätsabnahme.

$$n(t) = b - a \cdot \ln(t). \quad (20)$$

Für den Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Dilatation in Steinsalz wird die Gültigkeit einer zur Permeabilitäts-Porositätsrelation von Salzgrus analogen Beziehung unterstellt. Der Porositätsexponent  $m$  in Gl. (18) beträgt für Salzgrus im Mittel nach [ 31 ]  $\approx 4,5$ , und für aufgelockertes Steinsalz haben die in Kapitel 4.1 beschriebenen Meßergebnisse der Permeabilität in Abhängigkeit von der Dilatation einen Wert von ca. 2,4 ergeben. Daher wird die Konstante  $m$  in Gl. (18) in der Relation für Steinsalz durch eine Variable ( $q$ ) ersetzt, für die ein zutreffender Wert für aufgelockertes Steinsalz aus den vorliegenden Meßergebnissen abgeleitet werden soll

$$k_{\text{Steinsalz}} = A \cdot n^q. \quad (21)$$

Hieraus wird die Porositätsabhängigkeit mit Gl. (20) eliminiert und durch eine Zeitabhängigkeit ersetzt. Da außerdem  $P \propto \sigma$  gilt, ergibt sich eine Beziehung für die zeitliche Änderung der Permeabilität durch Kriechvorgänge unter Druckeinfluß:

$$\begin{aligned} k_{\text{Steinsalz}}(t, T, \sigma) &= A \cdot [(b - a(T, \sigma) \cdot \ln(t))]^q \\ &= k(t_0, T, P) \cdot [1 - s(P, \dots) \cdot \log(t/t_0)]^q \end{aligned} \quad (22)$$

Die Funktion  $k(t_0, T, P)$  stellt darin die zeitunabhängige Permeabilität unter Druckeinfluß dar, für die in Kapitel 3.3 mit Gl. (17) eine empirisch abgeleitete Relation angegeben wird. Gl. (22) besagt, daß zwischen der  $q$ -ten Wurzel der Meßwerte von  $k$  und dem Logarithmus der Kompaktionszeit ein linearer Zusammenhang besteht, wenn die Permeabilität mit der Dilatation verknüpft ist und die Gleichungen (20) und (18) auch für aufgelockertes Steinsalz gültig sind. Die Steigung der Geraden  $s$  hängt von  $q$ , dem Effektivdruck und von der aus dem Kriechvermögen von Steinsalz resultierenden Plastizität ab. Die Plastizität hängt wiederum von der Temperatur, dem Feuchtegehalt und möglicherweise noch weiteren Parametern ab. Bei der Spannung bzw. dem hydrostatischen Druck 0 ist  $s$  ebenfalls 0, da sich die Permeabilität nicht ändert.

Alternativ zum Dilatanzmodell (20) wird auch eine Relation der Form  $k \propto t^c$  bzw.

$$\log(k) = c(T, P, \dots) \cdot \log(t) \quad (23)$$

d.h. die Gültigkeit eines Potenzgesetzes für den Zusammenhang zwischen  $k$  und  $t$  geprüft. Diese Annahme wird weniger durch theoretische Gründe als durch Beobachtungen nahegelegt, daß einige Meßreihen in doppellogarithmischer Darstellung auf einen linearen Zusammenhang zwischen  $\log(k)$  und  $\log(t)$  hindeuten. Aus dem Potenzgesetz folgt, daß die Geschwindigkeit der relativen Permeabilitätsänderung mit  $1/t$  abnimmt.

$$\frac{\dot{k}(t)}{k(t)} = \frac{c}{t} \quad (24)$$

Die Konstante  $c$  ist wie die Größe  $s$  im Dilatanzmodell eine Funktion von  $\sigma$ ,  $T$  etc. und hat für  $P = 0$  ebenfalls den Wert 0.

### 4.3 Experimentelle Ergebnisse aus Dauerversuchen

Die Anzahl der Untersuchungen über die Zeitabhängigkeit der Permeabilität von komprimiertem oder aufgelockertem Steinsalz ist ziemlich gering im Vergleich zu den Kurzzeitmessungen zur Druckabhängigkeit, von denen einige in Kapitel 3.1 beschrieben sind. Für die Kriechgeschwindigkeit von Steinsalz sind neben der bereits genannten starken Temperatur- und Spannungsabhängigkeit noch weitere Einflußgrößen relevant, wie der Gehalt an Fremdmineralen oder der Feuchte. Daher reichen die experimentellen Ergebnisse insgesamt noch nicht für die Ableitung einer Relation für die Permeabi-

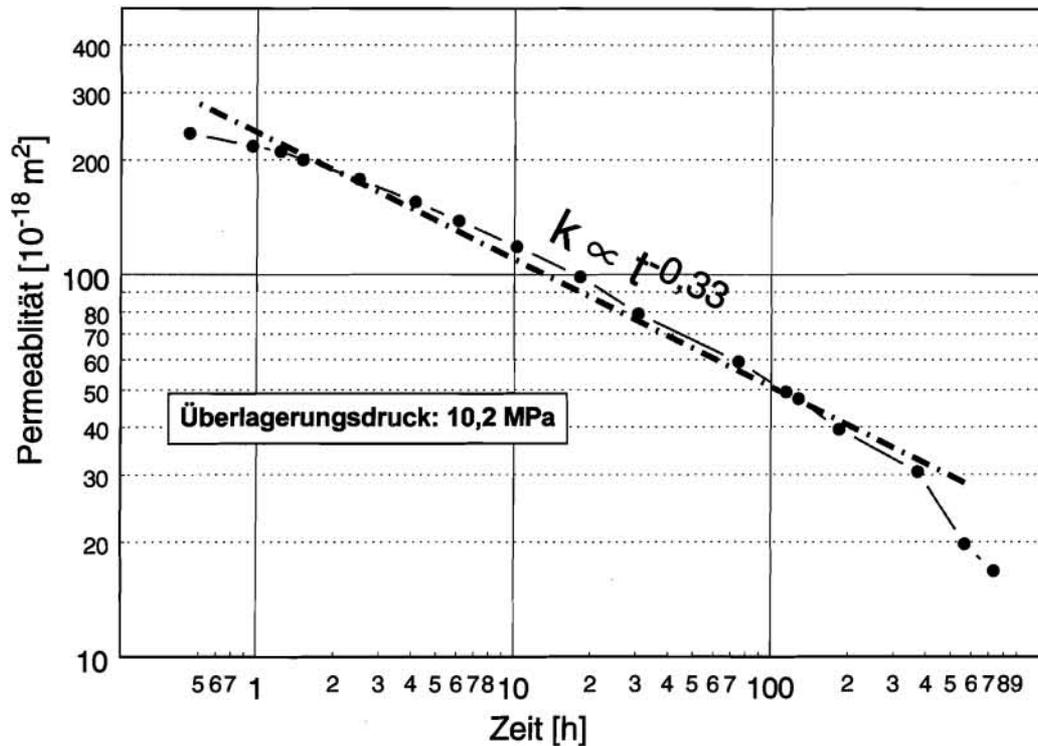
lität der in einem Endlager anzutreffenden Steinsalzformationen unter den dort vorkommenden Bedingungen aus.

Neben den in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Messungen von Förster, Peach und Borgmeier wurden in der TU Clausthal begleitend zu den in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Untersuchungen auch die Permeabilität von insgesamt 12 Steinsalzproben, die auf der 800-m-Sohle im Salzbergwerk Asse aus streckennahen Bereichen entnommen wurden, in Dauerversuchen untersucht [ 14 ]. Bei diesen jeweils ca. eine Woche dauernden Versuchen wurde ein konstanter hydrostatischer Druck von 12 MPa eingestellt. Der Gasinjektionsdruck wurde so niedrig wie möglich gehalten, so daß die effektiven Manteldrücke bei ca.  $11 \pm 0,34$  MPa lagen. Gemessen wurden die zeitabhängigen Permeabilitäten, deren Abnahme durch eine exponentielle Abklingfunktion beschrieben wird. Die Wahl dieser, von den im Vorangegangenen aufgeführten Funktionen Gl. (22) und (23) abweichenden Form wird nicht weiter begründet.

Die ermittelten Zeitkonstanten für die relative Permeabilitätsabnahme liegen im Bereich zwischen  $0,6 \cdot 10^{-3}$  und  $5,7 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Das geometrische Mittel aus allen Einzelwerten beträgt  $1,74 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Die Extrapolation der Exponentialfunktion auf eine Permeabilitätsreduktion um den Faktor 10 ergibt damit eine Dauer von ca. 1300 h.

#### **4.3.1 Messungen von Förster**

Die Publikation [ 13 ] von Förster aus dem Jahre 1974 enthält Meßergebnisse der zeitlichen Permeabilitätsänderung druckbeaufschlagter Salzproben aus verschiedenen mitteldeutschen Lagerstätten. In Abb. 4-2 sind die in einem etwa einmonatigen Zeitraum an reinem Steinsalz bei einem effektiven Überlagerungsdruck von 10,2 MPa bei stationärer Durchströmung mit Luft gemessenen Permeabilitäten wiedergegeben. In dieser Zeit nahm die Permeabilität, die unmittelbar nach der Druckbeaufschlagung  $2,8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  betrug, auf etwa 6% dieses Wertes ab. Die als Potenzfunktion angesetzte Approximationskurve in dem Diagramm hat die Steigung  $-1/3$ , was besagt, daß die Permeabilität sich um eine Größenordnung erniedrigt, wenn die Zeit um drei Größenordnungen anwächst.



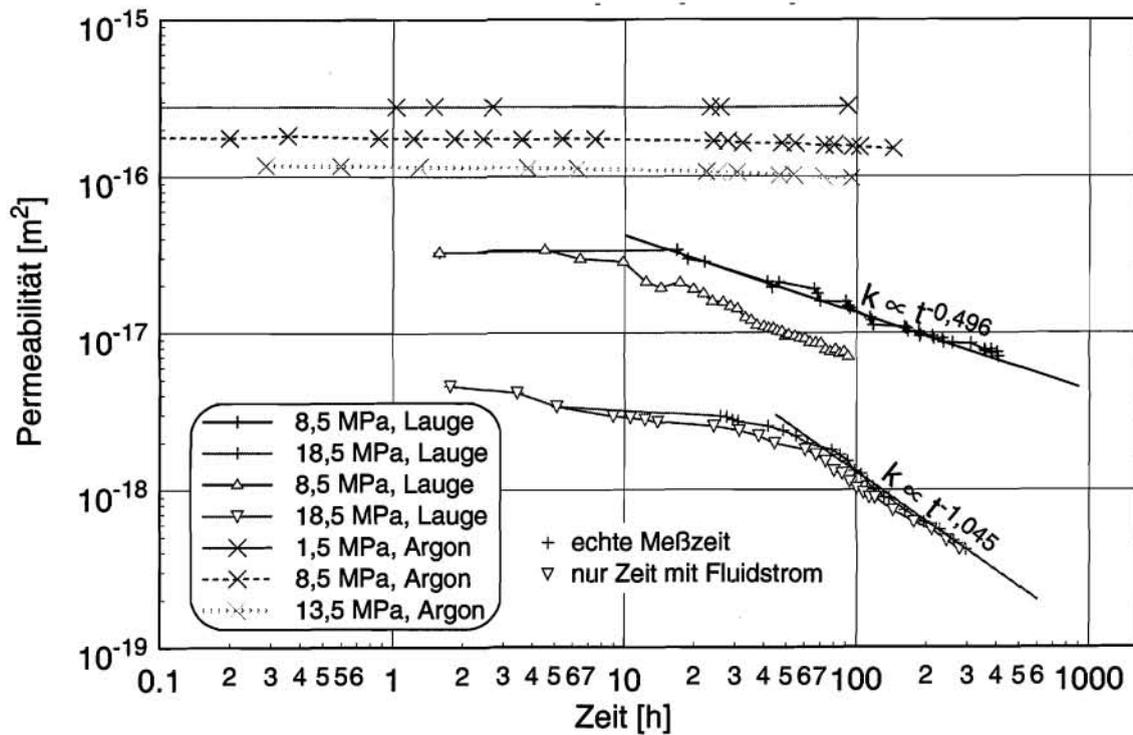
**Abb. 4-2** Zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz bei 10,2 MPa Überlagerungsdruck [ 13 ] mit Approximation durch ein Potenzgesetz

Entsprechende Messungen an Steinsalzproben, die mit Anhydrit verwachsen waren, zeigten unter denselben Bedingungen deutlich geringere Permeabilitätsabnahmen, die im Bereich zwischen etwa 33% und 70% des Anfangswertes unmittelbar nach der Druckerhöhung auf 10,2 MPa liegen. Diese Meßwerte bleiben unberücksichtigt, weil sie zeigen, daß die Anwesenheit von Anhydrit als starre Phase im Steinsalz die Ausheilung der Auflockerungszone unter Druckeinwirkung verlangsamt.

#### 4.3.2 Messungen von Peach

Neben den in Kapitel 3.1.6 beschriebenen Untersuchungen zur Druckabhängigkeit der Permeabilität von aufgelockertem Asse-Steinsalz hat Peach auch die Zeitabhängigkeit bei Durchströmung mit gesättigter Salzlauge und Argon ermittelt [ 32 ]. Dabei wurde die Gas- und Laugenpermeabilität einer Gesteinsprobe auf unterschiedlichen Druckniveaus Druck in Meßperioden von etwa 100 bis 400 Stunden quasikontinuierlich bestimmt. Bei den Messungen mit Argon wurde der Effektivdruck stufenweise von

1,5 MPa über 8,5 auf 13,5 MPa und bei denen mit Lauge von 8,5 auf 18,5 MPa erhöht. Die Ergebnisse für die Zeiten mit konstantem Druck zeigt Abb. 4-3.



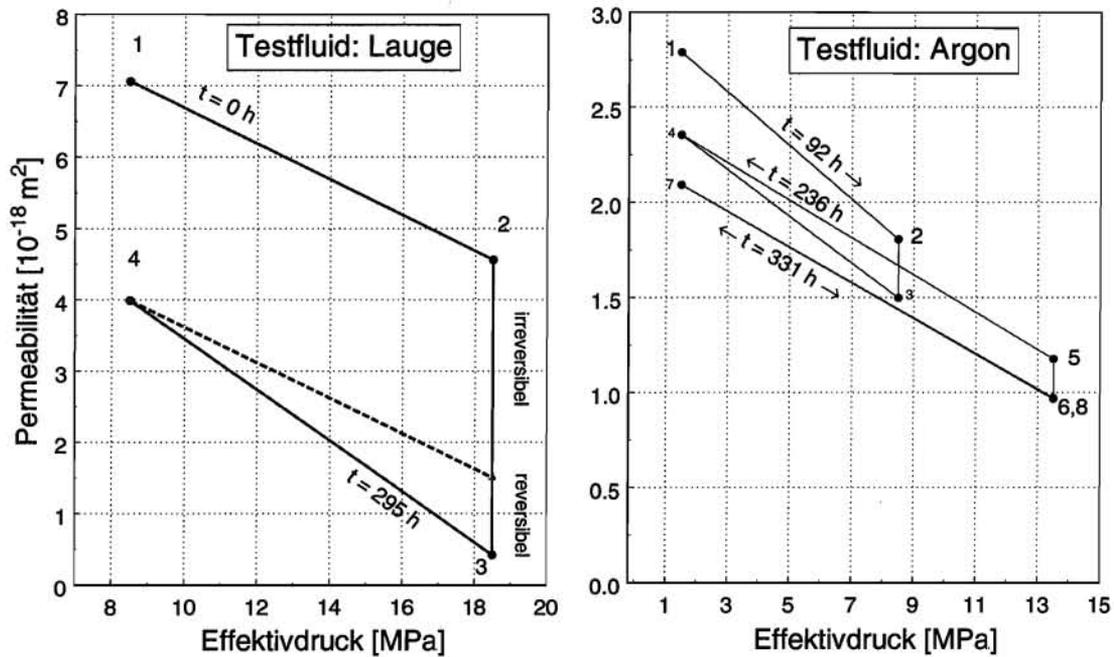
**Abb. 4-3** Zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz für Lauge und Argon nach Peach [ 32 ]. (+:Originalmeßwerte, ∇: zeitkorrigierte Werte)

Die untersuchte Probe hatte Zylindergeometrie mit 70 mm Durchmesser und 157 mm Länge. Sie wurde vorher axial um ca. 10% gestaucht und dabei um 1,3 Vol% aufgelockert. Dadurch hatte diese bei der anfänglichen Messung mit Argon eine Permeabilität von etwa  $3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . Danach wurde die durch den aufgebrachten Manteldruck kompaktierte Probe ohne neuerliche künstliche Auflockerung für die Messung mit Lauge wiederverwendet. Daher hatte sie vor dieser Messung mit  $7,3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  für Argon und  $3,3 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  für Lauge eine viel niedrigere Anfangspermeabilität. Jeweils vor und nach Beendigung der Dauermessungen unter hohem Druck wurden kurzzeitig wieder die Werte der vorangegangenen Druckstufen eingestellt. Die Historie des Druckverlaufs bei diesen Messungen geht aus den beiden Diagrammen in Abb. 4-4 hervor. Daraus wird erkennbar, wie weit die beobachteten zeitabhängigen Permeabilitätsabnahmen bei zyklischer Variation des Drucks reversibel sind.

Bei den Messungen mit Lauge wurde die Fließrichtung des Fluids mehrfach umgekehrt, wobei keine Beeinflussung der Meßwerte festgestellt wurde. Hierfür mußte der Fluidstrom aus technischen Gründen mehrmals unterbrochen werden. Dabei wurde beobachtet, daß die Permeabilitätsänderungen im wesentlichen dann auftraten, solange die Proben von Lauge durchströmt wurden. Peach hat deshalb zeitkorrigierte Darstellungen dieser Meßwerte angegeben, bei denen die Zeiten mit unterbrochenem Laugenstrom eliminiert wurden. Diese Kurven wurden zum Vergleich in die Abb. 4-3 aufgenommen. Die Ursache für diese Abhängigkeit vom Durchfluß ist nicht bekannt. Vorstellbar ist beispielsweise die Auskristallisation von Salz aus der gesättigten Lauge. Wenn das zutrifft, ist die beobachtete Permeabilitätsreduktion allerdings keine Folge plastischer Verformungen des Salzes, wie üblicherweise unterstellt wird.

Die Permeabilitäten sind in dem Diagramm in Abb. 4-4 über dem Effektivdruck als Kurvenzug entsprechend ihrer zeitlichen Reihenfolge dargestellt. Am Anfang der Langzeitmessung mit Lauge bei 18,5 MPa betrug die Permeabilität  $4,56 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  und nahm in etwa zwei Wochen auf  $0,42 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  ab (Punkte 2 und 3 im linken Diagramm). Jeweils davor und danach wurden noch zwei Vergleichsmessungen bei 8,5 MPa Effektivdruck durchgeführt (Punkte 1 und 4). Diese ergaben  $7,06 \cdot 10^{-18}$  bzw.  $3,99 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ . Die Meßwerte für den Versuch mit Lauge als Testfluid zeigen, daß die Permeabilitätsabnahme von  $4,14 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ , die während der 294-stündigen Druckbelastung bei 18,5 MPa aufgetreten ist, aus einem elastisch-reversiblen und einem plastisch-irreversiblen Anteil besteht. Bei der Entlastung auf 8,5 MPa ist der irreversible Anteil mit  $3,07 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  etwa dreimal so groß wie der reversible, der  $1,07 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  beträgt.

Die entsprechende Darstellung der Meßwerte für Argon zeigt das rechte Diagramm in Abb. 4-4. Während der 92-stündigen Messung bei 1,5 MPa Effektivdruck wurden keine signifikanten Änderungen der Anfangspermeabilität, die ca.  $2,8 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  betrug, gemessen. Die vorübergehende Absenkung des Effektivdrucks von 18,5 auf 1,5 MPa (Punkte 6,7 und 8) verlief praktisch reversibel, so daß die Verbindungslinien in dem Diagramm aufeinanderfallen. Die Parallelität der Kurvenzüge bei einer Steigerung des Effektivdrucks (1-2, 4-5, 7-8) und späterer Entlastung (3-4, 6-7) belegt, daß die Permeabilitätsabnahmen, die bei dieser Messung in den Perioden mit konstantem Druck aufgetreten sind, gänzlich irreversibel sind.



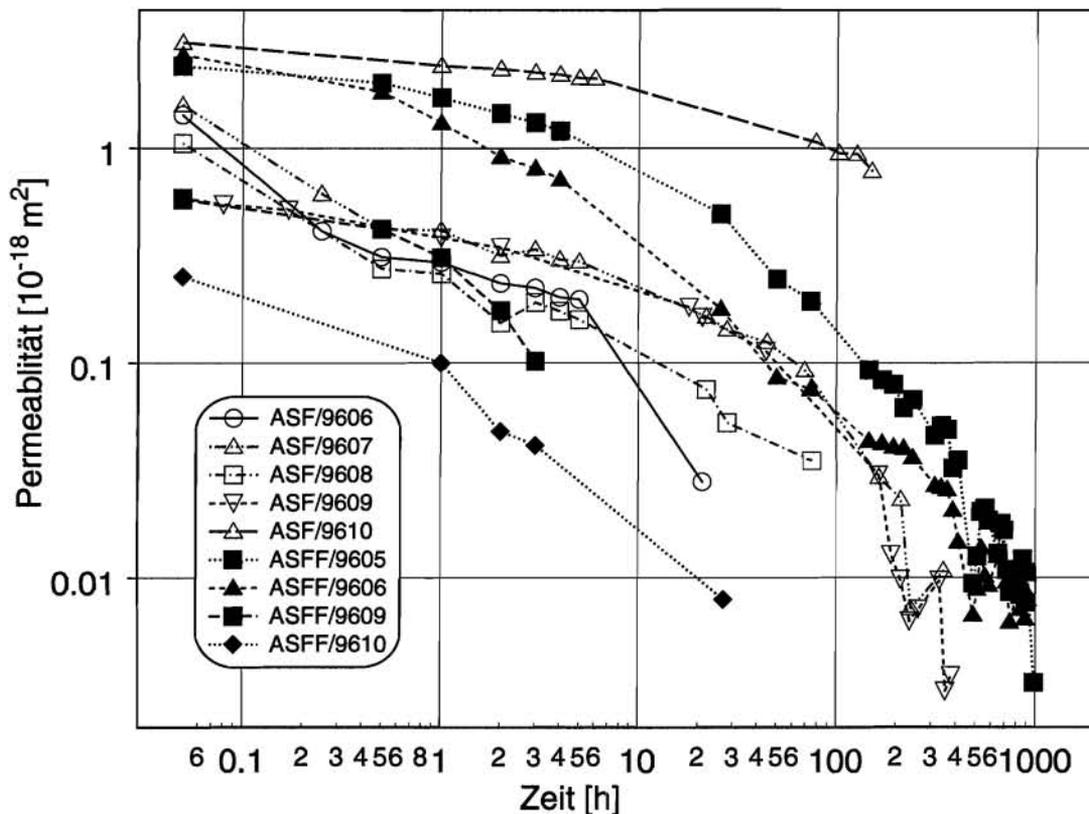
**Abb. 4-4** Änderung der Permeabilität mit gesättigter Salzlauge (links) bzw. Argon (rechts) bei Wechseln der Druckbelastung (schräge Linien) und zwischenzeitlichen stationären Perioden (senkrechte Linien) nach Peach [ 32 ]

#### 4.3.3 Messungen der TU Bergakademie Freiberg

In einem umfangreichen, BMBF-geförderten FuE-Vorhabens wurde der Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Porosität von kompaktiertem Salzgrus experimentell untersucht. Dabei wurden ebenfalls auch einige begleitende Untersuchungen an Bohrkernen aus massivem, natürlichem Salzgestein durchgeführt [ 11 ]. Das Probenmaterial stammt von der 750-m-Sohle des Forschungsbergwerks Asse und ist damit dem von Peach untersuchten Material (siehe Kapitel 4.3.2) bezüglich der mineralogischen Zusammensetzung sehr ähnlich.

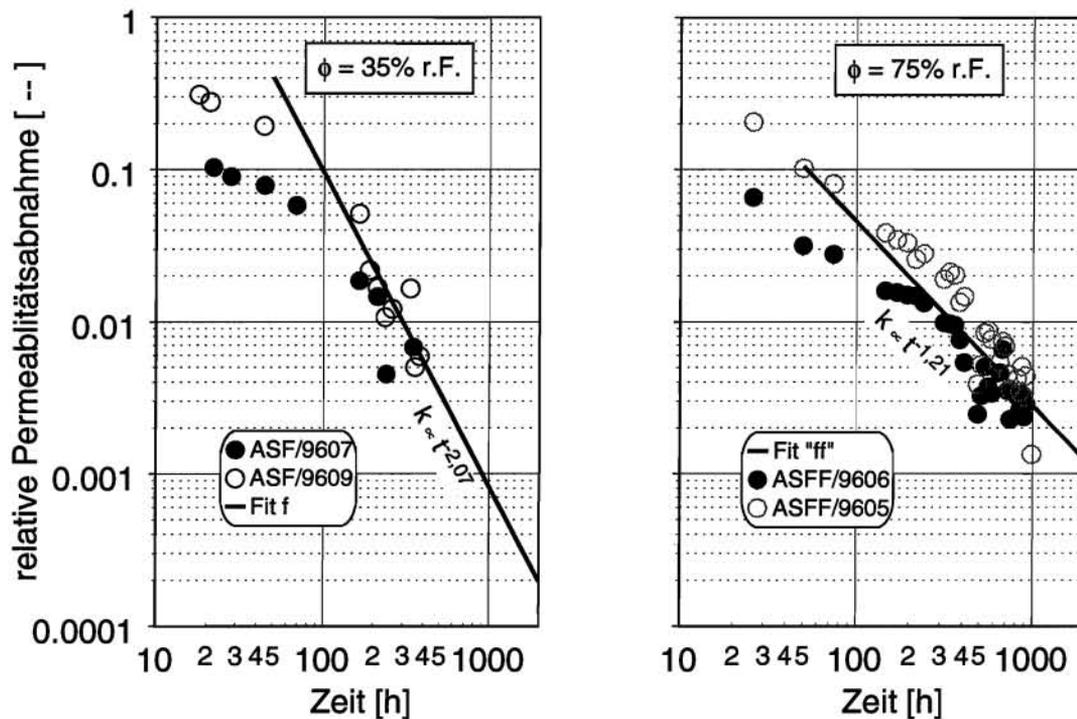
Fünf der insgesamt neun untersuchten Kerne wurden vor der Permeabilitätsmessung in Luft über mehrere Tage bei 35% relativer Feuchte gelagert. Diese Proben haben die Kennung ASF/9606 bis ASF/9610. Die übrigen vier wurden dagegen in feuchter Luft bei 75% r.F. aufbewahrt, die mit ASFF/9605 bis ASFF/9610 bezeichnet sind. Die Messung der zeitabhängigen Permeabilität unter einem Manteldruck von ca. 20 MPa erfolgte bei allen Proben mit trockenem Wasserstoff bzw. Stickstoff als Meßfluid. Der Gasinjektionsdruck betrug jeweils ca. 16 MPa, damit ergibt sich nach (4) mit  $s = 1$  ein einheitlicher effektiver Überlagerungsdruck von 12 MPa. Die Meßzeiten liegen zwi-

schen 3 und ca. 1000 h. Die Ergebnisse sind in Abb. 4-5 zusammengefaßt, wobei die Ergebnisse für die F-Proben durch offene und die für die FF-Proben durch ausgefüllte Symbole gekennzeichnet sind.



**Abb. 4-5** Zeitabhängige Permeabilität von neun aufgelockerten Steinsalzproben bei 12 MPa effektivem Überlagerungsdruck. Vorherige Lagerung bei 35% (offene Symbole) und 75% relativer Luftfeuchte (geschlossene Symbole)

Die im Bericht angegebenen Anfangswerte der Permeabilität beziehen sich auf den Zeitpunkt  $t = 0$ , in dem Diagramm sind diese Werte wegen der logarithmischen Zeitskala bei  $t = 0,1$  h aufgetragen. Die Messungen zeigen eine Abnahme der Permeabilität von Anfangswerten zwischen  $3 \cdot 10^{-19}$  und  $5 \cdot 10^{-18}$  m<sup>2</sup> auf Werte im Bereich von  $10^{-20}$  bis  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> nach etwa 100 h. Aus der Darstellung der Meßwerte für alle neun Proben in Abb. 4-5 wird kein signifikanter Unterschied zwischen den feucht und trocken gelagerten Proben erkennbar.



**Abb. 4-6** Zeitliche Permeabilitätsabnahme von trocken (linkes Diagramm) und feucht gelagerten Steinsalzkerne (rechtes Diagramm) bei 12 MPa effektivem Überlagerungsdruck mit Ausgleichsgerade für die Meßwerte mit  $t > 100$  h.

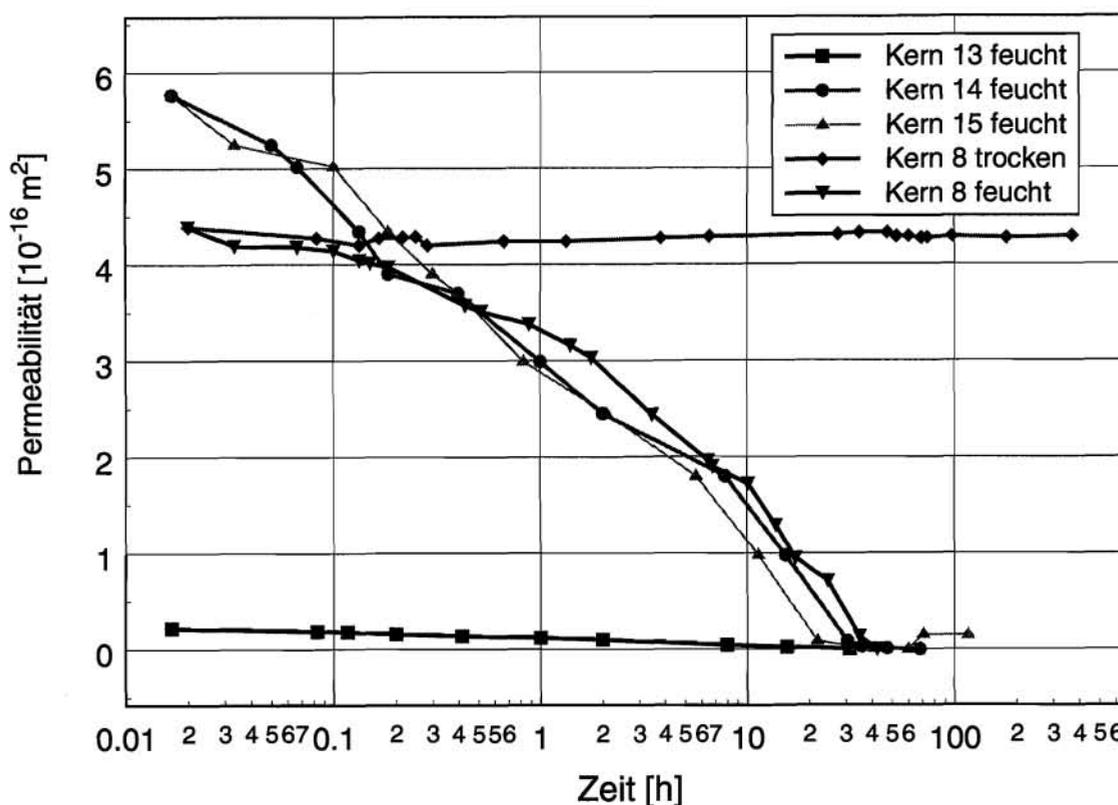
Die beiden Diagramme in Abb. 4-6 zeigen jeweils für die trocken und feucht gelagerten Proben die Ergebnisse der 4 Messungen mit Meßzeiten  $> 100$  h, die am deutlichsten die Zeitabhängigkeit zeigen. In der  $\log(k)/\log(t)$ -Darstellung beschleunigt sich die Abnahme der Permeabilität nach etwa 100 h. Die Steigung der Ausgleichsgerade für die Werte mit  $t > 100$  h entspricht Werten für den Zeitexponenten  $c$  von -1,21 und -2,08. Demzufolge verringerte sich die Permeabilität der trocken gelagerten Proben anscheinend schneller als bei den feucht gelagerten. Es ist aber fraglich, ob dieser Unterschied signifikant ist, da die Messungen an den „F“-Proben nur den Zeitraum bis ca. 300 h abdecken.

#### 4.3.4 Messungen von Borgmeier

Ergänzend zu den bereits in Kapitel 3.1.1 angesprochenen Messungen der kurzzeitigen Permeabilitätsänderung von aufgelockertem Steinsalz unter Druckeinwirkung enthält der Bericht [ 4 ] auch Ergebnisse von speziellen Langzeitversuchen, in denen der Einfluß der Feuchte im Porenraum der Proben untersucht wurde. Vorversuche hatten

gezeigt, daß geringste Feuchtemengen das Kompaktionsverhalten und die Permeabilitätsentwicklung unter Druck erheblich beschleunigen. Untersucht wurden Proben aus natürlichen Steinsalzvorkommen und künstliche Proben aus kompaktiertem Salzgrus. Die Permeabilitätsmessungen erfolgten mit Argon bei 10 MPa Injektionsdruck unter einem Manteldruck von 20 MPa. Für den hierbei wichtigsten Parameter, die Feuchtigkeit im Porenraum, wurden bei den Messungen zwei Grenzfälle realisiert:

1. „Trockene Proben“: das mobile Wasser im Porenraum wurde durch längere Trocknung bei Unterdruck und 50 °C entfernt.
2. „Luftfeuchte Proben“: Lagerung der Proben in einer mit Wasserdampf gesättigten Stickstoffatmosphäre.

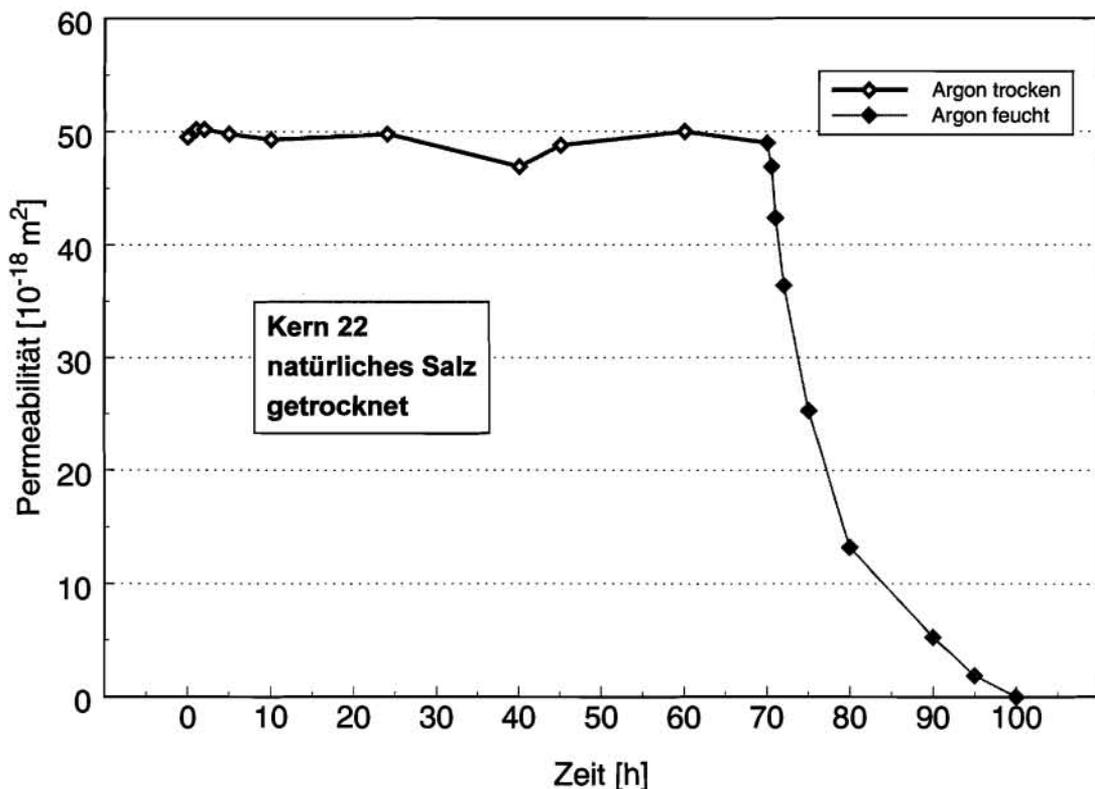


**Abb. 4-7** Zeitabhängige Permeabilitäten von Steinsalzproben, die in Wasserdampf-gesättigter  $N_2$ -Atmosphäre gelagert wurden („feucht“) und einer getrockneten Probe bei 20 MPa Mantelruck (nach Borgmeier [ 4 ])

In Abb. 4-7 sind einige der in [ 4 ] enthaltenen Ergebnisse für „trockene“ und „luftfeuchte“ Proben wiedergegeben. In der Arbeit ist nicht angegeben, ob die Messungen für beide Probenarten mit trockenem Argon erfolgten, was aber wahrscheinlich ist. Auf jeden Fall verdeutlicht dieses Diagramm den großen Einfluß der Feuchte im Poren-

raum auf die Geschwindigkeit der Permeabilitätsreduktion. Während bei der trockenen Probe innerhalb des ca. 400-stündigen Meßzeitraumes überhaupt keine signifikante Permeabilitätsabnahme registriert wurde, fiel die Permeabilität bei den „luftfeuchten“ Proben jeweils relativ schnell innerhalb von 20 bis 40 Stunden unter die Nachweisgrenze des Meßverfahrens ab.

Bei einer Messung mit einer getrockneten natürlichen Probe wurde die Feuchte dadurch verändert, indem zunächst trockenes Argon als Meßfluid verwendet wurde. Nach 70 h wurde das Gas durch ein Vorlagegefäß mit Wasser geleitet und dadurch auf 100% r.F. aufgesättigt (Abb. 4-8). Auch diese Messung zeigt die starke Beschleunigung der Permeabilitätsreduktion durch Feuchte. Eine ähnlich rasche Abnahme der Permeabilität bei einem Anstieg der relativen Feuchte im Meßgas von 30% auf 85% wurde auch in Proben aus kompaktiertem Salzgrus beobachtet [ 12 ].



**Abb. 4-8** Zeitliche Entwicklung der Permeabilität einer aufgelockerten Steinsalzprobe bei 70-stündiger Durchströmung mit trockenem und anschließend mit wasserdampfgesättigtem Argon (nach Borgmeier [ 4 ])

Die Relevanz dieser Messungen zur Beschreibung der Vorgänge in einem salinaren Endlager ist jedoch sehr gering, weil dort keine Atmosphären mit 100% r.F. vorkommen können. Nach dem Raoult'schen Gesetz reduziert sich der Wasserdampfdruck über

einer Salzlösung entsprechend der molaren Konzentration der gelösten Stoffe gegenüber dem Dampfdruck des reinen Lösungsmittels. Die maximale relative Luftfeuchte über einer gesättigten NaCl-Lösung liegt im Temperaturbereich zwischen 30 und 80 °C bei ca. 76% [ 23 ]. Da diese Grenze für andere Salze wie  $MgCl_2$  oder KCl noch darunter liegt, kann die relative Feuchte in den Gasatmosphären in einem Endlager in der Nachbetriebsphase nie über 76% ansteigen, weil bei einer Überschreitung dieser Grenze die Oberflächen des Salzes im Kontaktbereich sofort angelöst werden.

Bei den Durchströmungsexperimenten mit feucht ausgelagerten Proben bzw. wasserdampfgesättigten Gasen wurde an den Oberflächen des Porenraums Salz gelöst. Die dabei entstehende Lauge begünstigt eine Abnahme der Permeabilität durch die folgenden drei Effekte:

1. Durch die Lösungsvorgänge wird die Rauigkeit der Oberflächen reduziert, wodurch die Risse unter Druckeinwirkung leichter durch elastische Verformung geschlossen werden können.
2. Die Lauge erhöht die Kriechfähigkeit des Salzgesteins, wodurch das Schließen der Risse durch plastische Verformung beschleunigt wird.
3. Die gebildete Lauge sammelt sich vorzugsweise an engen Stellen im Porenraum und verschließt dadurch einzelne Strömungspfade. Mit zunehmender Laugenbildung treten im mikroskopischen Bereich Zweiphasenströmungen auf.

Da die Randbedingungen bei diesen Messungen für die Verhältnisse in einem Endlager nicht repräsentativ sind, werden diese nicht weiter ausgewertet. Es bleibt aber festzuhalten, daß die Gebirgsfeuchte auf jeden Fall einen beträchtlichen Einfluß auf die zeitabhängige Rißausheilung hat. Borgmeier folgert sogar, daß ein Schließen der Risse überhaupt erst durch die Anwesenheit von Feuchte ermöglicht wird und ferner die von Förster gemessenen Permeabilitätsabnahmen (vgl. Kapitel 4.3.1) nur deswegen aufgetreten sind, weil die Proben nicht restlos getrocknet wurden. Wegen des unter Punkt 2 aufgeführten Effektes kann man auch erwarten, daß Messungen mit Lauge immer Ergebnisse zeigen, die von denen für Gase unter sonst gleichen Bedingungen stark abweichen. Dieser Aspekt muß bei der Übertragung von Laborergebnissen auf die Verhältnisse in einem Endlager im Salinar beachtet werden.

#### 4.4 Anpassung der Modelle zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit

Zunächst werden die Anwendbarkeit und die zeitliche Extrapolierbarkeit des durch (22) wiedergegebenen Dilatanzmodells mit den in Kapitel 4.3 beschriebenen Meßergebnissen überprüft. Anschließend wird dieselbe Prüfung auch für das Potenzgesetz nach (23) vorgenommen. Ein Vergleich der Ergebnisse soll dazu dienen, eine geeignete Relation für die Verwendung in Endlager-Sicherheitsanalysen abzuleiten. Dabei bleiben die Ergebnisse von Borgmeier wegen der speziellen Randbedingungen bei den Messungen unberücksichtigt.

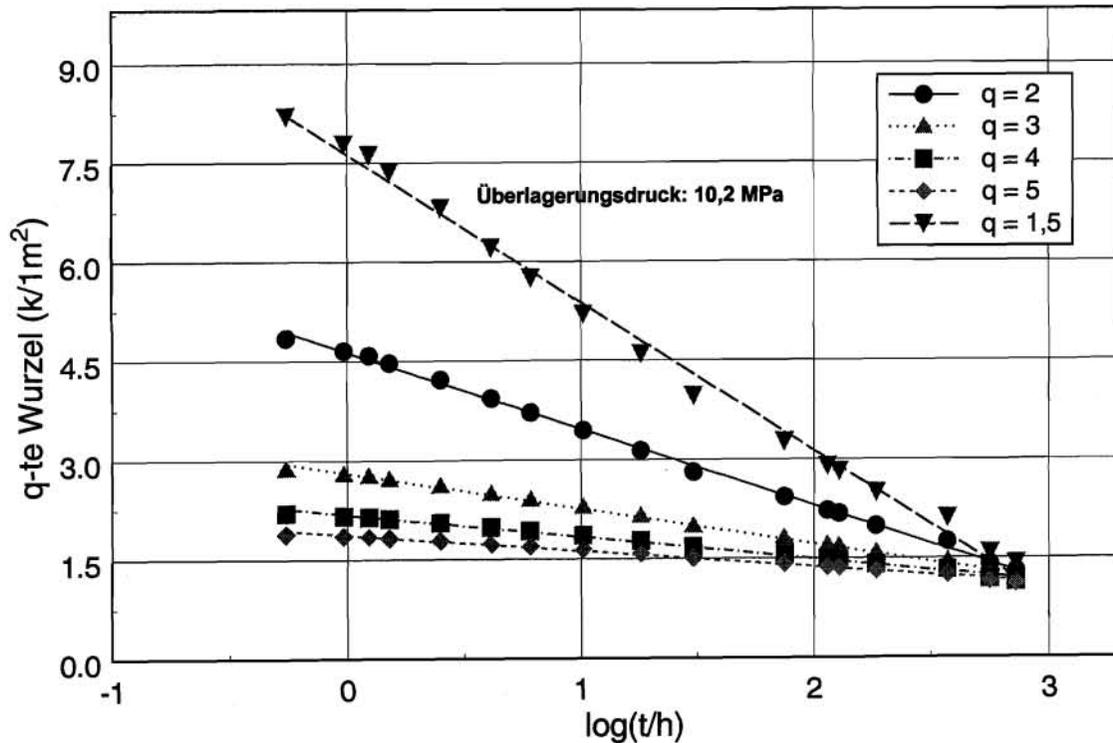
##### 4.4.1 Überprüfung des Dilatanzmodells

Zur Prüfung des Dilatanzmodells, das durch Gleichung (22) repräsentiert wird, werden die Meßdaten von Förster aus Kapitel 4.3.1 für mehrere  $q$ -Werte im Bereich zwischen 1,5 und 5 in Abb. 4-9 als  $q$ -te Wurzeln der Permeabilität über  $\log(t)$  gemeinsam mit den jeweiligen Regressionsgeraden aufgetragen. In dieser Darstellung ergeben sich insbesondere für  $2 < q < 4$  lineare Verläufe der Meßwerte.

**Tab. 4-1** Regressionsparameter für die zeitabhängige Permeabilität von Steinsalz nach Förster [ 13 ] und extrapolierte Schließzeit  $t(-21)$

$q$ [-]	$r$ [-]	$t(-21)$ [a]	$k(t_0)$ [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]	$s$ [-]
1,5	0,99753	0,283	2,103	-0,2945
2,0	0,99915	1,062	2,146	-0,2514
2,08	0,99917	1,317	2,151	-0,2456
2,5	0,99883	3,926	2,178	-0,2188
3,0	0,99802	13,78	2,204	-0,1935
4,0	0,99628	137,1	2,241	-0,1569
5,0	0,99482	991,4	2,266	-0,1319

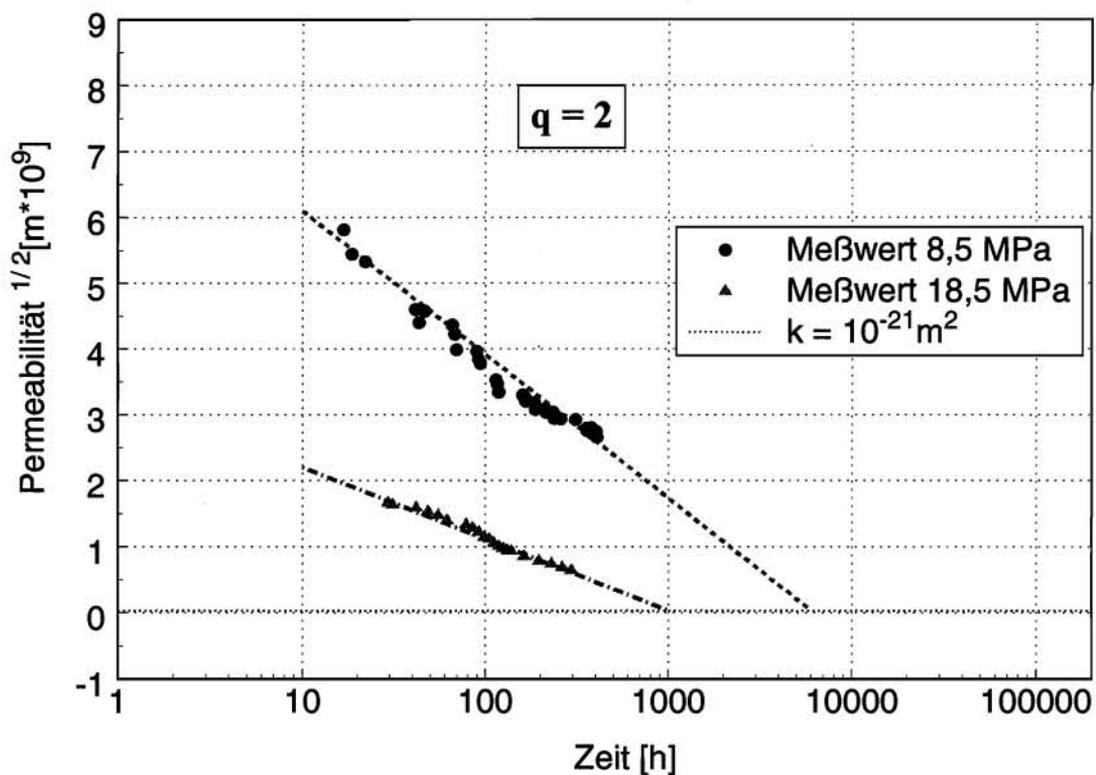
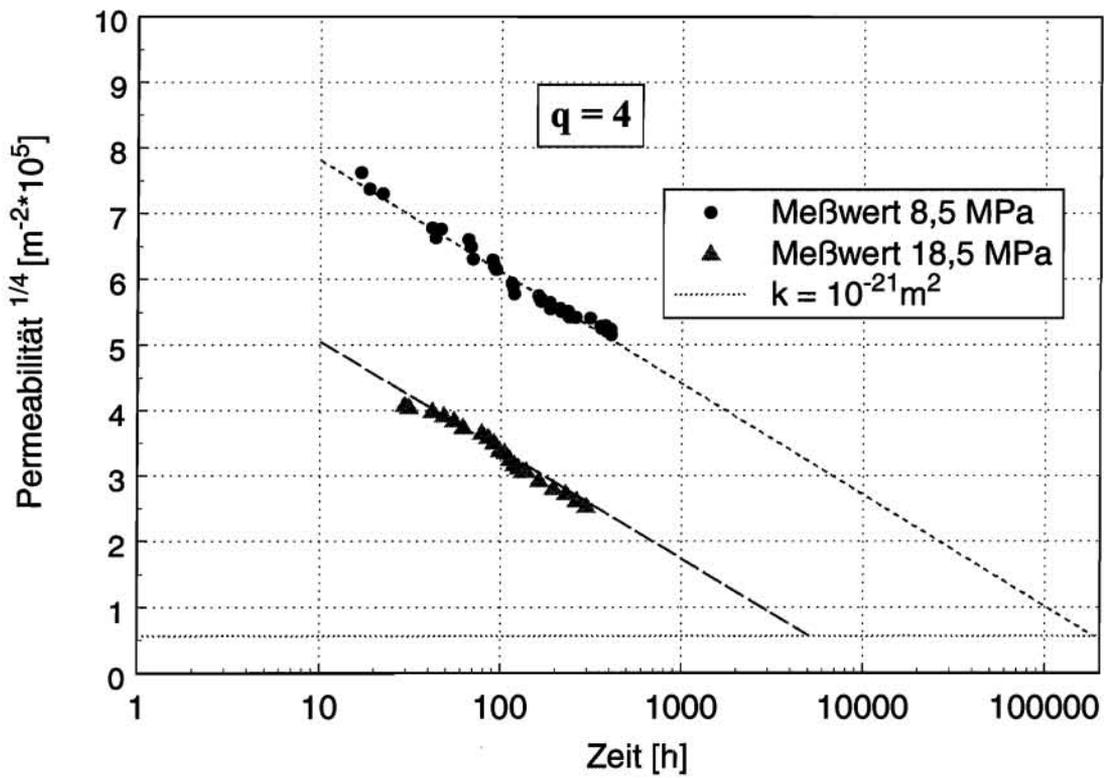
Die Korrelationskoeffizienten  $r$  zwischen den Meßdaten und den Fitwerten sind sehr hoch und liegen, wie aus Tab. 4-1 hervorgeht, für alle  $q$ -Werte über 99,4%. Das Maximum von  $r$  beträgt 99,92% bei  $q = 2,08$ . Die Größe  $t(-21)$  ist die extrapolierte Zeit, nach der die Permeabilität des natürlichen Steinsalzes von  $10^{-21} \text{ m}^2$  wieder erreicht ist und wird im folgenden als „Schließzeit“ bezeichnet. Der große Unterschied dieser Werte, der für  $q = 2$  und  $q = 4$  mehr als zwei Größenordnungen beträgt, ist eine Folge der logarithmischen Zeitabhängigkeit in (22).



**Abb. 4-9** Zeitabhängige Permeabilitäten nach Messungen von Förster mit Linearisierung nach Gl. (22) für verschiedene Werte des Parameters

Die Werte für  $k_0$ , d.h. die Permeabilität zum Zeitpunkt  $t_0 = 1$  h, sind nur schwach von  $q$  abhängig, weil dieser Zeitraum gut durch Meßdaten abgesichert ist. Die Abhängigkeit der Steigung  $s$  der Approximationsgeraden ist dagegen viel ausgeprägter. Mit entsprechenden Regressionsanalysen wurde auch das Dilatanzmodell an die beiden in Kapitel 4.3.2 dargestellten Meßreihen von Peach zur Druck- und Zeitabhängigkeit der Permeabilität gegenüber Lauge angepaßt. Weil diese Meßreihen für zwei deutlich unterschiedliche Drücken ermittelt wurden, besteht die Möglichkeit, eine Aussage über die Spannungsabhängigkeit der zeitabhängigen Permeabilitätsentwicklung abzuleiten.

Die Ergebnisse der Analyse für diese Meßreihen sind in Tab. 4-2 für  $P = 8,5$  MPa und 18,5 MPa und  $q$ -Werten im Bereich zwischen 1,5 und 7 zusammengefaßt. Dabei wurden die unkorrigierten Meßzeiten aus Abb. 4-3 zugrunde gelegt. Allerdings blieben bei der 8,5-MPa-Meßreihe der erste Meßwert und bei der 18,5-MPa-Meßreihe die ersten fünf Meßwerte unberücksichtigt, die von dem Kurvenverlauf durch die übrigen Meßpunkte abweichen und möglicherweise durch Kurzzeiteffekte verursacht wurden, die für die Fragestellungen dieser Arbeit belanglos sind.



**Abb. 4-10** Anpassung der zeitabhängigen Permeabilitätsänderungen von aufgelockertem Steinsalz nach den Messungen von Peach [ 31 ] bei Durchströmung mit Lauge an Gl. (22) mit  $q = 4$  (oberes Bild) und  $q = 2$  (unteres Bild)

**Tab. 4-2** Zeitabhängige Permeabilitätsabnahme von Steinsalz bei 8,5 und 18,5 MPa Überlagerungsdruck nach [ 32 ]. Regression der Meßdaten für Lauge an (22) für  $t_0 = 1$  h und verschiedene Werte des Parameters  $q$ .  $t(-21)$  ist die extrapolierte Zeit bis zur Abnahme der Permeabilität auf  $10^{-21}$  m<sup>2</sup>

$q$ [ - ]	$r$ [ - ]	$t(-21)$ [a]	$k(t_0)$ [10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ]	$s$ [ - ]	$r$ [ - ]	$t(-21)$ [a]	$k(t_0)$ [10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup> ]	$s$ [ - ]
$t$	$P = 8,5$ MPa				$P = 18,5$ MPa			
1,5	0,97945	0,253	5,787	-0,2987	0,99002	0,068	0,897	-0,3599
2,0	0,98453	0,689	6,486	-0,2635	0,98473	0,115	1,119	-0,3299
3,0	0,98841	4,408	7,528	-0,2129	0,98793	0,285	1,530	-0,2825
4,0	0,98988	21,40	8,263	-0,1785	0,98643	0,580	1,889	-0,2468
5,0	0,99603	79,40	8,809	-0,1536	0,98532	1,010	2,200	-0,2191
6,0	0,99106	235,2	9,229	-0,1348	0,98449	1,564	2,240	-0,1969
7,0	0,99134	381,7	9,562	-0,1201	0,98386	2,260	2,705	-0,1789

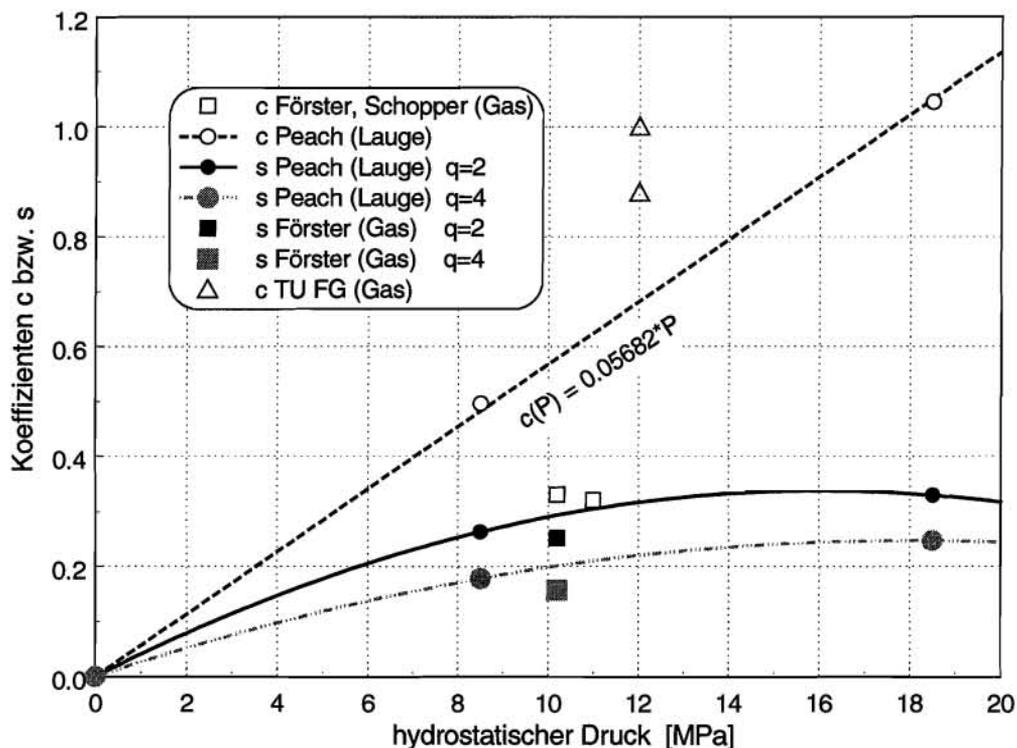
Für den Überlagerungsdruck von 8,5 MPa ergeben sich nach dem Dilatanzmodell mit Gl. (22) die in Tab. 4-2 und Abb. 4-10 wiedergegebenen extrapolierten Schließzeiten, die sehr stark mit dem Parameter  $q$  anwachsen. Das entspricht dem Ergebnis in Tab. 4-1 für die Messungen von Förster, die bei  $P = 10,2$  MPa mit Luft erfolgten. Für die Messung mit  $P = 18,5$  MPa steigt  $t(-21)$  dagegen weitaus schwächer mit  $q$  an.

#### 4.4.2 Überprüfung der Anwendbarkeit des Potenzgesetzes

Die Meßdaten in den Abb. 4-2, Abb. 4-3 und Abb. 4-6 mit Meßzeiten von mehr als 100 h können gut durch das Potenzgesetz (23) approximiert werden. Darüber lassen sich die Bestwerte des Zeitexponenten  $c$  für die jeweiligen Bedingungen per Regression bestimmen. Die Bestwerte für  $c$  sind in Abb. 4-11 als leere Symbole in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck dargestellt. Die Verbindungsgerade durch die Zeitexponenten für die mit Lauge gemessenen Meßreihen von Peach verläuft praktisch durch den Koordinatenursprung. Diese Tatsache stützt die Annahme einer direkten Proportionalität zwischen dem Spannungsexponenten und dem Druck, da wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt ist,  $c(P = 0) = 0$  sein muß. Die in Abb. 4-11 eingezeichnete Regressionsgerade (25) wurde daher ohne konstanten Term angesetzt und enthält nur einen Parameter.

$$c(P) = 0,05862 \text{ MPa}^{-1} \cdot P \quad (25)$$

Die entsprechenden  $c$ -Werte aus den Messungen von Förster und Schopper mit gasförmigem Testfluid liegen unterhalb der Trendlinie für die Messungen mit Lauge. Das entspricht der Beobachtung, daß die relative Permeabilitätsabnahme bei Durchströmung mit Lauge schneller abläuft als mit Gasen. Dem entgegen stehen die beiden Ergebnisse der TU Freiberg, nach denen die Permeabilitätsabnahme sogar schneller als in den Untersuchungen von Peach mit Lauge als Testfluid erfolgt. Eine für die Verhältnisse bei Durchströmung mit Lauge entsprechende Trendlinie für den druckabhängigen Zeitexponenten unter trockenen Bedingungen kann aus den Meßergebnissen wegen der großen Streuung und der Kleinheit des Druckintervalls, das nur im Bereich zwischen 10 und 12 MPa durch Messungen abgedeckt ist, nicht abgeleitet werden.



**Abb. 4-11** Steigung  $s$  im Dilatanzmodell (22) für zwei Werte des Parameters  $q$  (gefüllte Symbole) und Zeitexponenten  $c$  im empirischen Modell (23) (leere Symbole) in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck

#### 4.4.3 Bewertung und Vergleich von Dilatanzmodell und Potenzgesetz

Die Analyse der Meßreihe von Förster, deren Ergebnisse in der Tab. 4-1 zusammengefaßt sind, hat gezeigt, daß diese durch das Dilatanzmodell nach Gl. (22) hinreichend beschrieben werden kann. Da die Meßreihe aber nur einen einmonatigen Zeitraum,

eine Spannung und eine Gesteinsprobe repräsentiert, darf dieses Ergebnis nicht verallgemeinert werden. Der Meßzeitraum ist für die Bestimmung eines eindeutigen  $q$ -Wertes zu kurz, da alle Anpassungen für  $q$ -Werte im Bereich zwischen  $1,5 < q < 5$  nach Maßgabe des Korrelationskoeffizienten  $r$  praktisch gleich gut sind. Für die Darstellung der Meßwerte im untersuchten Zeitbereich ist die Unbestimmtheit von  $q$  zwar belanglos, wenn man aber das Dilatanzmodell (22) für Prognosen heranzieht, ergeben sich beträchtliche Unterschiede. Dieses zeigen die berechneten Schließzeiten in der Spalte „ $t(-21)$ “ in Tab. 4-1. Danach dauert es mit  $q = 2$  etwa 1 Jahr, bis wieder die Permeabilität des natürlichen Steinsalzes von  $10^{-21} \text{ m}^2$  erreicht wird und mit  $q = 4$  dagegen ca. 1000 Jahre.

Bei einer Extrapolation des Potenzgesetzes für dieselben Daten wird die Abweichung noch einmal wesentlich größer: die Permeabilität des 1-h-Wertes liegt mehr als 5 Größenordnungen über  $10^{-21} \text{ m}^2$ . Bei der Steigung der Approximationskurve von  $-0,33$  (vgl. Abb. 4-2) ergibt sich der völlig unrealistische Wert von ca.  $10^{16} \text{ h}$ . An diesem Beispiel wird besonders deutlich, welche großen Unterschiede die verschiedenen Modelle bei Extrapolationen auf lange Zeiträume ergeben können.

Die Meßergebnisse aus der Untersuchung von Peach mit Lauge lassen sich relativ gut mit dem Dilatanzmodell nach Gl. (22) erklären, wie die Ergebnisse der Regression in Tab. 4-2 zeigen. Dagegen hat die entsprechende Analyse der mit Argon gefundenen Ergebnisse an der hochaufgelockerten Probe mit  $k > 10^{-16} \text{ m}^2$  kein verwertbares Ergebnis erbracht. Es ergeben sich unrealistisch lange Schließzeiten von  $10^7 \text{ a}$  und länger. Das Modell ist folglich für die Beschreibung der zeitlichen Permeabilitätsänderung künstlich aufgelockerter Proben mit Anfangspermeabilitäten unterhalb  $10^{-16} \text{ m}^2$  ungeeignet. Für die Anwendbarkeit des Dilatanzmodells zur Beschreibung der zeitabhängigen Permeabilitätsänderungen bei der hier untersuchten Probe besteht offenbar bei der Anfangspermeabilität eine Obergrenze, die zwischen  $3 \cdot 10^{-17}$  und  $1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  liegt. Dem entspricht auch die Tatsache, daß die Anfangspermeabilität der Probe in der Meßreihe von Förster, deren Abnahme durch das Dilatanzmodell sehr gut beschrieben wird, etwa  $3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  beträgt.

In Abb. 4-11 sind auch die Koeffizienten  $s$  aus Tab. 4-2 für den zeitabhängigen Term im Dilatanzmodell nach Gl. (22) mit  $q = 2$  und  $q = 4$  für die beiden Lauge-Meßreihen von Peach in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck dargestellt. Da eine Verbin-

dungsgerade in beiden Fällen nicht durch den Koordinatenursprung geht, muß dieser mit den Datenpunkten durch eine gekrümmte Verbindungslinie verbunden werden, die im einfachsten Fall eine Parabel ist. Nach dem in der Abbildung eingezeichneten Verlauf dieser Parabeln steigt die Geschwindigkeit, mit der die Dilatation und damit die Permeabilität des Materials abnehmen, unterhalb 14 MPa mit dem Druck an und nimmt dann wieder ab. Dieses unrealistische Verhalten zeigt, daß die vorhandenen Ergebnisse nicht ausreichen, um beurteilen zu können, wie weit das Dilatanzmodell die Verhältnisse realistisch beschreibt. Die ungenügende Absicherung des Kurvenverlaufs für den Formelparameter  $s$  in Abhängigkeit vom Druck ist neben der Schwierigkeit, einen repräsentativen Wert für den Parameter  $q$  zu ermitteln, ein weiterer Grund, daß das Dilatanzmodell im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen nicht verwendbar ist.

Die Beschreibung der zeitabhängigen Permeabilitätsabnahme in dem für Langzeitsicherheitsanalysen relevanten Druckbereich ist derzeit daher nur für den Fall der Durchströmung mit Lauge nach dem Potenzgesetz (23) in Verbindung mit dem druckabhängigen Exponenten nach Gl. (25) möglich. Die Analyse der Meßergebnisse hat gezeigt, daß die druckabhängigen Exponenten nach Gl. (25) nicht für gasförmige Fluide gelten und für diese keine zutreffende Relation wegen der unzureichenden Datenbasis abgeleitet werden kann.

Mit dem Porositätsexponenten von Salzgrus  $m = 4$  in (18) als Wert für  $q$  liefert Gl. (22) die in Tab. 4-2 bzw. im oberen Teil der Abb. 4-10 wiedergegebenen extrapolierten Schließzeiten von 21,4 a für  $P = 8,5$  MPa bzw. 0,58 a für  $P = 18,5$  MPa. Die Ausheilung der Auflockerungen bei einer Verdoppelung des hydrostatischen Drucks erfolgt demnach mit etwa vierzigfacher Geschwindigkeit. Diese ausgeprägte Spannungsabhängigkeit deutet darauf hin, daß Auflockerungsrisse durch Kriechprozesse geschlossen werden und dieser Vorgang eventuell mit dem Kriechgesetz für Steinsalz beschreibbar ist. Die Geschwindigkeit des sekundären Kriechens von Steinsalz wird für die hier vorliegenden Temperatur- und Spannungsbereiche durch (29) beschrieben. Danach ist die Kriechgeschwindigkeit von Steinsalz wegen der Proportionalität  $\dot{\epsilon} \propto \sigma^5$  extrem spannungsabhängig. Das Verhältnis der hydrostatischen Drücke in den Langzeitmessungen beträgt 2,17. Die 5. Potenz dieses Wertes beträgt ungefähr 50 und liegt damit in der beobachteten Größenordnung der Änderung der Schließzeiten.

Diese Übereinstimmung ist jedoch kein Nachweis für die Richtigkeit dieser Schlußfolgerungen und darf nicht überbewertet werden. Ein wesentlicher Einwand besteht darin,

daß die Spannungen in der Kontaktzone der Rißflanken auch bei konstantem hydrostatischem Druck abnehmen, wenn sich die Kontaktflächen durch die Kriechverformungen allmählich vergrößern. Wegen der extremen Spannungsabhängigkeit der Kriechverformungen müßte deren Geschwindigkeit auch bei konstantem hydrostatischem Druck mit der Zeit stark abnehmen.

Die Ergebnisse der Regressionsanalysen und besonders die auf zeitlichen Extrapolationen basierenden Vorhersagen sind, wie bereits die Analyse der Meßreihe von Förster gezeigt hat, in starkem Maße von den verwendeten Modellen abhängig. Dieses zeigt auch ein Vergleich mit den entsprechenden, von Peach in [ 32 ] mit einem anderen phänomenologischen Modell abgeleiteten Schließzeiten für die Durchströmung mit Lauge. Auf der Grundlage einer Regression von  $k$  nach  $\log(t)$  für die in Abb. 4-3 wiedergegebenen zeitkorrigierten  $k$ -Werte ergaben sich 303 a für die hydrostatische Spannung von 8,5 MPa und 16,6 a für 18,5 MPa. Im Vergleich zum Dilatanzmodell erfolgt die Ausheilung der Auflockerungszone insbesondere bei der hohen Spannung beträchtlich langsamer. Das Verhältnis der extrapolierten Schließzeiten beträgt hier etwa 18 und bestätigt damit aber ebenfalls die große Empfindlichkeit der Rißausheilung gegenüber der Spannung.

#### 4.5 Empfehlung einer Relation für zeitabhängige Permeabilitätsänderungen

Aus den Folgerungen im vorangegangenen Kapitel ergibt sich als vorläufige, noch ungenügend abgesicherte Empfehlung für die relative zeitabhängige Permeabilitätsänderung von aufgelockertem Steinsalz bei Durchströmung mit gesättigter Lauge die Gebrauchsformel

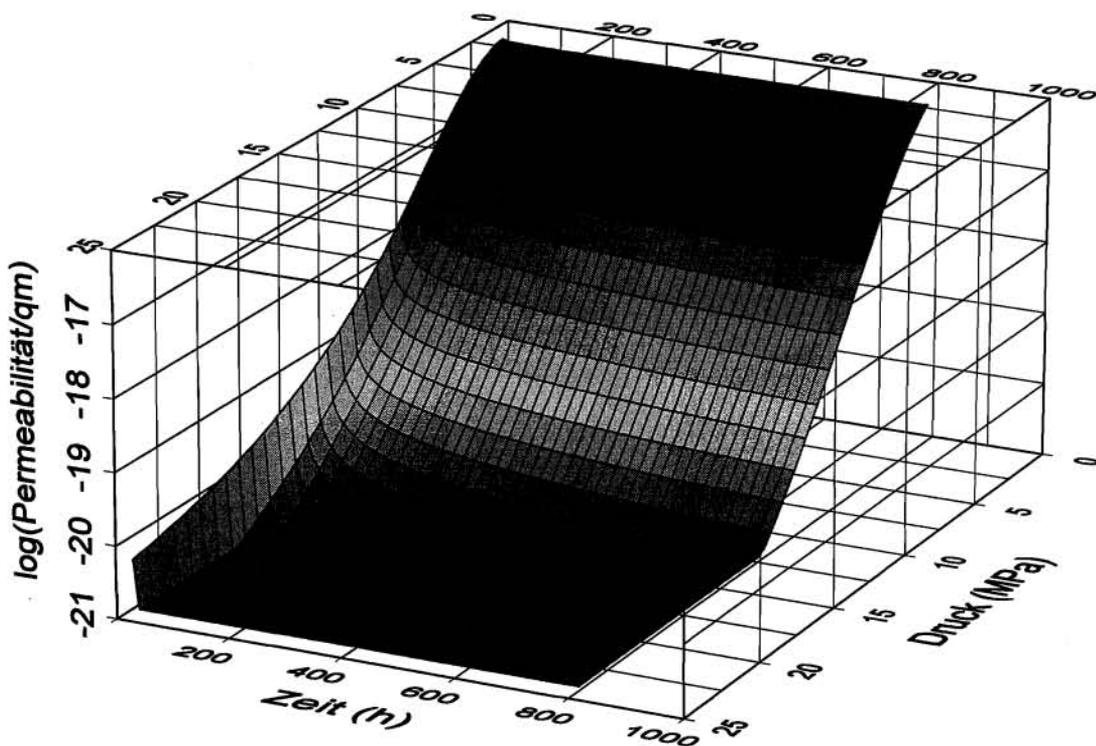
$$\frac{k(P,t)}{k(P,1h)} = \left( \frac{t}{1h} \right)^{-0,0568 \cdot P} \quad (26)$$

Für den Wert der Permeabilität nach einstündiger Druckeinwirkung  $k(P, 1h)$ , auf die obige relative Permeabilitätsänderungen bezogen sind, kann die bereits in Kapitel 3.3 abgeleitete Relation Gl. (17) herangezogen werden. Damit ergibt sich schließlich:

$$\log \left( \frac{k(P,t)}{1 \text{ m}^2} \right) = -21 + \frac{4,8}{1 + 0,01055 \cdot P^2} - 0,0586 \cdot P \cdot \log \left( \frac{t}{1h} \right), \quad (27)$$

wobei für die Einheiten  $[P] = \text{MPa}$  und  $[t] = \text{h}$  gilt. Ergänzend zu (27) kommt noch die Bedingung, daß die Permeabilität der Auflockerungszone nie kleiner als die des unverritzten Gesteins werden kann, d.h.  $k(P, t) > 10^{-21} \text{ m}^2$ .

Die Permeabilität in Abhängigkeit vom Druck und von der Zeit ist in Abb. 4-12 für den Bereich  $0 < t < 800 \text{ h}$  und  $0 < P < 25 \text{ MPa}$  wiedergegeben. Man erkennt, daß die Permeabilität bei dem Druck  $P = 0$  nicht abnimmt. Die linke Randlinie gibt die Druckabhängigkeit bei  $t = 1 \text{ h}$  wieder und entspricht damit im Verlauf den Diagrammen in Abb. 3-11 für die zeitunabhängige Permeabilitätsänderung.

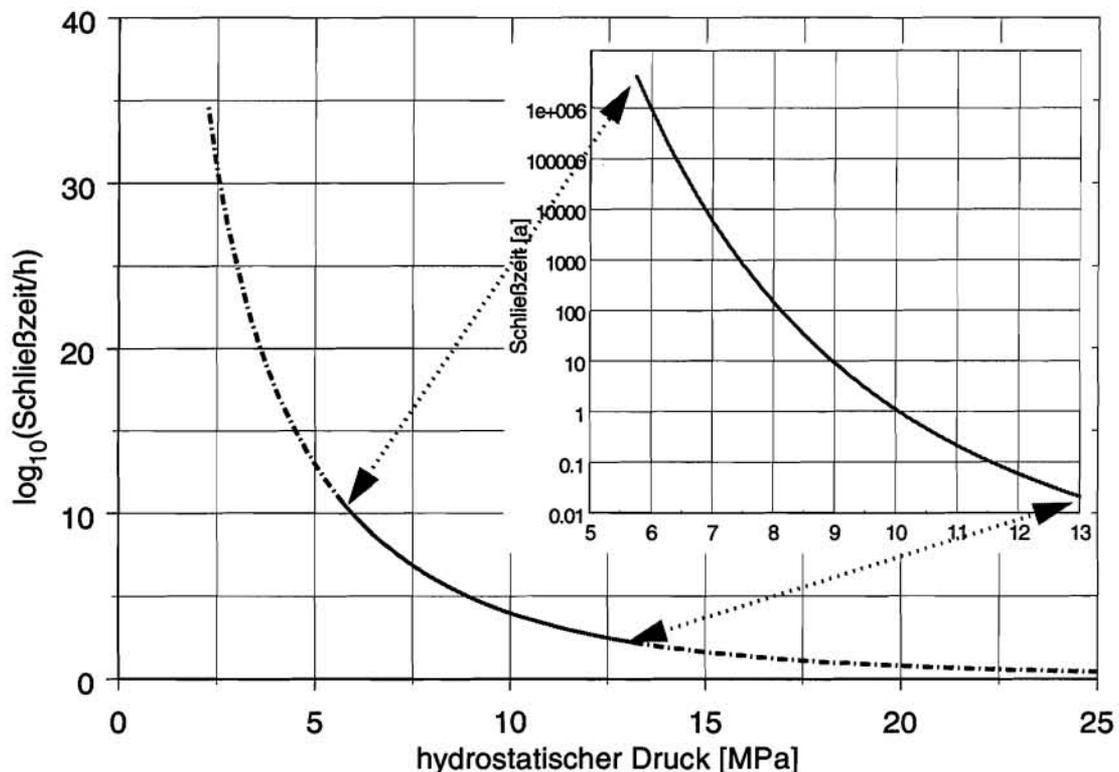


**Abb. 4-12** Druck- und zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz nach der empirischen Relation Gl. (27)

Anhand der hinteren Grenze der ebenen Teilfläche mit  $k(P, t) = 10^{-21} \text{ m}^2$  ist ablesbar, nach welcher Zeit die Permeabilität des unverritzten Gebirges bei konstantem hydrostatischem Druck wieder erreicht wird und die Auflockerung ausgeheilt ist. Für 12,5 MPa ergibt sich beispielsweise eine Dauer von 800 h. Bei hohen Drücken von mehr als 20 MPa ist die Ausheilung bereits nach wenigen Stunden abgeschlossen.

Der Zusammenhang zwischen der Schließzeit und dem Druck geht aus Abb. 4-13 deutlicher hervor. Diese Darstellung, in der entsprechend Gl. (27) der Logarithmus der

Schließzeit über dem Druck aufgetragen ist, zeigt die äußerst empfindliche, stark nicht-lineare Abhängigkeit der Rißausheilungsgeschwindigkeit vom hydrostatischen Druck, denn in dem Intervall  $2 \text{ MPa} < P < 25 \text{ MPa}$  ändert sich die Schließzeit um mehr als 30 Größenordnungen. Für höhere Drücke im Bereich  $P > 15 \text{ MPa}$  gilt näherungsweise  $\log(t) \propto P^3$ . Der vergrößerte Abschnitt der Kurve ist der für Anwendungsfälle relevante Druckbereich  $6 \text{ MPa} < P < 13 \text{ MPa}$ , der in dem Ausschnitt rechts oben in dem Diagramm mit in Jahren geteilter Zeitachse dargestellt ist.



**Abb. 4-13** Schließzeiten (Dauer der Abnahme der Permeabilität auf  $10^{-21} \text{ m}^2$ ) von aufgelockertem Steinsalz bei Durchströmung mit gesättigter Lauge in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck.

Daraus ist abzulesen, daß die Ausheilung bei 10 MPa etwa ein Jahr und bei 8 MPa bereits 100 Jahre erfordert. Bei nur geringfügig niedrigeren Drücken ist der Anstieg noch wesentlich steiler, so daß bei 7 MPa bereits die Dauer von 10.000 Jahren erreicht wird. Für die Praxis bedeutet dieses, daß bei hydrostatischen Drücken unter 7 MPa eine Reduktion der Permeabilität nur durch kurzzeitige Verformungen stattfindet und sich die Permeabilität anschließend nicht mehr nennenswert ändert. Oberhalb dieses Druckes findet eine weitere Permeabilitätsreduktion statt, deren Geschwindigkeit sehr stark mit dem Druck zunimmt, so daß oberhalb 10 MPa in Gegenwart von Lauge keine

Auflockerungszonen mehr existieren sollten. Es muß hierbei aber noch einmal darauf hingewiesen werden, daß diese Schlußfolgerungen auf der Annahme basieren, daß Gl.(26), wie in Abb. 4-11 dargestellt, in den Bereich niedrigerer Drücke extrapoliert werden kann. Da diese Beziehung nur durch zwei Meßwerte abgesichert ist, ist sie noch mit großer Unsicherheit behaftet.

Neben dieser Unsicherheit muß auch berücksichtigt werden, daß die Relation Gl.(27) ausschließlich aus Labordaten abgeleitet wurde. Insofern ist noch nicht gesichert, daß damit auch die Verhältnisse in situ richtig beschrieben werden. Diese Absicherung kann durch In-situ-Permeabilitätsmessungen in Auflockerungszonen in der in [42] beschriebenen Weis erfolgen, bei denen aber außerdem gleichzeitig die Spannungsverteilung im durchströmten Steinsalz zu messen wäre.

In die Permeabilitäts-Druckrelation Gl.(27) geht als Parameter der hydrostatische Gesteinsdruck ein. In den Rechnungen für Langzeitsicherheitsanalysen muß diese Größe daher zur Verfügung gestellt werden. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß der hydrostatische Spannungszustand erst nach dem Abbau der deviatorischen Spannungskomponenten erreicht wird. Die Dauer, nach der dieser Zustand im Endlager eintritt, ist empfindlich von den lokalen Verhältnissen abhängig, die die Plastizität des Gebirges bestimmen, wie Konvergenzrate, Temperatur oder Feuchtegehalt.

## **5 Temperaturabhängigkeit**

Die zeitunabhängige Abnahme der Permeabilität ist in erster Linie mit den elastischen Eigenschaften von Steinsalz verknüpft. Die zeitabhängige Abnahme wird dagegen von den plastischen Eigenschaften, d.h. der Kriechfähigkeit und der Kompaktierbarkeit, bestimmt. Die unterschiedlichen Effekte weisen jeweils unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten auf. Deswegen sind zur Beschreibung des Temperatureinflusses auf die Permeabilität separate Ansätze für die plastischen und elastischen Verformungen unter Druckeinwirkung nötig. Es ist aber auf jeden Fall zu erwarten, daß hohe Temperaturen die Verringerung der Permeabilität in den Auflockerungszonen begünstigen, weil die Plastizität des Salzes erhöht wird.

Der Temperaturaspekt ist zunächst für Endlager mit wärmeentwickelnden Abfällen von besonderer Bedeutung, in denen das Salz in den Auflockerungszonen lokal bis auf 200° C aufgeheizt werden kann. Mit dem Abklingen der Wärmeleistung des HLW geht die Aufheizung des Gebirges wieder zurück, und nach ca. 5 000 Jahren wird im Salinar die ursprüngliche Temperaturverteilung wieder erreicht. Dann hängt die Temperatur des Wirtsgesteins (wie bei Endlagern für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) vorrangig von der Tiefe der Einlagerungsformation ab. Da aber im Salzgestein die Gebirgskonvergenz und damit der Druckaufbau sehr stark tiefenabhängig ist, wird ein direkter Temperatureinfluß auf die Abnahme der Gebirgsauflockerung möglicherweise durch die unterschiedlichen Konvergenzgeschwindigkeiten überdeckt.

### **5.1 Zeitunabhängige Permeabilitätsänderungen**

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen und diskutierten Untersuchungen wurden sämtlich bei Raumtemperatur, also zwischen 20 und 25 °C durchgeführt. Die einzigen bisher bekannt gewordenen Meßergebnisse über die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz sind in der bereits mehrfach zitierten Arbeit von Borgmeier [ 4 ] zu finden. Sie belegen aber nur, daß der erwartete Temperatureinfluß zumindest bei Kurzzeitmessungen tatsächlich besteht; eine phänomenologische Relation zur Beschreibung dieses Einflusses kann aber aus diesen Daten nicht abgeleitet werden. Ebenso ist eine Überprüfung der obengenannten Modellvorstellungen mit diesen Meßergebnissen nicht möglich.

Untersucht wurden in [ 4 ] zwei natürliche Proben unter isostatischer Belastung bei einem Effektivdruck von 7,5 MPa. Diese Proben, die bei Raumtemperatur eine Permeabilität von ca.  $163 \cdot 10^{-18}$  bzw.  $7,4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  hatten, wurden auf 80 °C aufgeheizt und anschließend wieder abgekühlt. Dabei wurde die Permeabilität in Abständen von 5 - 10 K gemessen. Während der Aufheizung, über deren Geschwindigkeit keine Angaben gemacht werden, nahmen die Probenpermeabilitäten linear auf  $80 \cdot 10^{-18}$  bzw.  $2,3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  ab. Das bedeutet eine relative Änderung von ca. 1% der Anfangspermeabilität pro Kelvin. Borgmeier weist auf die Beobachtung hin, daß die Permeabilitätsänderungen ohne meßbare Änderungen der Probendichte abgelaufen sind.

Die Messungen bei der Wiederabsenkung der Temperatur zeigen, daß die während der Aufheizung aufgetretenen Permeabilitätsabnahmen größtenteils irreversibel sind, denn abschließend wurden bei Raumtemperatur mit  $102 \cdot 10^{-18}$  bzw.  $3,87 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  erheblich niedrigere Permeabilitäten als am Anfang gemessen. Dieses Verhalten ähnelt den Ergebnissen aus einigen Kurzzeit- und Langzeitversuchen (vgl. Abb. 4-4), in denen sich die Permeabilitätsänderungen nach einer Druckentlastung ebenfalls als weitgehend irreversibel erwiesen haben.

## **5.2 Zeitabhängige Permeabilitätsänderungen**

Wenn die zeitabhängige Abnahme der Auflockerung von Salzgestein unter Druckeinfluß und die damit einhergehende Permeabilitätsverringering auf Kriechprozesse zurückgeführt werden kann, ist zu erwarten, daß die Geschwindigkeit dieser Vorgänge ein ähnliches Temperaturverhalten wie das Kriechen von Steinsalz zeigt.

Ursache für das Kriechen von Steinsalz sind verschiedene physikalische Prozesse mit jeweils unterschiedlicher Temperatur- und Spannungsabhängigkeit. Daher bestehen die Kriechgesetze für Steinsalz aus mehreren Teilen, wie u.a. auch die u.a. in [ 27 ] und [ 28 ] angegebenen Relationen (28) für das primäre und (29) für das sekundäre Kriechen, die aus Meßdaten von Asse-Steinsalz abgeleitet wurden. In diesen Relationen ergibt sich die Kriechgeschwindigkeit als Produkt von Funktionen der einzelnen Einflußgrößen Temperatur  $T$ , Spannung  $\sigma$  und Zeit  $t$ . Die Temperaturabhängigkeit wird in beiden Fällen mit einem Arrhenius-Term beschrieben, deren Aktivierungsenergien sich nur wenig unterscheiden. Nach Gl. (28) beträgt die Zeitkonstante für das primäre

Kriechen  $0,35 \text{ d}^{-1}$ , so daß dieser Effekt in der Anfangsphase der als Langzeitversuche bezeichneten Messungen einen merklichen Einfluß gehabt haben kann.

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{cr,1} &= c_1 \cdot f(\sigma) \cdot h(T) \cdot u(t) \\ &= 0,21 \text{ MPa}^{-5} \cdot 0,35 \text{ d}^{-1} \cdot \sigma^5 \cdot \exp\left(-\left(0,35 \text{ d}^{-1} \cdot t + \frac{44,8 \text{ kJ mol}^{-1}}{R \cdot T}\right)\right)\end{aligned}\quad (28),$$

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_{cr,2}(\sigma, T) &= c_2 \cdot f(\sigma) \cdot g(T) \\ &= 0,18 \text{ MPa}^{-5} \text{ d}^{-1} \cdot \sigma^5 \cdot \exp\left(\frac{-54 \text{ kJ mol}^{-1}}{R \cdot T}\right)\end{aligned}\quad (29).$$

Die Gesamtkriechgeschwindigkeit läßt sich daher schreiben als

$$\dot{\epsilon}_{cr} = \dot{\epsilon}_{cr,1} + \dot{\epsilon}_{cr,2} = (c_1 \cdot h(T) \cdot u(t) + c_2 \cdot g(T)) \cdot f(\sigma) \quad (30).$$

Im Gültigkeitsbereich der Gl. (30), d.h. für  $T < 673 \text{ K}$  und  $\sigma < 20 \text{ MPa}$ , besteht somit für alle Temperaturen dieselbe Spannungsabhängigkeit der Form  $f(\sigma) = \sigma^5$ . Wenn rauhe, sich berührende Rißflächen aufeinander gedrückt werden, entsteht in den Kontaktbereichen eine entsprechend inhomogene mikroskopische Spannungsverteilung. Weil die Geschwindigkeiten der dadurch in den Kontaktbereichen hervorgerufenen Kriechverformungen eine einheitliche Temperaturabhängigkeit haben, hat der integrale Vorgang der Rißausheilung unter dem Einfluß der Spannung dieselbe Temperaturabhängigkeit. Eine Temperaturerhöhung hat somit die Wirkung eines Zeitraffers, d.h. das Schließen der Risse läuft bei unterschiedlichen Temperaturen nur in unterschiedlichen Zeiten, sonst aber völlig gleich ab. Wenn der zeitliche Verlauf der Permeabilität bei einer Referenztemperatur, wie beispielsweise der Raumtemperatur,  $k(T_{ref}, t_{ref})$  bekannt ist, kann er auch für beliebige Temperaturen  $T$  angegeben werden, wobei nur die Zeit entsprechend angepaßt werden muß. Dieses wird durch die Gleichungen. (31) und (32) beschrieben

$$k(P, T, t) = k(P, T_{ref}, t_{ref}) \quad (31),$$

wobei

$$t = t_{ref} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (32).$$

Als Aktivierungsenergie  $Q$  kommt je nach Dauer der Messung entweder die Aktivierungsenergie für das primäre oder das sekundäre Kriechen bzw. ein Mittelwert im Bereich von 50 kJ/mol in Frage. Hieraus ergibt sich auch, daß die erforderliche Meßzeit für die Bestimmungen der zeitabhängigen Permeabilität erheblich verringert werden könnte, wenn diese bei höheren Temperaturen durchgeführt werden. Mit den obengenannten Werten für die Aktivierungsenergie ergibt sich, daß sich die Geschwindigkeit der Rißausheilung und damit der Permeabilitätsänderung bei einer Temperaturerhöhung um 10 K fast verdoppelt.

Dagegen zeigen Messungen der plastischen Volumenänderung aufgelockerter Steinsalzproben bei verschiedenen Temperaturen eine vergleichsweise erheblich geringere Temperaturabhängigkeit [ 5 ], [ 6 ]. Hierbei wurden Steinsalzproben aus der WIPP-Site durch eine axiale Stauchung um 1,5% künstlich aufgelockert und anschließend die Verdichtung  $\varepsilon_v$  bei 15 MPa unter hydrostatischen Bedingungen gemessen. Die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit für die Rißausheilung kann mit einem Arrhenius-Term mit einer Aktivierungsenergie von 10,5 kJ/mol beschrieben werden. Möglicherweise wurden die Proben durch die Aufheizung getrocknet, wodurch deren Kriechfähigkeit verringert wird.

## 6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, aus den Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen ein Modell zu erstellen, mit dem in Endlager-Sicherheitsanalysen die zeitliche Entwicklung der Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz unter Druckeinfluß quantitativ beschrieben werden kann. Wegen der grundsätzlichen Schwierigkeit, daß die Vorhersagezeiträume ein Vielfaches der Dauer von experimentellen Untersuchungen betragen können, wurde angestrebt, daß dieses Modell neben der Wiedergabe der experimentellen Ergebnisse auch zeitliche Extrapolationen gestattet.

Die Sichtung der verfügbaren Ergebnisse aus Laborexperimenten hat gezeigt, daß die Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz als instantane Reaktion auf einen hydrostatischen Druck um mehrere Größenordnungen reduziert werden kann. Wenn der hydrostatische Druck aufrecht erhalten bleibt, nimmt die Permeabilität einzelner Proben stetig weiter ab, bis wieder die Dichtigkeit von unverritztem Salzgestein erreicht wird. Dementsprechend wurde die Analyse der Meßdaten in zwei Stufen durchgeführt, und zwar zunächst im Hinblick auf die zeitunabhängige und danach auf die zeitabhängige Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß. Ergebnisse aus In-situ-Messungen konnten nicht in diese Auswertung einbezogen werden, da in den bisher durchgeführten Untersuchungen nur die Ausdehnung und die Permeabilität in den Auflockerungszonen ermittelt, aber keine Druckabhängigkeiten gemessen wurden.

Als theoretisches Modell zur Beschreibung der zeitunabhängigen Permeabilitätsänderungen wurde zunächst das sogenannte „Cubic Law“ herangezogen, dessen Eignung für die Beschreibung der druckabhängigen Permeabilität durch verschiedene Untersuchungen für Festgesteine seit längerem belegt ist. Die hier durchgeführten Anpassungen haben ergeben, daß sich die Meßwerte für getrocknete Steinsalzproben durch dieses Modell meistens zufriedenstellend beschreiben lassen. Dagegen zeigte eine Meßreihe für ungetrocknete Proben mit natürlichem Feuchtegehalt ein abweichendes Verhalten, was die grundsätzliche Eignung des cubic law für die Anwendung in Langzeitsicherheitsanalysen in Frage stellt. Da sich außerdem herausstellte, daß die relevanten Modellparameter aus dem verfügbaren Datenmaterial nicht mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmbar waren, wurde eine phänomenologische Beziehung abgeleitet, die durch die Gl. (17) auf Seite 34 wiedergegeben wird.

Da die Restfeuchten, die mit der Ausheizung der Proben erreicht werden, wesentlich geringer als die von natürlichem Salzgestein sind und ein Feuchteausgleich mit den Grubenwettern nur in stoßnahen Bereichen möglich ist, können diese nicht als repräsentativ für die Verhältnisse in der Auflockerungszone angesehen werden. Daher wurden bei der Ableitung dieser Beziehung nur die Meßreihen verwendet, bei denen die Feuchtigkeit der Proben vor der Messung nicht beeinflußt wurde. Die Relation für die quantitative Beschreibung der zeitunabhängigen Permeabilitäts-Druckbeziehung wurde aus diesen Meßdaten über eine nichtlineare Regression gewonnen.

Der Umfang der Messungen, in denen die weitere zeitabhängige Permeabilitätsabnahme unter Druckeinfluß ermittelt wurde, ist im Vergleich zu den Kurzzeitmessungen gering. Ein Teil dieser Meßergebnisse konnte ebenfalls wegen ungeeigneter Randbedingungen nicht für die Beschreibung der Verhältnisse in einem Endlager berücksichtigt werden. Die vorliegenden Resultate belegen aber sehr klar, daß die Feuchtigkeit des Salzes bzw. des Testfluids die Geschwindigkeit, mit der die Auflockerungen unter Druck wieder verschwinden, ebenfalls entscheidend beeinflussen. Getrocknete Proben zeigen bei Durchströmung mit trockenen Gasen innerhalb von 100 bis 1 000 Stunden noch keine meßbaren Permeabilitätsänderungen. Bei ungetrockneten Proben ist bereits mit Raumluft ein merklicher Rückgang der Permeabilität zu verzeichnen, und mit wasserdampfgesättigtem Testfluid verschwinden die Auflockerung und damit die Permeabilität innerhalb kürzester Zeit.

Für die Beschreibung der zeitabhängigen Permeabilitätsänderung wurde zunächst geprüft, ob hierfür die Änderung der Dilatation in den Proben ein geeigneter Parameter ist, der insbesondere auch zeitliche Extrapolationen über die durch Messungen abgedeckten Zeiten gestattet. Dieser Ansatz basierte einerseits auf einigen experimentellen Ergebnissen an aufgelockertem Steinsalz und andererseits auf der Analogie zu komprimiertem Salzgrus, dessen Permeabilität eine Funktion der Porosität ist. Die Anpassung der Meßwerte an das Modell war in den meisten Fällen gut möglich. Es stellte sich aber heraus, daß die zeitliche Extrapolierbarkeit der Meßwerte über dieses Modell für die Anforderungen in Langzeitsicherheitsanalysen nicht ausreicht, da ein anzupassender Parameter wegen der relativ kurzen Meßdauer nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden konnte. Innerhalb der Schwankungsbreite der möglichen Werte dieses Parameters ändert sich die extrapolierte Zeit bis zum Erreichen der Permeabilität von unverritztem Salzgestein um ca. 3 Größenordnungen.

Ein daraufhin durchgeführter alternativer Versuch der quantitativen Beschreibung der zeitabhängigen Permeabilitätsabnahme mit einem empirischen Ansatz ist nur für den Fall der Durchströmung mit Lauge gelungen. Daraus resultiert die Beziehung für die druck- und zeitabhängige Permeabilitätsänderung nach Gl. (27) auf Seite 59. Diese Relation beinhaltet eine außerordentlich starke Druckabhängigkeit der Änderungsgeschwindigkeit der Permeabilität für Lauge, die in der Abb. 4-13 auf Seite 61 dargestellt wird. Die Datenbasis, auf der diese Relation beruht, ist jedoch nur sehr klein und bedarf zur Absicherung ihrer Inter- bzw. Extrapolierbarkeit in Anwendungen noch ergänzender Messungen mit systematischer Druckvariation. Wegen des großen, bisher nur qualitativ bekannten Einflusses der Feuchte sind außerdem Untersuchungen notwendig, bei denen insbesondere die Feuchtigkeitsverhältnisse sowohl bei den Proben als auch bei den Meßfluiden den Bedingungen bei den unterstellten Szenarien in der Nachbetriebsphase eines Endlagers entsprechen müssen.

Zur weiteren Absicherung der Anwendbarkeit dieser empirischen Relation muß außerdem noch überprüft werden, ob die hier ausschließlich aus Laborergebnissen abgeleitete Relation die Verhältnisse in situ richtig wiedergibt bzw. hinreichend korrekt vorher sagt. Hierfür sind In-situ-Permeabilitätsmessungen in aufgelockertem Steinsalz mit zusätzlicher Messung der lokalen Spannungen geeignet.

Über die Temperaturabhängigkeit der zeitabhängigen Permeabilitätsabnahme liegen überhaupt noch keine experimentellen Daten vor. Es wird vorgeschlagen, die temperaturbedingte Beschleunigung dieses Vorgangs erforderlichenfalls mit derselben Temperaturabhängigkeit wie für das primäre bzw. sekundäre Kriechen zu beschreiben, solange hierzu noch keine experimentellen Untersuchungen durchgeführt worden sind.



## 7 Literatur

- [ 1 ] Billiotte, C.; Le Guen, M.; Deveughele, M.; Brulhet, J.: On Laboratory Measurements of Porosity and Permeability of Salt Rocks (Bressian Basin-France) In: The Mechanical Behaviour of Salt. Proceedings of the Third Conference. Clausthal-Zellerfeld (1996)
- [ 2 ] Bleich, W.; Diekmann, N.; Liedke, L.; Schnier, H.; Venzlaff, H.: Standsicherheitskriterien für das Endlagerbergwerk Gorleben. Projekt Sicherheitsstudien und Entsorgung, Fachband 11, Berlin (1985)
- [ 3 ] Borns, David J.; Stormont, John C.: An Interim Report on Excavation Effect Studies at the Waste isolation Plant: The Delineation of the Disturbed Rock Zone. SAND87-1375 UC-70. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA (1988)
- [ 4 ] Borgmeier, M.: Untersuchungen zum belastungsabhängigen Durchlässigkeitsverhalten von Salzgestein für Gase unter besonderer Berücksichtigung der Porenraumbeladung, Dissertation, TU Clausthal (1992)
- [ 5 ] Brodsky, N.S.: Crack Closure and Healing Studies in WIPP Salt Compressional Wave Velocity and Attenuation Measurements: Test Methods and Results. SAND90-7076, Albuquerque, N.M. USA. (1990)
- [ 6 ] Brodsky, N.S.; Munson, D.E.: Thermomechanical Damage Recovery Parameters for Rock Salt from the Waste Isolation Pilot Plant. Proc. First North American Rock Mechanics Symposium, Univ. of Texas, Austin, Tx. June 1994 pp.731-738. SAND93-2067C. WPO 27175 (1993)
- [ 7 ] Carman, P.C.: Flow of Gases Through Porous Media. Butterworth, London, 1956
- [ 8 ] Cosenza, P.: Perméabilité et processus de transfert de masse en sel gemme. Rapport Final. EUR 17636 Luxembourg, (1997)
- [ 9 ] Dale, T.; Hurtado, L.D.: WIPP Air-Intake Shaft Disturbed-Rock Zone Study. SAND96-1327C. Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M. (1996)
- [ 10 ] Fein, E.; Müller-Lyda, I.; Storck, R.: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien. Köln. GRS-132 (November 1996)

- [ 11 ] Fröhlich, H.; Hohentanner, C.R.; Drees, W.; Förster, S.; von der Bruck, J.; Wagner, S.: Bestimmung des Diffusions- und Permeabilitätsverhaltens von Wasserstoff in Steinsalz und kompaktiertem Salzgrus. Abschlußbericht zu den BMBF-Vorhaben FKZ 02E8492/3 und 02E8462/9. Eschborn (1995)
- [ 12 ] Fröhlich, H.; Conen, O.: Durchlässigkeitsverhalten von Steinsalz gegenüber Laugen unter Berücksichtigung von Lösungsvorgängen. 49. Berg- und Hüttenmännischer Tag, 18.-19. Juni 1998, Freiberg. Tagungsband der TU Bergakademie Freiberg, (Wagner, S. ed.) Freiberg 1998
- [ 13 ] Förster, S.: Durchlässigkeits- und Rißbildungsuntersuchungen zum Nachweis der Dichtheit von Salzkavernen, Neue Bergbautechnik, 4. Jahrg., Heft 4, April 1974
- [ 14 ] Gies, H. et al.: Material Inventory and Petrophysics of the Rock Salt in the HAW-Field (Asse, 800 m Level). GSF-Bericht 16-94E. Neuherberg (1995)
- [ 15 ] F.E. Gloyna, T.D. Reynolds: Permeability Measurements of Rock Salt, Journal of Geophysical Research 6 (11), 3912-3921, 1961
- [ 16 ] U. Heemann: Transientes Kriechen und Kriechbruch im Steinsalz, Dissertation, Univ. Hannover, November 1989
- [ 17 ] Hirsekorn, R.-P.; Boese, B.; Buhmann, D.: LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. GRS-157, Köln, 1999
- [ 18 ] Holcomb, D.L.; Hannum, D.W.: Consolidation of Crushed Salt Backfill under Conditions Appropriate to the WIPP Facility. SAND 82-0630, Sandia National Laboratories, Albuquerque NM, USA, 1982
- [ 19 ] Hunsche, U.; Schulze, O.: Effect of Humidity and Confining Pressure on Creep of Rock Salt. In: The Mechanical Behaviour of Salt. Proceedings of the Third Conference. Trans Tech Publications Clausthal-Zellerfeld (1996)
- [ 20 ] Jockwer, N., Rothfuchs, T.: Investigation and Modelling of Fluid Releases from Rock Salt at elevated Temperature. In. Proc. Workshop on testing and modelling of thermal, mechanical and hydrogeological properties of host rocks for deep geological disposal of radioactive waste. Brussels, 12.-13. 01.1995 EUR 16219
- [ 21 ] Kazan, Y.; Ghoreychi, M.: Essais In Situ CPSS . Étude thermomécanique du champ proche d'un puits de stockage de déchets radioactifs dans le sel. Rapport Final. EUR 16946. Luxembourg (1996)

- [ 22 ] Klinkenberg, L.J.: The Permeability of Porous Media to Liquids and Gases. Drilling and Production Practice, pp.200-213 (1941)
- [ 23 ] Kohlrausch, F.: Praktische Physik. Bd. 3, Tabellen und Diagramme. 23. Aufl. Stuttgart: Teubner (1986)
- [ 24 ] C.-S. Lai: Fluid Flow through Rock Salt under Various Stress States, Michigan State University, Ph.D., (1971).
- [ 25 ] Le Cleac'h, H.; Ghazali, M.; Deveughele, M.; Brulhet, J.: Experimental Study of the Role of Humidity on the Thermomechanical Behaviour of Various Halitic Rocks. In: The mechanical Behaviour of Salt. Proceedings of the Third Conference. Clausthal-Zellerfeld (1996)
- [ 27 ] Lux, K.H.: Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau. Enke Stuttgart (1984)
- [ 28 ] Lux, K.H.; Wallner, M.: Thermomechanisches Stoffverhalten von Salzgestein. In: Hohlrumbaue im Salzgebirge. Verlag Glückauf, Essen (1986)
- [ 28 ] MathSoft Inc.: Mathcad Benutzerhandbuch. Mathcad Plus 6.0. Erste Auflage Juni 1995, Cambridge, Mass. USA
- [ 29 ] Mieke, R.; Harborth, B.; Klarr, K.; Ostrowski, L.: Permeabilitätsbestimmungen im Staßfurt-Steinsalz in Abhängigkeit von einer Streckenauffahrung. Kali und Steinsalz Bd. 11 Heft 5/6 (1993)
- [ 30 ] Muskat, M.: Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media, McGraw Hill, (1937)
- [ 31 ] Müller-Lyda, I., Birtler, H., Fein, E.: Ableitung von permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. GRS-148, Braunschweig (1999)
- [ 32 ] Peach, C.J.: Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Utrecht: Institut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit Utrecht. Geologica Ultraiectina ISSN 0072-1026: No. 77 (1991)
- [ 33 ] Ryan, T.M.; Farmer, I.W.; Kimbrell, A.F.: Laboratory Determination of Fracture Permeability. Proc. 28th U.S. Rock Mech. Symp. pp. 593-600 Tucson (1987)
- [ 34 ] J.R. Schopper: Petrophysikalische Messungen an Steinsalzproben, Inst. f. Geophysik, TU Clausthal, erstellt im Auftrag des GSF-Instituts. für Tieflagerung, Braunschweig, 1982

- [ 35 ] Schulze, O.: Geomechanische Konsequenzen der Gasbildung im Endlager. In: Erzeugung und Verbleib von Gasen in einem Endlager für radioaktive Abfälle. Bericht über den GRS-Workshop vom 29. und 30. Mai 1996. GRS-129 Köln (1997)
- [ 36 ] Seber, G.A.F.; Wild, C.J.: Nonlinear Regression. Wiley New York (1989)
- [ 37 ] Shor, A.J.; Baes, C.F.; Canonico, C.M.: Consolidation and Permeability of Salt in Brine. ORNL-5774, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tn (1981)
- [ 38 ] Stormont, J.C.: Gas Permeability Changes During Deformation. Dissertation, University of Arizona, Tucson (1990)
- [ 39 ] Stormont, J.C.; Howard, C.L.; Daemen, J.J.K.: In Situ Measurements of Rock Salt Permeability Changes Due to Nearby Excavation. Sandia National Laboratories. SAND90-3134. Albuquerque, N.M. (1991)
- [ 40 ] US Department of Energy: Waste Isolation Pilot Plant. Compliance Certification Application. Appendix PAR pp 50-54. Washington DC October 1996
- [ 41 ] Walsh, J.B.: Effect of Pore Pressure on Fracture Permeability. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 18, pp 429-435 (1981)
- [ 42 ] Wiczorek, K.; Zimmer, U.: Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Salzgebirge. Abschlußbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, GRS-A-2651, Braunschweig (1998)
- [ 43 ] Weber, J.R.: Untersuchungen zur Permeabilitätsdilatanz kristalliner Gesteine unter deviatorischer Belastung. Dissertation, TU Clausthal (1994)
- [ 44 ] Zhang, C.-L.; Schmidt, M.W.; Staupendahl, G.; Heemann, U.: Entwicklung eines Stoffansatzes zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus, Bericht Nr. 93-73, Institut für Statik Braunschweig, gemeinsame Veröffentlichung mit dem GSF-Institut für Tieflagerung, Braunschweig, 1993

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1	Permeabilität von aufgelockerten Steinsalzproben in Abhängigkeit vom Druck nach Messungen von Borgmeier .....	12
Abb. 3-2	Permeabilität einer natürlich und einer künstlich aufgelockerten Steinsalzprobe bei zyklischer Variation des Überlagerungsdrucks.....	13
Abb. 3-3	Meßwerte der Permeabilität von 15 Steinsalzproben in Abhängigkeit vom effektiven Manteldruck nach Schopper .....	14
Abb. 3-4	Permeabilität von ungetrockneten natürlichen Steinsalzproben, in Abhängigkeit vom Effektivdruck .....	16
Abb. 3-5	Gemessene Permeabilitäten von aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom effektiven Manteldruck nach Gloyna und Reynolds .....	18
Abb. 3-6	Permeabilität von Steinsalz nach Lai, in Abhängigkeit vom abgeleiteten hydrostatischen Druck für verschiedene deviatorische Spannungen. ....	21
Abb. 3-7	Permeabilität von zwei natürlichen Steinsalzproben nach den Messungen von Peach in Abhängigkeit vom abgeleiteten hydrostatischen Druck. ....	23
Abb. 3-8	Druckabhängige Permeabilitäten verschiedener aufgelockerter Steinsalzproben nach Borgmeier mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell ..	25
Abb. 3-9	Druckabhängige Permeabilitäten von aufgelockertem Steinsalz nach Messungen von Lai mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell.....	26
Abb. 3-10	Druckabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz nach Messungen von Jockwer mit Linearisierung nach dem Walsh-Modell .....	27
Abb. 3-11	Ausgleichskurven der verschiedenen Meßdatengruppen zur Permeabilität in aufgelockertem Steinsalz in Abhängigkeit vom Druck.....	33
Abb. 4-1	Permeabilität von fünf Steinsalzproben bei Verformung in Abhängigkeit von der Dilatation nach Peach, mit Ausgleichsgerade und –parabel.....	39
Abb. 4-2	Zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz bei 10,2 MPa Überlagerungsdruck mit Approximation durch ein Potenzgesetz .....	43

Abb. 4-3	Zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz für Lauge und Argon nach Peach .....	44
Abb. 4-4	Änderung der Laugen- bzw Argonpermeabilität. bei wechselnder Druckbelastung und zwischenzeitlichen stationären Perioden .....	46
Abb. 4-5	Zeitabhängige Permeabilität von neun aufgelockerten Steinsalzproben bei 12 MPa effektivem Überlagerungsdruck. Vorherige Lagerung bei 35% und 75% relativer Luftfeuchte .....	47
Abb. 4-6	Zeitliche Permeabilitätsabnahme von trocken und feucht gelagerten Steinsalzkernen bei 12 MPa effektivem Überlagerungsdruck mit Ausgleichsgerade für die Meßwerte mit $t > 100$ h. ....	48
Abb. 4-7	Zeitabhängige Permeabilitäten von Steinsalzproben, die in Wasserdampfgesättigter $N_2$ -Atmosphäre gelagert wurden („feucht“) und einer getrockneten Probe bei 20 MPa Mantelruck .....	49
Abb. 4-8	Zeitliche Entwicklung der Permeabilität einer aufgelockerten Steinsalzprobe bei 70-stündiger Durchströmung mit trockenem und anschließend mit wasserdampfgesättigtem Argon.....	50
Abb. 4-9	Zeitabhängige Permeabilitäten nach Messungen von Förster mit Linearisierung nach Gl. (22) für verschiedene Werte des Parameters.....	53
Abb. 4-10	Anpassung der zeitabhängigen Permeabilitätsänderungen von aufgelockertem Steinsalz nach den Messungen von Peach bei Durchströmung mit Lauge an Gl. (22) mit $q = 4$ und $q = 2$ .....	54
Abb. 4-11	Steigung $s$ im Dilatanzmodell (22) für zwei Werte des Parameters $q$ und Zeitexponenten $c$ im empirischen Modell (23) in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck .....	56
Abb. 4-12	Druck- und zeitabhängige Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz nach der empirischen Relation Gl. (27).....	60
Abb. 4-13	Schließzeiten (Dauer der Abnahme der Permeabilität auf $10^{-21} \text{ m}^2$ ) von aufgelockertem Steinsalz bei Durchströmung mit gesättigter Lauge in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck. ....	61

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Axial- und Radialspannungen bei den Untersuchungen von Lai, entsprechende deviatorische und hydrostatische Spannungen.....	20
Tab. 3-2	Regression der Meßdaten von Borgmeier nach dem Walsh-Modell.....	24
Tab. 3-3	Ergebnisse der Regression der sechs Meßdatengruppen an die Approximationsfunktion Gl. (14) mit 4 bzw. 3 freien Parametern $u_i$ .....	32
Tab. 3-4	Gegenüberstellung der wesentlichen Charakteristika der verschiedenen experimentellen Laboruntersuchungen an natürlichem Salzgestein zur kurzzeitigen Permeabilitätsreduktion unter Druckeinfluß.....	34
Tab. 4-1	Regressionsparameter für die zeitabhängige Permeabilität von Steinsalz nach Förster und extrapolierte Schließzeit $t(-21)$ .....	52
Tab. 4-2	Zeitabhängige Permeabilitätsabnahme von Steinsalz bei 8,5 und 18,5 MPa Überlagerungsdruck. Regression der Meßdaten für Lauge an (22) für $t_0 = 1$ h und verschiedene Werte des Parameters $q$ .....	55

**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)**