



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

**Untersuchungen zum
Zweiphasenfluss und
diffusiven Transport in
Tonbarrieren und Ton-
gesteinen**

Abschlußbericht



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

**Untersuchungen zum
Zweiphasenfluss und
diffusiven Transport in
Tonbarrieren und Ton-
gesteinen**

Abschlußbericht

Norbert Jockwer
Rüdiger Miehe
Ingo Müller-Lyda

September 2000

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden mit
Mitteln des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Technologie
(BMWi) unter dem Förderkenn-
zeichen 02 E 9017 0 gefördert.

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

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt al-
lein bei den Autoren.

**GRS - 167
ISBN 3-931995-33-X**

Deskriptoren:

Aktiver Abfall, Nuklidtransport, Geosphäre, Diffusion, Meßauswertung, Langzeitsicherheit, Gas, Endlagerung, Salz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Einphasenfluss von Gas	3
2.2	Einphasenfluss von Wasser	4
2.3	Zweiphasenfluss von Gas und Wasser	4
2.4	Modelle des Zweiphasenflusses.....	6
2.5	Gasdiffusion.....	9
2.6	Dichte und Porosität	10
2.7	Innere Oberfläche.....	12
3	Probenpräparation	15
3.1	Permeabilitätsuntersuchungen	16
3.2	Diffusionsuntersuchungen	17
3.3	Innere Oberfläche	18
4	Messmethoden	19
4.1	Bestimmung der Gas- und Wasserpermeabilität.....	19
4.2	Bestimmung der effektiven Gaspermeabilität und des Kapillardruckes in Abhängigkeit von der Wassersättigung	21
4.3	Auswertung der Messergebnisse zu den Permeabilitäten und Kapillar- drücken.....	22
4.4	Bestimmung der Gasdiffusion	25
4.5	Bestimmung der inneren Oberfläche.....	26
5	Ergebnisse und Interpretation	27
5.1	Einphasenfluss von Gas in Sand/Tongemischen	28
5.2	Einphasenfluss von Wasser in Sand/Tongemischen	32
5.3	Zweiphasenfluss von Gas und Wasser in Sand/Tongemischen	33
5.4	Untersuchungen natürlicher Tongesteine.....	34
5.5	Ermittlung der Zweiphasenflussparameter von Sand/Tongemischen	38

5.5.1	Auswertung der Messwerte für die Proben mit 10 % Tonanteil.....	40
5.5.2	Auswertung der Messwerte für die Proben mit 25 % Tonanteil.....	47
5.6	Gasdiffusionskonstanten	48
5.7	Innere Oberfläche	51
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	53
7	Literatur	61
	Abbildungsverzeichnis	63
	Tabellenverzeichnis	65
8	Anhang: Messwerte.....	67

1 Einleitung

Radioaktive Abfälle sollen nach deutschen und internationalen Konzepten in stabilen Strukturen des tiefen geologischen Untergrundes endgelagert und damit von der Biosphäre isoliert werden. Für diese Form der Endlagerung muss sichergestellt werden, dass sowohl im Normalbetrieb als auch bei einem Störfall Radionuklide nicht über das zulässige Maß hinaus in die Biosphäre gelangen. Um dieses zu gewährleisten, müssen geschaffene Hohlräume wie Einlagerungsbohrlöcher, Zugänge, Zufahrten, Kammern und Schächte mit geeigneten Versatzmaterialien oder speziellen Abschlussbauwerken hinreichend dicht und dauerhaft verschlossen werden.

Für die verschiedenen Endlagerformationen sind in Deutschland und international als Versatz für Strecken und zum Bau von Abschlussbauwerken u. a. Tone, Tonmineralgemische und Tonstein vorgesehen.

Bei der anaeroben Korrosion metallischer Behälter oder Abfallbestandteile kann im Nahbereich eines Endlagers bei Vorhandensein hinreichender Wassermengen (Luftfeuchte oder Wasser- bzw. Laugenzutritt) und oxidierender Bedingungen Wasserstoff in beträchtlichen Mengen (pro 1000 kg Stahl bis zu 600 m³ unter Normalbedingungen) gebildet werden /SMA 85/, /HAU 90/, /KIE 91/. Durch thermische und mikrobielle Zersetzung von organischen Materialien sowohl in den schwach- und mittelaktiven Abfällen /KRO 88/, /KRO 95/ als auch im Ton können weitere Gase wie Methan und Kohlendioxid entstehen.

In abgeschlossenen Bereichen kann es durch Gebirgskonvergenz und durch die Gasfreisetzung aus den Abfällen zu einem Druck- und Konzentrationsanstieg an brennbaren Gasen und Kohlendioxid kommen. Bei einem Laugen- oder Wasserzutritt in das Endlager werden zusätzlich große Gasmengen (Luft) aus den abgeschlossenen Bereichen verdrängt. Dadurch bildet sich im trockenen, teildurchfeuchteten oder auch wassergesättigten Versatz in Abhängigkeit von den Randbedingungen (Druck, Temperatur, Feuchte) eine Ein- oder Zweiphasenströmung von Gasen und Flüssigkeiten aus. Aufgrund der gleichzeitig vorhandenen Konzentrationsgradienten der aus den Abfällen erzeugten Komponenten Wasserstoff, Methan und Kohlendioxid kommt es zusätzlich zu einem diffusiven Transport. Freigesetzte und gelöste oder gasförmige Radionuklide bzw. Schadstoffe werden sich mit diesen Phasen ausbreiten.

Für Sicherheitsanalysen ist die Kenntnis der Fließvorgänge in den Versatzkörpern und den Abschlussbauwerken sowie die Kenntnis der diese Fließvorgänge bestimmenden Parameter eine notwendige Voraussetzung.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden an Proben aus Sand/Tongemischen unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktion und an Proben natürlicher Tongesteine die Porositäten, die absoluten Permeabilitäten für Gas und Wasser, die relativen Permeabilitäten für verschiedene Sättigungen und die entsprechenden Kapillardrücke ermittelt. Für diese petrophysikalischen Parameter wurden die funktionellen Abhängigkeiten in Form der bekannten Beziehungen von Brooks/Corey und van Genuchten und deren Koeffizienten bestimmt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Einphasenfluss von Gas

Zur Bestimmung der Gaspermeabilität wird eine Probe aus porösem Material mit definierter Geometrie von einem Messgas durchströmt. Für die Auswertung wird das Gesetz von Darcy für stationären Fluss und kompressible Medien angewandt:

$$k_g = \frac{2 \cdot q_g \cdot \mu_g \cdot l \cdot p_0}{A \cdot (p_1^2 - p_0^2)} \quad (2.1)$$

mit:

k_g	Gaspermeabilität	m^2
q_g	Fließrate des Gases	m^3/s
p_1	Injektionsdruck	Pa
p_0	Luftdruck	Pa
μ_g	dynamische Viskosität des Gases	Pa·s
l	Probenlänge	m
A	Querschnittsfläche der Probe	m^2

Bei Gasen tritt aufgrund der freien Weglängen der Gasmoleküle ein Gleitströmungseffekt an den Wänden des Porenraums auf, der dem durch ein Druckgefälle hervorgerufenen hydraulischen Fluss überlagert ist und somit eine höhere Darcy-Permeabilität vorspiegelt. Der Einfluss des Gleitströmungseffekts nimmt mit steigendem Gasdruck im Porenraum ab.

Dieser Gleitströmungseffekt kann mit der Klinkenberg-Korrektur eliminiert werden:

$$k_g = k_\infty \left(1 + \frac{b}{p_m} \right) \quad (2.2)$$

mit:

k_g	Gaspermeabilität	m^2
k_∞	Klinkenberg-Permeabilität	m^2

p_i	Injektionsdruck	Pa
p_o	Luftdruck	Pa
b	Klinkenberg-Konstante	Pa
p_m	mittlerer Druck: $p_m = \frac{p_i + p_o}{2}$	Pa

Für die Klinkenberg-Korrektur wird die Probe mit verschiedenen Injektionsdrücken p_i durchströmt und die jeweilige Gaspermeabilität k_g ermittelt. Die so bestimmten Gaspermeabilitäten k_g werden gegen den Kehrwert des mittleren Druckes p_m aufgetragen. Zur Ermittlung der nach Klinkenberg korrigierten Permeabilität werden die gemessenen Gaspermeabilitäten auf einen unendlichen mittleren Druck extrapoliert. Der Schnittpunkt der Geraden mit der Permeabilitätsachse bei $1/p_m = 0$ ergibt die Klinkenberg-Permeabilität.

2.2 Einphasenfluss von Wasser

Die Wasserpermeabilität wird nach dem Gesetz von Darcy für inkompressible Medien berechnet gemäß:

$$k_w = \frac{q_w \cdot \mu_w \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (2.3)$$

mit:

k_w	Wasserpermeabilität	m^2
q_w	Fließrate des Wassers	m^3/s
Δ_p	Druckdifferenz	Pa
μ_w	Viskosität des Wassers	Pa·s
l	Probenlänge	m
A	Querschnittsfläche der Probe	m^2

2.3 Zweiphasenfluss von Gas und Wasser

Bei vollständiger Sättigung des Porenraums mit nur einer Phase und unter der Voraussetzung, dass keine Wechselwirkung der Phasen mit der Gesteinsmatrix auftritt, wird

die Durchlässigkeit des Körpers als absolute Permeabilität bezeichnet. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen, die effektiven Permeabilitäten, auf einen dem Sättigungsgrad entsprechenden Anteil der absoluten Permeabilität verringert. Das Verhältnis zwischen effektiver und absoluter Permeabilität ist als relative Permeabilität für die jeweilige Phase definiert.

$$k_r = \frac{k_{eff}}{k_{abs}} \quad (2.4)$$

mit:

k_r	relative Permeabilität der einzelnen Phase	-
k_{eff}	effektive Permeabilität der einzelnen Phase	m ²
k_{abs}	absolute Permeabilität	m ²

Als absolute Permeabilität wird die mit Stickstoff gemessene Permeabilität für den einphasigen Gasfluss eingesetzt.

Der Kapillardruck wird durch die Grenzflächenspannung σ zwischen der benetzenden und der nichtbenetzenden Phase, dem Porenradius r sowie dem Benetzungswinkel α und damit dem Reibungswiderstand $\cos(\alpha)$ bestimmt, und ist definiert gemäß /AMY 60/:

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\alpha)}{r} \quad (2.5)$$

mit:

p_c	Kapillardruck	Pa
σ	Grenzflächenspannung	N/m
r	Porenradius	m
α	Benetzungswinkel	-

Beim Zweiphasenfluss ist die relative Permeabilität der einzelnen Phasen sowie der Kapillardruckverlauf in Abhängigkeit von der Wassersättigung des Porenraumes von Interesse.

In diesem Vorhaben wurden die Untersuchungen zum Zweiphasenfluss für Gas (Stickstoff) und Wasser vorgenommen. Hierbei ist Wasser die benetzende und Gas die nichtbenetzende Phase.

2.4 Modelle des Zweiphasenflusses

Die relativen Permeabilitäten und Kapillardrücke in Mehrphasensystem können als Funktion der effektiven Wassersättigung S_{we} beschrieben werden. Diese wird aus der relativen Wassersättigung S_w , der Restwassersättigung S_{rw} und der Restgassättigung S_{rg} nach der Beziehung

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rg}} \quad (2.6)$$

berechnet. Durch diese Skalierung wird der Bereich der möglichen Wassersättigung $S_{rw} \leq S_w \leq 1 - S_{rg}$, in dem die Gas- und die flüssige Phase gleichzeitig mobil sind, in den Bereich $0 \leq S_{we} \leq 1$ transformiert. Analog lässt sich auch eine effektive Gassättigung definieren, und es gilt $S_{we} + S_{ge} = 1$. Da in dieser Arbeit der Kapillardruck und die relative Permeabilität immer in Abhängigkeit von der effektiven Wassersättigung beschrieben werden, wird hierfür die einfachere Bezeichnung S_e verwendet.

Für Gas-Wassersysteme werden die Beziehungen von Brooks/Corey /BRO 64/ und von van Genuchten /GEN 80/ am häufigsten herangezogen, um den Zusammenhang zwischen dem Kapillardruck p_c bzw. den relativen Gas- und Wasserpermeabilitäten k_g und k_w in Abhängigkeit von der effektiven Sättigung darzustellen. Die Relationen nach dem Brooks/Corey-Modell (BC) lauten:

$$p_c^{BC}(p_d, \lambda, S_e) = p_d \cdot S_e^{-\frac{1}{\lambda}} \quad (2.7)$$

$$k_g^{BC}(\lambda, S_e) = (1 - S_e)^2 \cdot \left(1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}\right) \quad (2.8)$$

$$k_w^{BC}(\lambda, S_e) = S_e^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (2.9)$$

Die entsprechenden Relationen lauten für das Modell von van Genuchten (vG) in der allgemeinsten Form:

$$p_c^{\text{vG}}(\alpha, m, n, S_e) = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.10)$$

$$k_g^{\text{vG}}(m, S_e) = (1 - S_e)^\gamma \cdot \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (2.11)$$

$$k_w^{\text{vG}}(m, S_e) = S_e^\varepsilon \cdot \left(1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right) \quad (2.12)$$

Die Beziehungen (2.7) bis (2.9) für das Modell von Brooks/Corey (BC) enthalten zwei (λ und p_d) und (2.10) bis (2.12) für das von van Genuchten (vG) fünf Parameter (α , n , m , γ und ε). Der vG-Parameter γ in (2.11) und ε in (2.12) beschreiben die Verknüpfung der Poren untereinander. Als typische Werte für diese Parameter können $\varepsilon = 1/2$ und $\gamma = 1/3$ angenommen werden, wodurch sich die Zahl der freien Parameter auf drei verringert. Zwischen den beiden anderen vG-Parametern m und n besteht außerdem nach der Theorie der Zusammenhang

$$m = 1 - 1/n \quad (2.13)$$

Wenn die Gültigkeit dieses Zusammenhangs angenommen wird, kann damit entweder n oder m in der Beziehung für den Kapillardruck (2.10) eliminiert werden /EUG 95/, /HEL 97/. Bei den in diesem Vorhaben durchgeführten Regressionen der Bestwerte, die im Kapitel 4.3 beschrieben sind, werden die Parameter n und m getrennt ermittelt.

Im BC-Modell bedeutet der Parameter p_d in (2.7) den Gaseindringdruck (air entry pressure). Dieser ist definiert als der kleinste Gasdruck, bei dem die benetzende Phase so weit verdrängt wird, dass sich ein durchgängiger Strömungskanal für das Gas bildet und ein kontinuierlicher Gasstrom möglich wird. Der Parameter λ ist die Kennzahl der Porengrößenverteilung (pore size distribution index). Ein Material mit einheitlicher Porenweite wird durch $\lambda = 0$ charakterisiert. Mit wachsender Inhomogenität der Poren-

weiten nimmt der Wert von λ zu. Für die meisten porösen Materialien liegt λ in dem Bereich $0,2 \geq \lambda \geq 3$ /HEL 97/.

In der Abb. 2-1 sind die sättigungsabhängigen Verläufe des Kapillardruckes nach den Modellen von Brooks/Corey und van Genuchten für zwei Beispiele einander gegenübergestellt. Bei der flacheren der beiden BC-Kurven ist $\lambda = 2$, d. h. diese gilt für ein Material mit sehr ungleichmäßiger Verteilung der Porenweite und die andere mit $\lambda = 0,5$ für ein homogeneres Material. In beiden Fällen hat p_d den Wert 0,2 MPa; bei diesem Wert schneiden die Kurven die $S_{we} = 1$ -Achse. Die in dem Diagramm aufgeführten Werte für die vG-Parameter α ; m und n sind so gewählt, dass die Kapillardrücke in dem Sättigungsbereich $0,3 < S_{we} < 0,7$ gut mit den entsprechenden BC-Relationen übereinstimmen.

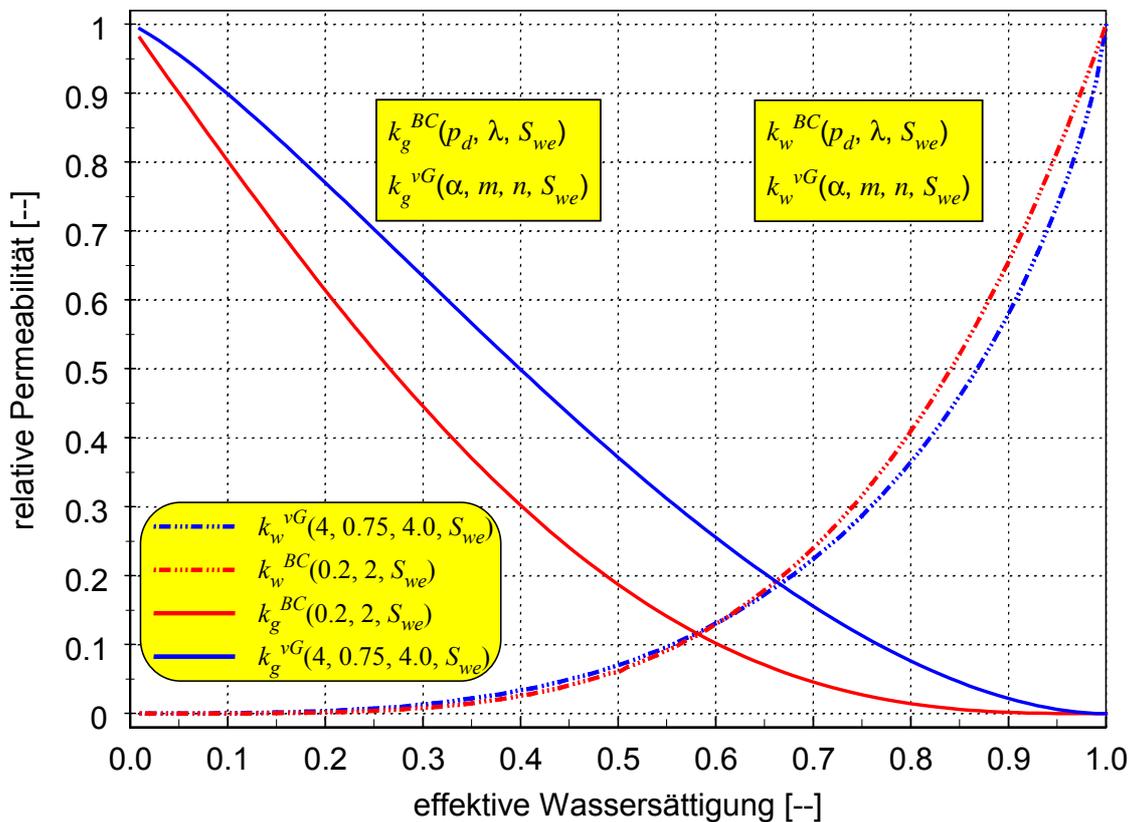


Abb. 2.1 Kapillardruck (p_c) nach dem Modell von Brooks/Corey (BC) und van Genuchten (vG) in Abhängigkeit von der effektiven Wassersättigung S_{we} für zwei unterschiedliche Parameterkombinationen.

Die entsprechenden relativen Gas- und Wasserpermeabilitäten nach den beiden Modellen sind in Abb. 2.2 dargestellt. Für dieses Beispiel wurden dieselben Parameterwerte wie in für den Kapillardruck mit dem BC-Parameter $\lambda = 2$ gewählt, d. h. $p_d = 0,2$ MPa, $m = 0,75$ und $n = 4$. Man erkennt, dass in diesem Beispiel bei den relativen Wasserpermeabilitäten in beiden Modellen nahezu Übereinstimmung besteht. Im Gegensatz dazu sind bei den Gaspermeabilitäten deutliche Unterschiede erkennbar.

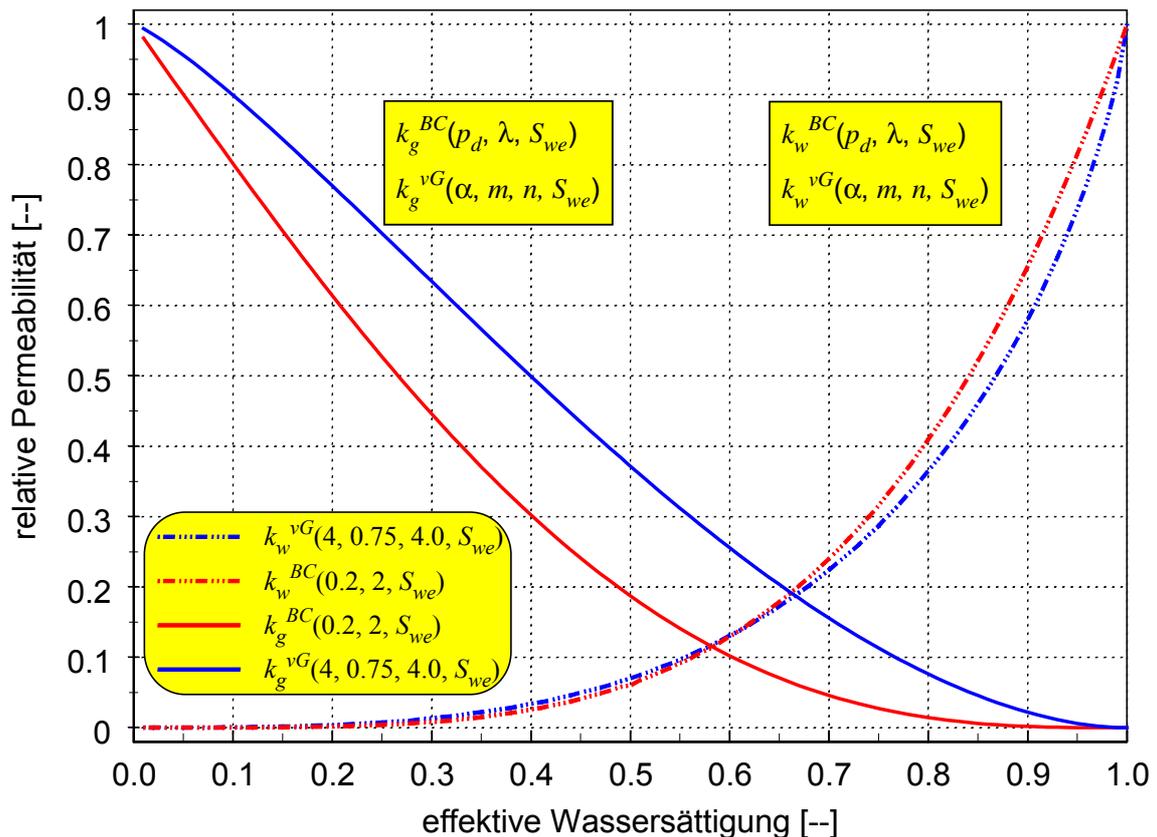


Abb. 2.2 Gegenüberstellung der Relationen für die sättigungsabhängige relative Gas- (k_g) und Wasserpermeabilität (k_w) nach dem Modell von Brooks/Corey (BC) und van Genuchten (vG).

2.5 Gasdiffusion

Für die Bestimmung der Gasdiffusion wird auf das eine Ende der Probe ein Gasgemisch definierter Zusammensetzung gegeben und über die Zeit konstant gehalten. Am anderen Ende wird die hindurch diffundierte Menge der jeweiligen Komponente erfasst,

indem dieses Ende mit einem konstanten Luftstrom gespült wird und in diesem die Konzentration der diffundierten Komponente bestimmt wird. Zwischen den Probenenden darf hierbei kein Druckgefälle, sondern nur ein Konzentrationsgefälle herrschen. Im stationären Fall ist der Diffusionsstrom durch die Probe und damit die Konzentration im Spülstrom konstant. Die Bestimmung erfolgt nach dem 1. Fick'schen Gesetz /JOS 72/ über:

$$D = \frac{J \cdot l}{\Delta c \cdot A} \quad (2.14)$$

mit:

D	Diffusionskonstante	m^2/s
J	Diffusionsstrom = $j \cdot c_{II}$	g/s
j	Spülrate am Probenausgang	m^3/s
c_{II}	Konzentration der Gaskomponente im Spülstrom am Probenausgang	- g/m^3
l	Probenlänge	m
Δc	Konzentrationsgefälle zwischen den Probenenden	g/m^3
A	Probenfläche	m^2

2.6 Dichte und Porosität

Die Porosität Φ eines porösen Körpers ist definiert als das Verhältnis von Porenvolumen zum Gesamtvolumen der Probe:

$$\Phi = \frac{V_{por}}{V_b}, \quad (2.15)$$

wobei sich das Porenvolumen aus der Differenz des Gesamtvolumens und des Volumens des Korngerüsts (Matrixvolumen) ergibt:

$$V_{por} = V_b - V_g \quad (2.16)$$

Somit errechnet sich die Porosität zu:

$$\Phi = \frac{V_b - V_g}{V_b} = 1 - \frac{V_g}{V_b} \quad (2.17)$$

mit:

Φ	Porosität	-
V_b	Gesamtvolumen	m ³
V_{por}	Porenvolumen	m ³
V_g	Volumen des Korngerüsts	m ³

Da das Volumen V mit dessen Masse m über die jeweilige Dichte ρ gemäß

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.18)$$

verknüpft ist und unter der Annahme, dass die Masse des Korngerüsts der Gesamtmasse der Probe entspricht, lässt sich die Gesamtporosität unter Verwendung der Gesamtdichte des Probekörpers und der Korndichte des Korngerüsts berechnen gemäß:

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_g} \quad (2.19)$$

mit:

Φ	Porosität	-
ρ_b	Gesamtdichte	g/cm ³
ρ_{gr}	Korndichte	g/cm ³

ρ_{gr} kann mit einem Luftvergleichspyknometer und das V_b geometrisch bestimmt werden.

Zur Berechnung der effektiven Porositäten, d. h. unter Berücksichtigung des effektiven Porenraums, der vom Fluid durchströmt werden kann, wird angenommen, dass der Porenraum zunächst vollständig mit dem Fluid (hier Wasser) gesättigt ist. Unter dieser Annahme entspricht das Volumen des aufgenommenen Fluids dem Volumen des effektiven Porenraums, und die effektive Porosität kann aus dem Quotienten des effektiven Porenraums und des Gesamtvolumens nach Gl. (2.20) errechnet werden:

$$\Phi_{eff} = \frac{V_{eff}}{V_b} \quad (2.20)$$

mit:

V_{eff}	effektives Porenvolumen	cm^3
Φ_{eff}	effektive Porosität	-

Das aufgenommene Wasservolumen wird mittels Wägung aus der Wassermenge und der Dichte des Wassers (1 g/cm^3) errechnet.

2.7 Innere Oberfläche

Die Messung der inneren Oberfläche erfolgt nach der Mehrpunkt-BET-Stickstoff-Adsorptionsmethode. Hierbei wird ein Ausschnitt der Adsorptionsisotherme für Stickstoff bei der Siedetemperatur gemessen, für den das Dampfdruckverhältnis p/p_0 zwischen 0,05 und 0,3 beträgt (p : aktueller Dampfdruck und p_0 : Sättigungsdampfdruck im Probengefäß). In diesem Druckbereich lässt sich die Isotherme über die BET-Gerade annähern, aus deren Steigung sich die adsorbierende Oberfläche berechnen lässt.

Gemessen wird die Stickstoffmenge, die notwendig ist, ein definiertes Dampfdruckverhältnis im Proben- und Vergleichsgefäß einzustellen. Aus der Kenntnis des Unterschieds im freien Gasvolumen zwischen Proben- und Vergleichsgefäß lässt sich aus den zugeführten Gasmengen der Anteil des von der Probe adsorbierten Gases berechnen und in Abhängigkeit vom Dampfdruckverhältnis auftragen. Aus der direkten Proportionalität der adsorbierten Gasmenge mit der adsorbierenden Oberfläche und dem Flächenbedarf der adsorbierten Moleküle lässt sich die Oberfläche berechnen.

$$S = f \cdot L \cdot \frac{V_m}{V_0} \quad (2.21)$$

mit:

S	innere Oberfläche	m^2
f	Platzbedarf eines Moleküls	m^2
	für Stickstoff $f = 16,2 \cdot 10^{-20}$	m^2
L	Loschmidtsche Zahl	$1/\text{mol}$

V_m	Sorbatvolumen der monomolekularen Schicht	m^3
V_o	Molvolumen des Gases	m^3/mol

Dabei ist es üblich, diesen ermittelten Wert auf die Masse der Probe zu beziehen, also

eine spezifische Oberfläche $\frac{S}{m}$ anzugeben.

3 Probenpräparation

Für die Herstellung der Proben aus potenziellen Versatzmaterialien wurden als Ton der Bentonit Calcigel der Fa. Südchemie und die im Bauhandel erhältlichen Sande

a) Quarzsand mit dem Korndurchmesser	90 % 0,5 bis 2 mm
	10 % kleiner 0,5 mm
b) Fliesensand mit dem Korndurchmesser	90 % 0,2 bis 1 mm
	10 % kleiner 0,2 mm
c) gewöhnlicher Bausand mit dem Korndurchmesser	90 % 0,1 bis 2 mm
	10 % kleiner 0,1 mm

untersucht.

Diese Untersuchungen haben ergeben, dass diese Sande weder einen Einfluss auf die Probenpräparation noch auf die Permeabilität haben. Daher wurde in den weiteren Untersuchungen der gewöhnliche Bausand eingesetzt, der in großen Mengen zur Verfügung steht und preisgünstig ist.

Um für das gesamte Untersuchungsprogramm einheitliches Material zu haben, wurden zu Beginn des Vorhabens 100 kg Calcigel aus einer Charge und ca. 200 kg Bausand beschafft. Das Calcigel wurde homogenisiert und während der Vorhabensdauer in einem Behälter mit luftdichtem Schraubdeckel gelagert, um zu verhindern, dass von dem Probenmaterial Feuchte aus der Luft aufgenommen wird. Der Bausand wurde ebenfalls homogenisiert und in gleicher Weise gelagert. Da der Bausand noch eine Restfeuchte von 2 bis 3 Gewichts-% besitzt, wurde vor jeder Probenherstellung die notwendige Menge entnommen und bei 100 °C ca. 48 Stunden lang bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Aus dem Calcigel und dem getrockneten Bausand konnten jedoch mit den vorgesehenen Sand/Ton-Mischungsverhältnissen zwischen 50/50 bis 90/10 bei Kompaktionsdrücken bis 100 MPa keine handhabbaren Proben für die weiteren Untersuchungen hergestellt werden. Es wurde daher dazu übergegangen, beim Anmischen der Proben dem Material wieder eine definierte Menge Wasser zuzusetzen.

An Proben mit dem Mischungsverhältnis Sand/Ton 90/10 wurde ermittelt, dass für einen Kompaktionsdruck von 25 MPa mit der Wassermenge von 20 ml auf 500 g Gesamtprobenmaterial (Sand und Ton) handhabbare Proben hergestellt werden können. Da die innere Oberfläche der Proben hauptsächlich durch den Tonanteil bestimmt wird, wurde für die Proben mit anderen Mischungsverhältnissen der zugesetzte Wasseranteil so gewählt, dass alle Proben dasselbe Ton-Wasserverhältnis hatten. Dadurch wurde erreicht, dass in den Proben mit verschiedenen Sand/Ton-Anteilen die Benetzung der Tonoberfläche gleich war.

3.1 Permeabilitätsuntersuchungen

Die absoluten und relativen Permeabilitäten für Gas und Wasser sowie die Kapillardrücke wurden an Proben von 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge gemessen. Um zu gewährleisten, dass die Proben mit gleichen Mischungsverhältnissen untereinander weitestgehend identisch waren, wurde das Material für jede Probe in allen Präparationsschritten separat hergestellt. Entmischungen in größeren Probenchargen wurden dadurch verhindert. Für die Herstellung wurde der Anteil des bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Sandes und des Tones mit einer Gesamtmenge von 500 g in eine Polyethylen-Weithalsflasche eingegeben. In einem Überkopfschüttler wurde dieses Material eine halbe Stunde durchmischt und dann der jeweilige Wasseranteil (20, 50 bzw. 100 ml) zugegeben und erneut eine halbe Stunde durchmischt. Das gesamte Probenmaterial war anschließend homogen durchfeuchtet und somit die Oberfläche des Tones für die gesamte Probe gleichmäßig benetzt.

Das für die Probenherstellung mit den obigen Abmessungen notwendige Material wurde in einen Stahlzylinder eingegeben und in einer einaxialen Presse mit dem vorgesehenen Druck (25, 50 bzw. 100 MPa) gepresst. Dabei wurde der Druck innerhalb einer halben Stunde bis zum Enddruck hochgefahren, eine halbe Stunde konstant gehalten und dann wieder über eine halbe Stunde heruntergefahren. Anschließend wurde die Probe aus dem Stahlzylinder herausgepresst und im Exsikkator mit Silikagel über ca. 4 Wochen getrocknet. Dabei wurde das zuvor zugegebene Wasser weitestgehend wieder abgegeben, was durch Wägung kontrolliert wurde. Der Porenraum der Probe war somit wasserfrei und luftgefüllt. Die Probe konnte dann für die Permeabilitätsmessungen in die Hasslerzelle eingebaut werden.

Vergleichend zu den Sand/Ton-Proben wurden natürliche Tonsteinproben des

- Boom Clay aus dem Untertagelabor HADES in Mol in Belgien und des
- Opalinus-Tons aus dem Untertagelabor Mont Terri in der Schweiz

untersucht. Diese Proben wurden durch Kernbohrungen gewonnen und hatten Durchmesser von 100 bzw. 80 mm. Um zu verhindern, dass der natürliche Ton bis zum Einsatz in der Messzelle austrocknet, wurden die Kerne für den Transport und die Lagerung unmittelbar nachdem sie aus der Bohrmaschine entnommen worden sind in gasdichte Kunststoffbehälter mit geringem Totvolumen verpackt. Vor dem Einsetzen in die Hasslerzelle wurden die Kerne aus dem Behälter entnommen, mit einer feinen Stahlsäge auf die gewünschte Länge geschnitten und in eine einaxialen Presse durch eine Ringschneide von 50 mm Durchmesser gepresst, um die Abmessungen für die Hasslerzelle zu erhalten. Randzonen mit mechanischen Beanspruchungen oder Trokkrissen wurden damit gleichzeitig entfernt.

3.2 Diffusionsuntersuchungen

Die Ermittlung der Gasdiffusionskonstanten in den Sand/Ton-Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke erfolgte in speziell hierfür entwickelten Messzellen (Abb. 4.3). In dem dickwandigen Edelstahlzylinder wurde der Bodendeckel eingeschraubt und für die homogene Gasverteilung eine Sintermetall-Filterfritte aufgelegt, die mit einer Scheibe Filterpapier abgedeckt wurde, um zu verhindern, dass Tonmaterial in die Filterfritte eindringt. Danach wurde in den vertikal stehenden Zylinder das angemischte Probenmaterial (wie Kap. 3.1) für eine Probendicke von 10 bis 15 mm eingebracht und in der einaxialen Presse mit 25, 50 bzw. 100 MPa kompaktiert. Diese Probe in der einseitig offenen Messzelle wurde dann ebenso wie die Proben der Permeabilitätsbestimmungen in einem Exsikkator über Silikagel bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Für die Diffusionsmessungen wurde dann auf das offene Ende der Probe zur homogenen Gasverteilung ebenfalls eine Filterfritte aufgelegt und die Messzelle mit dem zweiten Deckel verschraubt.

3.3 Innere Oberfläche

Die Bestimmung der inneren Oberfläche erfolgte an dem losen Bausand und Calcigel sowie an sechs gepressten Proben mit den Mischungsverhältnissen Sand/Ton 75/25 und 50/50 sowie einem Bohrkern des Opalinus-Tons aus dem Untertagelabor Mont Terri.

Vor der Messung der inneren Oberfläche wurden die Proben in dem Messzylinder der Anlage bis zur Gewichtskonstanz bei 40 °C und einem Druck von 2·Pa getrocknet, um aus den Poren der Probe und von den inneren Oberflächen das freie und adsorbierte Wasser sowie die Gase zu entfernen. Anschließend wurde das Gefäß mit der Probe mit Stickstoff geflutet und wieder evakuiert. Dieser Vorgang wurde dreimal bis zur endgültigen Evakuierung wiederholt. Nach einer Abkühl- und Ruhezeit von 24 Stunden wurde das Probegefäß mit der Probe für die Bestimmung der inneren Oberfläche an die Messapparatur angeschlossen.

4 Messmethoden

4.1 Bestimmung der Gas- und Wasserpermeabilität

Die Permeabilitäten wurden in einer Hasslerzelle (siehe Schemazeichnung in der Abb. 4.1) ermittelt. Die Proben mit einer Länge von ca. 10 cm und einem Durchmesser von ca. 5 cm wurden in einem Gummijackett in die Zelle eingebaut. Zur Verhinderung von Randläufigkeiten wurde ein radialer Manteldruck aufgegeben, der mindestens 0,1 MPa höher war als der jeweilige Fluidinjektionsdruck. Der Injektionsdruck wurde mit Druckaufnehmern und die Fließrate mit Massenflussmessern ermittelt. Bei sehr geringen Flüssen erfolgte die Ermittlung der Fließrate durch Verdrängung einer Wassersäule in einer skalierten Bürette. Das Schema des Versuchsaufbaus ist in Abb. 4.2 dargestellt

Zur Bestimmung der Gaspermeabilitäten wurden die Proben axial mit Stickstoff durchströmt. Die Flasche mit Wasser bzw. mit Lauge wurde zur Befeuchtung des Messgases bei der Bestimmung der Permeabilität in Abhängigkeit von der Gasfeuchte sowie bei der Bestimmung der Zweiphasenflussparameter verwendet. Die Messung mit wasserdampfgesättigtem Gas bei den Zweiphasenflussuntersuchungen war notwendig, um ein Austrocknen der Proben durch Wasseraufnahme des Gases zu vermeiden.

Zur Bestimmung der Wasserpermeabilitäten mussten die trockenen Proben mit Wasser aufgesättigt werden. Die Untersuchungen erfolgten an den Proben, an denen auch vorher die Gaspermeabilitäten bestimmt worden sind. Zur Aufsättigung der Proben wurde an die eine Kernseite eine Vakuumpumpe angeschlossen und der Porenraum der Proben evakuiert. Dann erfolgte die Sättigung der Proben durch Injektion von Wasser in den evakuierten Porenraum. Hierzu wurde das Wasser über ein Gaspolster (Stickstoff) aus einer Flasche verdrängt und auf die Probe aufgegeben (siehe Versuchsaufbau Abb. 4.2). Der Druck des Gaspolster entsprach dem Wasserinjektionsdruck. Der Vorteil dieses Verdrängungsverfahrens gegenüber Pumpen besteht darin, dass ein pulsationsfreier Fluss erzeugt werden kann. Nach Erreichen eines stationären Wasserflusses wurde die Wasserpermeabilität ermittelt.

Zur Ermittlung der effektiven Porosität wurde das Wasservolumen mittels Wägung aus der aufgenommenen Wassermenge und der Dichte des Wassers (1 g/cm^3) bestimmt (siehe auch Abschnitt 2.6).

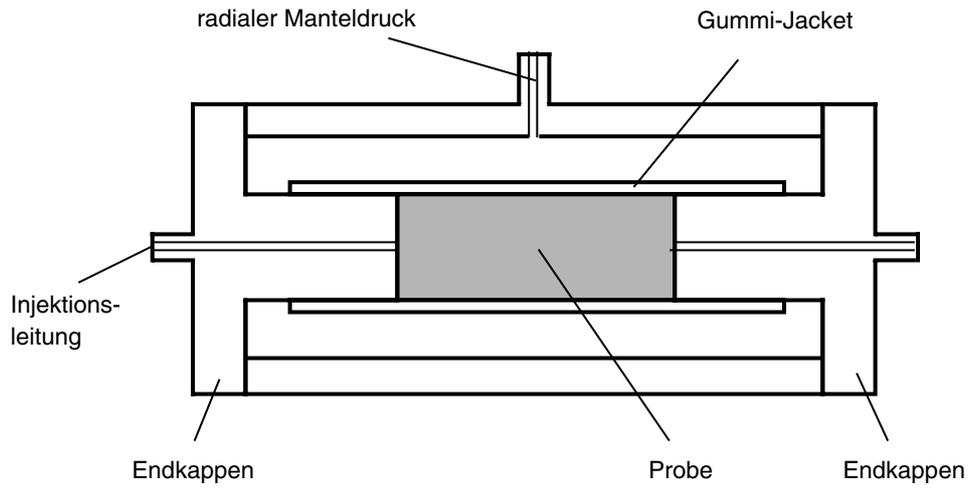


Abb. 4.1 Schema der Hasslerzelle.

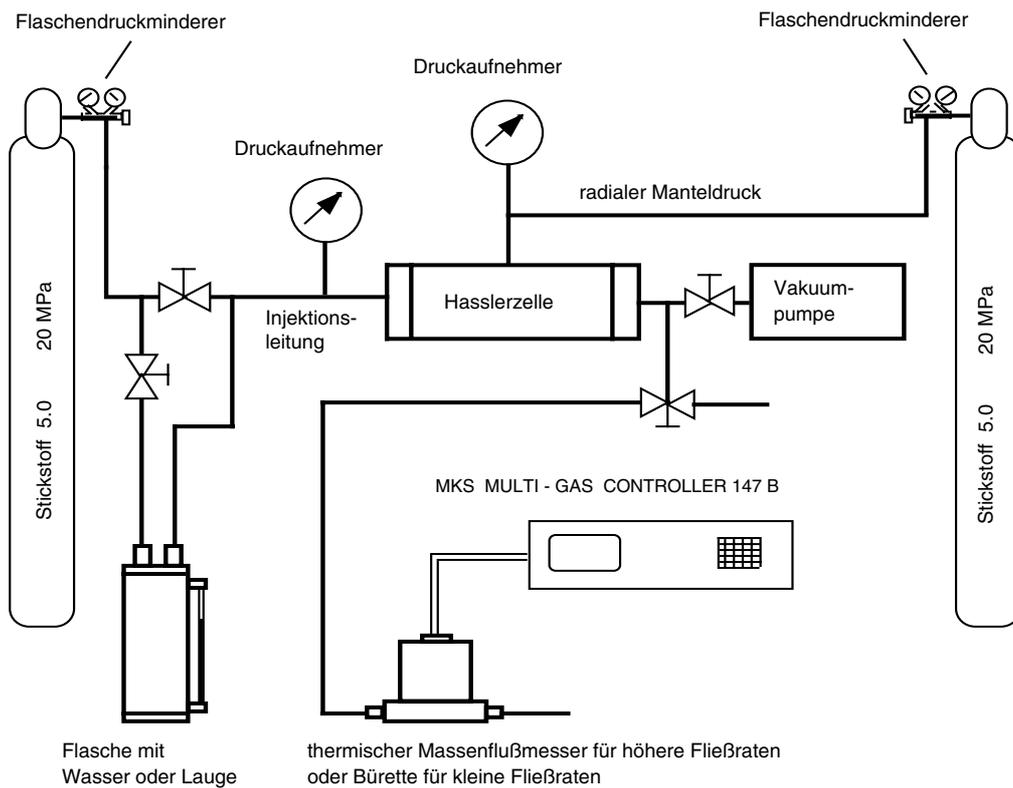


Abb. 4.2 Schema des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Gaspermeabilität, der Wasserpermeabilität und der Zweiphasenflussparameter.

4.2 Bestimmung der effektiven Gaspermeabilität und des Kapillardruckes in Abhängigkeit von der Wassersättigung

Für die nachfolgenden Untersuchungen ist das Wasser die benetzende und das Gas (Stickstoff) die nichtbenetzende Phase.

Bei der "Konstant-Druck-Entsättigungs"-Methode wird die eine im Porenraum vorhandene Phase durch die jeweils andere Phase verdrängt.

Bei der Drainage ist der Porenraum vollständig mit der benetzenden Phase gesättigt. Die effektive Gaspermeabilität und der Kapillardruck wurden durch Verdrängung des Wassers durch das Gas bestimmt. Beginnend mit einem kleinen Gasinjektionsdruck wird das Wasser zunächst aus den weiten Poren verdrängt. Mit größer werdenden Injektionsdrücken werden immer kleinere Poren entsprechend den Kapillardrücken entsättigt. Nachdem nur noch die verdrängende, nichtbenetzende Gasphase fließt und sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, wird mit Kenntnis des Injektionsdruckes und der Fließrate für die verdrängende Gasphase die effektive Gaspermeabilität nach Darcy gemäß Gl. (2.1) berechnet. Unter Berücksichtigung der absoluten Permeabilität ergibt sich dann die zu dem jeweiligen Sättigungszustand gehörige relative Permeabilität der verdrängenden Phase nach Gl. (2.4). Der Sättigungszustand lässt sich aus der Menge des verdrängten Wassers bestimmen. Bei geringem Fluss wurde die Fließrate des Gases mittels skaliertes Büretten durch Verdrängen von Wasser gemessen, bei höheren Fließraten wurde diese mittels Massenstrommesser bestimmt. Die Ermittlung der Sättigung der Proben erfolgte durch Wägung. Hierzu mussten die Proben vom Injektions- und Manteldruck entlastet werden, und die ganze Apparatur mit der Probe wurde gewogen. Aus der Massendifferenz zwischen der Apparatur mit der trockenen Probe und der Apparatur mit der gesättigten Probe nach der Aufsättigung und der Permeabilitätsmessung ergibt sich die aufgenommene Wassermenge. Ausgehend von diesem Wert wird die nach jedem Entsättigungsschritt im Porenraum verbliebene Wassermenge ebenfalls wieder durch Wägung der Apparatur mit Probe ermittelt.

Die Sättigung S errechnet sich aus dem im Porenraum verbliebenen Wasservolumen V_w und dem Porenvolumen V_{por} gemäß:

$$S = \frac{V_w}{V_{por}} \quad (4.1)$$

mit:

S	Sättigung	-
V_w	Wasservolumen im Porenraum	cm^3
V_{por}	Porenvolumen	cm^3

Bei dieser Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass nach dem Sättigungsvorgang und der Wasserpermeabilitätsmessung ein vollständig gesättigter Porenraum vorliegt, und somit das aufgenommene Wasservolumen dem Porenvolumen entspricht. Zur Ermittlung der effektiven Gaspermeabilitäten bei abnehmender Wassersättigung wurde der Injektionsdruck des Gases stufenweise erhöht. Die ermittelten relativen Permeabilitäten werden als Funktion der Sättigung dargestellt.

Parallel zur Ermittlung der effektiven Gaspermeabilität wurde der Kapillardruck für die gleichen Sättigungsstufen bestimmt, da der Gasinjektionsdruck dem Kapillardruck entspricht, wenn keine Verdrängung des Wassers mehr erfolgt und der Gasfluss stationär ist.

Ausgehend von einem niedrigen Injektionsdruck, der oberhalb des kapillaren Sperrdruckes liegt, wird das Gas (Stickstoff) in den Porenraum gepresst und verdrängt das Wasser entsprechend dem Injektionsdruck. Nachdem nur noch Gas fließt und kein Wasser mehr aus dem Probekörper verdrängt wird, wird der Injektionsdruck erhöht, um so weitere engere Fließkanäle bzw. Poren zu entsättigen. Die jeweils verdrängte Flüssigkeitsmenge wird gravimetrisch mittels Wägung, wie oben beschrieben, bestimmt. Diese Vorgänge werden so lange wiederholt, bis ein Injektionsdruck erreicht ist, bei dem keine Flüssigkeit mehr aus dem Probekörper austritt. Die zu jedem Sättigungszustand gehörigen Druckwerte werden gegen die Sättigung aufgetragen und so die Kapillardruckkurve aufgenommen.

Die Verdrängung des Wassers durch das Gas wurde mit einem Injektionsdruck von 0,01 MPa (Überdruck) begonnen.

4.3 Auswertung der Messergebnisse zu den Permeabilitäten und Kapillardrücken

Die in Kapitel 2.4 beschriebenen Relationen nach den Modellen von Brooks/Corey bzw. van Genuchten sollen mit geeigneten Parameterwerten an die experimentell in

Abhängigkeit von der Wassersättigung ermittelten relativen Wasserpermeabilitäten und Kapillardrücke angepasst werden. Die Bestwerte für die Parameter in den Relationen (2.7) bis (2.12) können durch Kurvenanpassung mit den Methoden der nichtlinearen Regressionsanalyse ermittelt werden. Für das BC-Modell sind das mit λ und p_d zwei und für das vG-Modell mit α , n , m drei Parameter. Sind auch die Restwasser- und Restgassättigung S_{rw} und S_{rg} unbekannt, erhöht sich die Zahl der zu bestimmenden Parameter auf 4 bzw. 5.

Die Anpassung der Kurven an die Messdaten erfolgt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Dazu sind für die relativen Permeabilitäten und die Kapillardrücke die Quadratsummen der Differenzen zwischen den Messwerten k_{gi} und p_{ci} und den entsprechenden Werten $k_{g,i}^{BC,vG}$ und $p_{c,i}^{BC,vG}$ der angepassten Funktionen (2.7) und (2.10) bzw. (2.8) und (2.11) zu minimieren. Hierbei bezeichnet $i=1,2,3\dots$ den Index der einzelnen Messpunkte. Da diese Gleichungen und die Beziehung (2.6) für die effektive Sättigung bezüglich der anzupassenden Parameter nichtlinear sind, ergeben sich nichtlineare Bestimmungsgleichungen für die Bestwerte der Parameter, die mit einem geeigneten Iterationsverfahren zu lösen sind.

Da die Parameter λ und m sowohl in der Permeabilitäts-Sättigungsbeziehung als auch in der Kapillardruck-Sättigungsbeziehung auftreten, müssen die Regressionen für p und k gleichzeitig durchgeführt werden. Daher sind die Differenzen auf die arithmetischen Mittelwerte $\bar{p}_{c,i}$ und $\bar{k}_{g,i}$ der Messwerte zu normieren, um die unterschiedlichen Dimensionen und Messbereiche zu kompensieren. Für die BC- und vG-Beziehungen ergeben sich dann die Quadratsummen SSR^{BC} bzw. SSR^{vG} der normierten Residuen zwischen den Mess- und den Fitwerten:

$$SSR^{BC}(\lambda, p_d, S_{rw}, S_{rg}) = \sum_i \left(\frac{k_{g,i} - k_g^{BC}(\lambda, S_{w,i})}{\bar{k}_{g,i}} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{p_{c,i} - p_c^{BC}(p_d, \lambda, S_{w,i})}{\bar{p}_{c,i}} \right)^2 \quad (4.2)$$

$$SSR^{vG}(\alpha, m, n, S_{rw}, S_{rg}) = \sum_i \left(\frac{k_{g,i} - k_g^{vG}(m, S_{w,i})}{\bar{k}_{g,i}} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{p_{c,i} - p_c^{vG}(\alpha, m, n, S_{w,i})}{\bar{p}_{c,i}} \right)^2 \quad (4.3)$$

Der erste Term in beiden Bestimmungsgleichungen (4.2) bzw. (4.3) für SSR ist die Quadratsumme der normierten Residuen der k -Werte und der zweite die der normier-

ten Residuen der p_c -Werte. In der nichtlinearen Regressionsanalyse ergeben sich die Bestwerte für die Parameter α_0, m_0, \dots über die Bedingung, dass SSR mit diesen minimiert wird. Zum Ausschluss physikalisch unmöglicher Lösungen können noch Nebenbedingungen wie $S_{rw}, S_{rg}, p_d > 0$ und $0,2 < \lambda < 3$ gestellt werden. Die Regressionsanalysen wurden mit der Minfehl-Funktion aus dem Softwarepaket MATHCAD-8 /MAT 98/ durchgeführt, die den Marquard-Levenberg-Algorithmus als Lösungsverfahren benutzt.

Das hier beschriebene Verfahren liefert aber nur dann brauchbare Lösungen, wenn:

- a) das gewählte Modell geeignet ist, die gemessenen Kurvenverläufe wiederzugeben,
- b) Daten in ausreichender Anzahl vorliegen, d. h. die Zahl der Daten möglichst ein mehrfaches der Anzahl der anzupassenden Parameter beträgt,
- c) die Daten den Bereich der Sättigung möglichst gleichmäßig abdecken,
- d) die Messgenauigkeit aller Daten über den Messbereich gleich ist und
- e) bei der Verwendung von Messdaten von verschiedenen Proben davon ausgegangen werden kann, dass deren relative Permeabilitäten, Kapillardrücke und Restsättigungen nicht signifikant unterschiedlich sind.

In den Experimenten musste die Wassersättigung der Proben indirekt über den Injektionsdruck eingestellt werden. Dabei stellte sich heraus, dass dabei keine S_w -Werte in dem Bereich zwischen 0,3 und 0,7 einzustellen waren, d. h. die Bedingung (c) unzureichend erfüllt war. Daher wurde alternativ auch eine visuelle Anpassung der Kurven an die Messdaten vorgenommen, d. h. die Werte der Parameter wurden so lange verändert, bis eine gleichmäßige Annäherung an alle Messpunkte einer Probe erzielt wurde.

Außerdem haben sich bei verschiedenen Proben mit identischer Spezifikation unterschiedliche Restsättigungen ergeben, d. h. die Bedingung (d) war nicht erfüllt. Daher war eine gemeinsame Regression der Daten von allen gleichartigen Proben nach der Wassersättigung S_w nicht möglich.

4.4 Bestimmung der Gasdiffusion

Die Gasdiffusion durch die Sand/Ton-Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktion im trockenen und wassergesättigten Zustand wurde in der in Abb. 4.3 dargestellten Messzelle untersucht. Die Präparation der Proben ist in Kap. 3.2 beschrieben. Die Messzelle wurde horizontal aufgestellt und der Probeneingang mit 3 ml des Gasgemisches (bestehend aus je 25 % Wasserstoff, Helium, Methan und Kohlendioxid) gespült. Der Probenausgang wurde in gleicher Weise mit 3 ml Laborluft aus einer Membranpumpe gespült. Da an beiden Enden der Probe die Strömungsanordnung sowie die Volumenströme gleich waren, war gewährleistet, dass zwischen den beiden Gasvolumina und innerhalb der Probe kein Druckgefälle herrschte. Die Gasvolumenströme an beiden Enden der Probe wurden über Nadelventile reguliert und mit Schwebekörperdurchflusszählern kontrolliert.

Im austretenden Spülstrom des Probenausgangs wurde mit einem Massenspektrometer die Konzentration der im Probeneingang aufgegebenen Komponenten bestimmt und daraus dann nach dem 1. Fick'schen Gesetz (siehe Kap. 2.5) die Diffusionskonstante berechnet.

Die Messungen wurden an trocken gepressten sowie an wassergesättigten Proben durchgeführt. Um die Wassersättigung zu erreichen, wurden beide Enden der Probe mit Wasser gespült und über 24 Stunden ein leichter Überdruck von 0,01 MPa aufrechterhalten. Die dünnen Proben waren dann wassergesättigt. Für die Diffusionsmessungen wurde der Gasstrom, der an beide Enden der Messzelle angelegt wurde, über Gaswaschflaschen mit Wasser aufgesättigt, um eine Austrocknung der Probe zu verhindern.

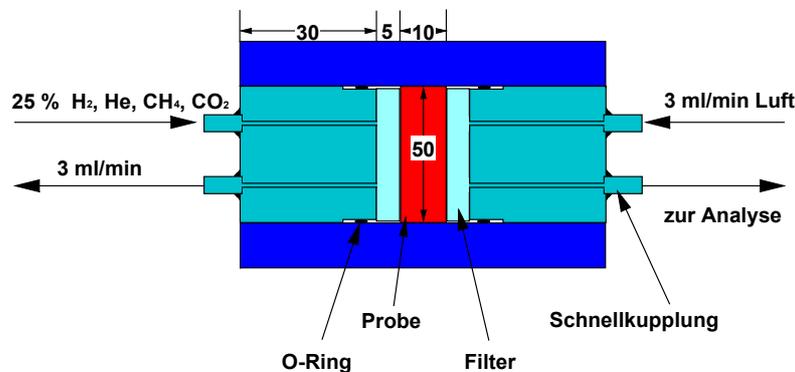


Abb. 4.3 Messzelle zur Bestimmung der Gasdiffusionskonstanten.

4.5 Bestimmung der inneren Oberfläche

Die Bestimmung der inneren Oberfläche wurde im Unterauftrag am Institut für Angewandte Geowissenschaften II der Technischen Universität Berlin mit der Messapparatur "GEMINI 2360 Surface Area Analyzer" der Firma Micromeritics bestimmt /DEB99/. Diese Apparatur ist standardmäßig mit zwei gleich großen Büretten ausgestattet, von denen die eine als Probegefäß und die andere als Vergleichsgefäß verwendet wird. Bei der Bestimmung der inneren Oberfläche werden beide Gefäße, das Probegefäß mit der präparierten Probe (siehe Kap. 3.3) und das Vergleichsgefäß mit Stickstoff bei einer Temperatur von 77 K bis zu einem vorgegebenen Druck geflutet und die für jede Bürette benötigte Stickstoffmenge getrennt gemessen. Aus den Volumina der beiden Büretten und der eingesetzten Probe lässt sich die von der Probe auf der inneren Oberfläche adsorbierte Stickstoffmenge berechnen und mit dem Platzbedarf der Stickstoffmoleküle auf die Oberfläche gemäß Gl. (2.21) umrechnen. Die Messung wird mit fünf unterschiedlichen Bürettendrücken zwischen $0,1 < p / p_0 < 0,3$ durchgeführt. Hierbei ist p_0 der Sättigungsdampfdruck des verwendeten Kühlstickstoffs.

Für die Bestimmung der inneren Oberfläche großer Gesteinsvolumina wurde ein größeres Probengefäß eingesetzt. Das hierbei vorhandene größere Totvolumen wurde durch Glasfüller ausgeglichen. Für die festen Proben wurden große Bruchstücke im großen Probengefäß und zusätzlich kleine Bruchstücke im kleinen Probengefäß gemessen, um eventuelle Inhomogenitäten in den Proben zu erfassen.

5 Ergebnisse und Interpretation

Untersucht wurden die Einphasen-Gas-, die Einphasen-Wasser- sowie die Zweiphasen- Gas-/Wasser-Permeabilitäten an Proben mit unterschiedlichen Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und Kompaktionsdrücken (siehe Kap. 3) sowie zum Vergleich natürliche Tonsteinproben aus den Untertagelaboren HADES in Mol/Belgien sowie Mont Terri in der Schweiz.

An den im Labor präparierten Proben mit Sand/Ton-Mischungsverhältnissen von 90/10, 75/25 und 50/50 wurden zunächst aus der Gesamtdichte der Probe und den Korndichten der Komponenten die Porosität gemäß Gl. (2.19) berechnet. Die so bestimmten Porositäten lagen bei den Proben mit einem Tonanteil von 10 % bei 21 bis 21,6 %, einem Tonanteil von 25 % bei 20,4 bis 21,2 % und einem Tonanteil von 50 % bei 21,7 bis 22,6 % (siehe Tab. 5.1). Für die Bestimmung der Wasser- und Zweiphasen- Permeabilitäten mussten die Proben vollständig mit Wasser gesättigt werden. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass bei Vollsättigung das aufgenommene Wasservolumen dem Porenvolumen entspricht, woraus dann ebenfalls die Porositäten der Proben ermittelt werden konnten. Die Porosität belief sich bei den Proben mit 10 % Tonanteil auf 21,8 % bis 24,7 %. Bei den Proben mit 25 % Tonanteil ergaben sich Werte von 23,5 % und 25,2 % (siehe Tab. 5.1).

Die aus dem aufgenommenen Wasservolumen berechneten Porositäten fallen höher aus, als die aus den Dichten ermittelten Porositäten, wobei der Unterschied bei den Proben mit dem höheren Tonanteil größer ausfällt. Dies kann vermutlich auf Einlagerungen von Wasser in die Zwischenschichten des Tons zurückgeführt werden. Bei den Proben mit 50 % Tonanteil konnte eine derartige Porositätsbestimmung nicht vorgenommen werden, da diese Proben selbst bis zu einem Injektionsdruck von 5 MPa nicht aufgesättigt werden konnten. Die nach den beiden Methoden bestimmten Porositäten sind in der Tab. 5.1 zusammengefasst.

Die Messwerte Einphasen-Gaspermeabilitäten, Einphasen-Wasserpermeabilitäten sowie der Zweiphasen-Gas/Wasserpermeabilitäten für alle untersuchten Proben sind im Anhang Kapitel 8 zusammengestellt.

5.1 Einphasenfluss von Gas in Sand/Tongemischen

An den Sand/Ton-Proben wurde die Gaspermeabilität für unterschiedliche

- ` triaxiale Einspanndrücke,
- ` relative Feuchten des durchströmenden Gases,
- ` Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke,
- ` Injektionsdrücke bei konstanter Druckdifferenz zwischen Injektions- und Einspanndruck (Klinkenberg Korrektur)

durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen in einem Endlager anzutreffenden potenziellen Parametervariationen zu ermitteln.

In Abb. 5.1 ist für eine Probe mit einem Sand/Ton-Mischungsverhältnis 90/10 und einem Kompaktionsdruck von 50 MPa die Permeabilität in Abhängigkeit von der Zeit (bis 340 Stunden) für die Einspanndrücke 0,5, 1,0 und 2,0 MPa aufgetragen. In Abb. 5.2 sind die Permeabilitäten für Proben mit unterschiedlichen Sand/Ton-Mischungsverhältnissen im Bereich zwischen 100/0 (reiner Bausand) bis 50/50 und unterschiedlichen Kompaktionsdrücken aufgetragen.

Aus diesen beiden Darstellungen geht hervor, dass die Gaspermeabilität im Bereich von $6 \cdot 10^{-14}$ bis $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ liegt und nahezu unabhängig vom Mischungsverhältnis, dem Kompaktionsdruck und dem Einspanndruck ist. Die Permeabilität wird offensichtlich weniger durch den Tonanteil sondern mehr durch den Stützkörper des Sandes bestimmt. In den Tab. 8.5-15 bis Tab. 8.5-25 sind die Messwerte von weiteren 11 untersuchten Proben mit gleichem Verhalten zusammengestellt.

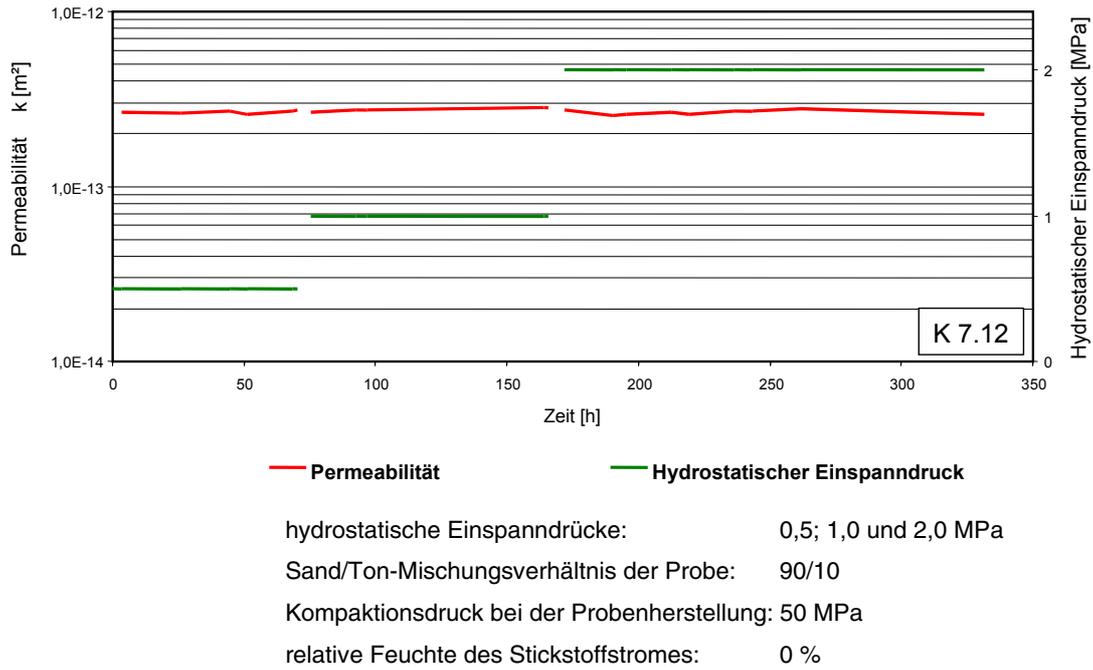


Abb. 5.1 Gaspermeabilität als Funktion der Zeit.

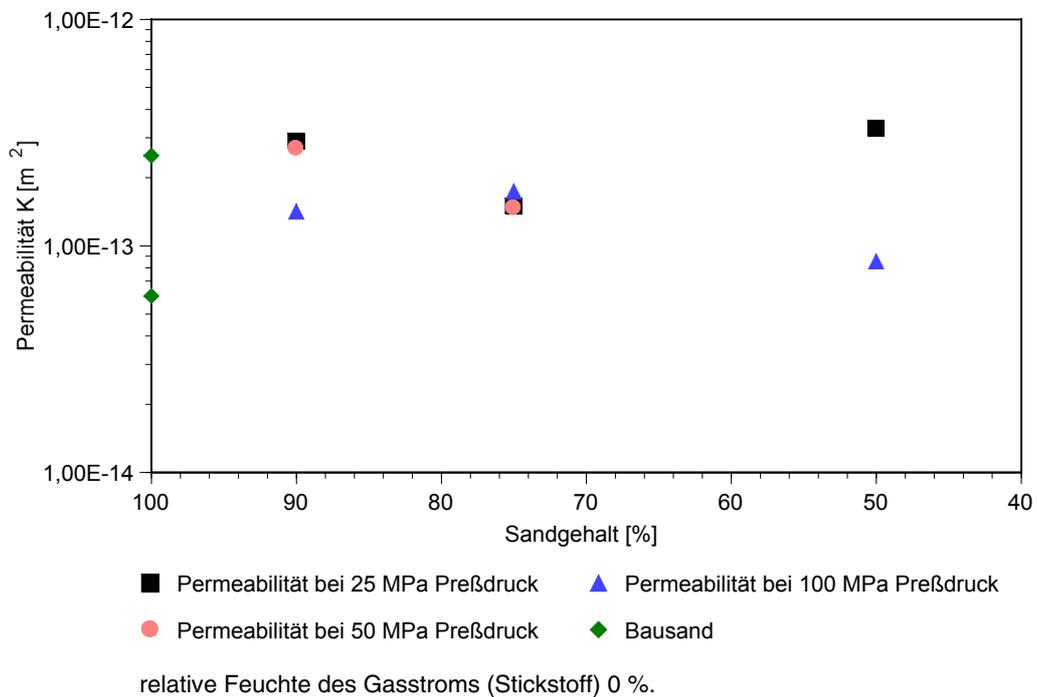
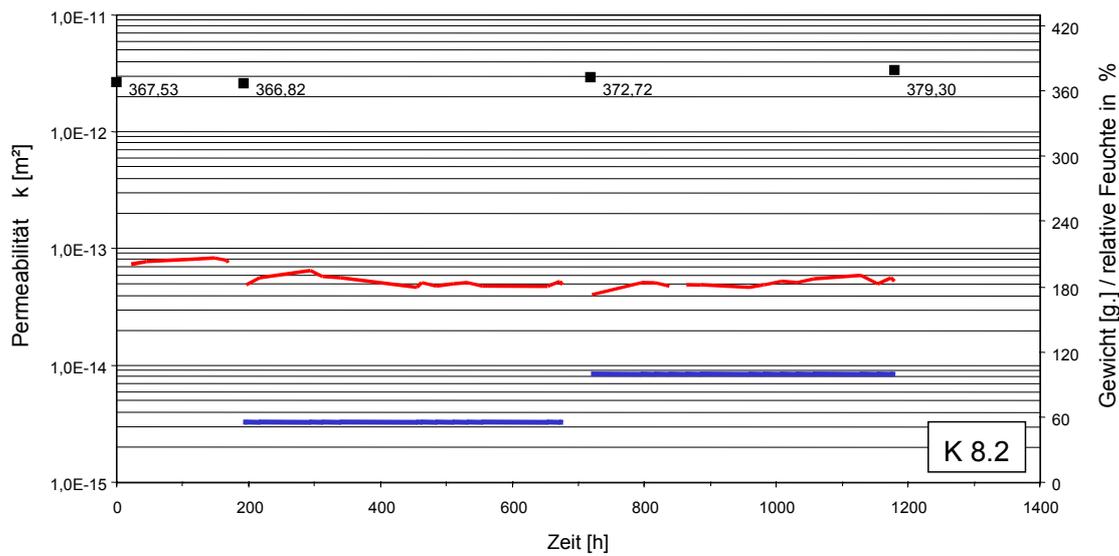


Abb. 5.2 Gaspermeabilität der trockenen Proben in Abhängigkeit von den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und den Kompaktionsdrücken bei der Probenherstellung.

Da in einem Endlager die Gase, die einen Versatzkörper oder ein Abschlussbauwerk durchströmen, in Abhängigkeit von den Grubenlaugen und den anstehenden Mineralen sehr unterschiedliche relative Feuchten haben werden, wurde der Einfluss der Gasfeuchte auf die Permeabilität untersucht. In Abb. 5.3 ist das Ergebnis dieser Untersuchung für eine Probe mit dem Mischungsverhältnis Sand/Ton 75/25 und den relativen Stickstofffeuchten 0,55 und 100 % sowie die Gewichte der Probe am Ende jeder Feuchtestufe aufgetragen. Bei der Durchströmung der Probe mit trockenem Stickstoff über 180 Stunden ergab sich eine Gewichtsabnahme von 0,71 g und bei der Durchströmung mit Stickstoff der relativen Feuchte von 55 bzw. 100 % über jeweils 500 Stunden eine Gewichtszunahme von 5,9 bzw. 6,58 g infolge Wasseraufnahme. In den Tab. 8.5-1 bis Tab. 8.5-13 sind die Messwerte der einzelnen untersuchten Proben und in Tab. 8.5-14 sind die Mittelwerte der 13 untersuchten Proben zusammengestellt. Daraus geht ebenfalls hervor, dass die Permeabilitäten im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-14} m² liegen und sich durch die aus dem Stickstoff adsorbierte Feuchte nicht signifikant verändern. Im trockenen Stickstoffstrom geben die Proben das auf den Grenzschichten des Tones gebundene Wasser z. T. ab. Aus dem feuchten Stickstoffstrom wird andererseits nur ein Teil des angebotenen Wassers von der Probe aufgenommen.

Bei diesen Untersuchungen wurden die Proben über Zeiträume von 1000 bis 2000 Stunden mit Gasmengen von 1 bis 3 m³ durchströmt. Die Gasmenge von 1 m³, mit der die Probe von 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge durchströmt worden ist, entspricht in einem Endlager bei einem Abschlussbauwerk mit einem Durchmesser von 5 m und einer Länge von 10 m einer Gasmenge von 10⁶ m³. In einem Endlager wird demzufolge ein Abschlussbauwerk, das mit dieser wassergesättigten Gasmenge, die etwa den Resthohl- und Porenräumen des Endlagers entspricht, seine Permeabilität nicht signifikant ändern. Im Normalbetrieb, wenn die Versatzkörper bzw. die Abschlussbauwerke keinen direkten Kontakt mit Wasser oder Lauge haben, werden diese technischen Barrieren permeabel bleiben und es wird zu keinem Druckaufbau infolge Gasproduktion aus den Abfällen oder der Hohlraumkonvergenz in einem Endlager kommen.



— Permeabilität — relative Feuchte ■ Gewicht

Sand/Ton-Mischungsverhältnis der Probe	75/25
Kompaktionsdruck bei der Probenherstellung	50 MPa
hydrostatischer Einspanndruck der Probe	0,5 MPa

Abb. 5.3 Gaspermeabilität als Funktion der Zeit für die relativen Feuchten des Stickstoffstroms vom 0, 55 und 100 %.

Zur Ermittlung der wahren, d. h. der nach Klinkenberg korrigierten Permeabilität (Eliminierung des Einflusses der Gleitströmung auf den Porenoberflächen) wurde der Gasinjektionsdruck variiert. In Abb. 5.4 ist die in Kap. 2.1 beschriebene Klinkenbergkorrektur mit der wahren Permeabilität k_{∞} am Beispiel einer Probe mit dem Sand/Ton-Mischungsverhältnis 90/10 dargestellt. Die korrigierten Permeabilitäten lagen für die untersuchten Proben im Bereich von 10^{-14} bis 10^{-13} m^2 .

Da eine Variation des Gasinjektionsdruckes bei den teilgesättigten Proben bereits zur Sättigungsänderungen führt, konnte bei der Untersuchung der Zweiphasenpermeabilität keine Korrektur nach Klinkenberg vorgenommen werden. Für diese Untersuchungen wurde daher als absolute Permeabilität die mittlere Gaspermeabilität eingesetzt, die sich aus den gemessenen Permeabilitäten auf jeder Druckstufe nach Einstellen eines stationären Flusses berechnete. Die so berechneten mittleren Permeabilitäten gemäß den Tab. 8.5-26 bis Tab. 8.5-35 im Anhang ergaben sich zu $2,9 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ bis $3,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ für die Proben mit 10 % Tonanteil. Die gemittelten Gaspermeabilitäten der

Ton-/Sand-Mischungen mit 25 % Tonanteil lagen bei Werten zwischen $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ und $4,1 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Bei den Proben mit dem höchsten Tonanteil von 50 % ergaben sich mittlere Gaspermeabilitäten von $7,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ bis $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

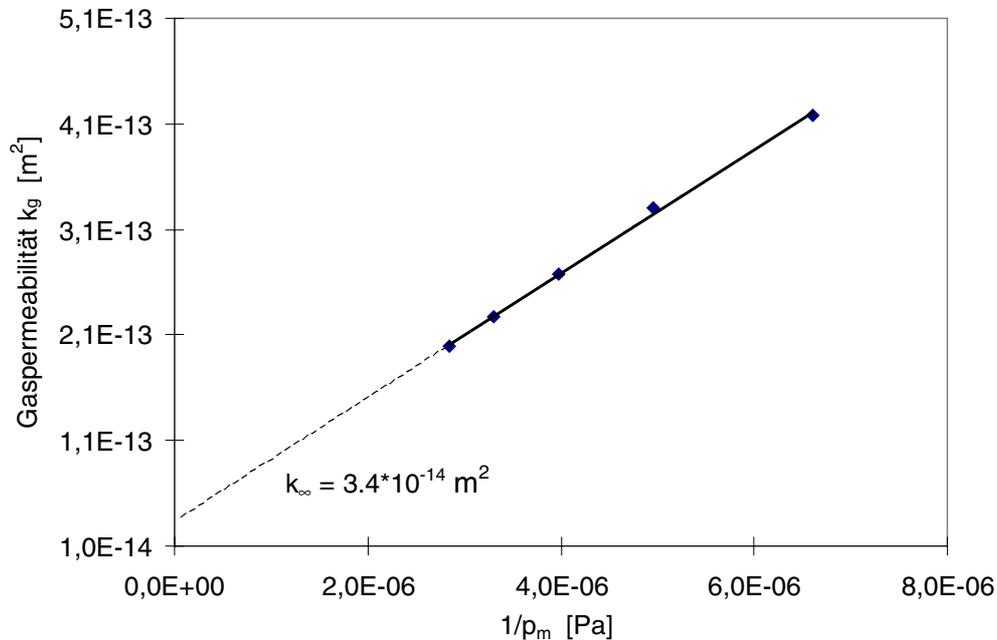


Abb. 5.4 Klinkenberg-Korrektur am Beispiel der Probe 90/10.7.8.

5.2 Einphasenfluss von Wasser in Sand/Tongemischen

Zur Bestimmung der Wasserpermeabilitäten wurden die Proben in der Mantel-druckzelle evakuiert und anschließend mittels Druckinjektion mit Wasser aufgesättigt. Nachdem sich ein stationärer Wasserfluss eingestellt hatte, wurden die Einphasen-Wasserpermeabilitäten ermittelt. Hierbei ergaben sich für die Proben mit 10 % Tonanteil Wasserpermeabilitäten von $5,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bis $7,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$. Die Proben mit dem höheren Tonanteil wiesen niedrigere Wasserpermeabilitäten auf. So ergaben sich für die Proben mit 25 % Tonanteil Werte für die Wasserpermeabilitäten von $1,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $2,4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den Tab. 8.5-26 bis Tab. 8.5-35 im Anhang zusammengestellt.

Bei den Proben mit 50 % Tonanteil zeigte es sich, dass diese nicht mit Wasser gesättigt und somit auch keine Wasserpermeabilitäten bestimmt werden konnten. Offenbar führt der Kontakt mit Wasser zu einem Quellen des Tons in den Proben und damit einem Abdichten der Proben.

5.3 Zweiphasenfluss von Gas und Wasser in Sand/Tongemischen

Für die Ermittlung der sättigungsabhängigen effektiven Gaspermeabilitäten und Kapillardrücke wurde die Entsättigung der Proben beginnend mit kleinen Injektionsdrücken von 0,01 bzw. 0,03 MPa Überdruck vorgenommen. Nachdem sich bei der jeweiligen Entsättigungsstufe ein konstanter Gasfluss eingestellt hatte, wurde die zu dieser Sättigungsstufe gehörige effektive Gaspermeabilität bestimmt und die verdrängte Wassermenge durch Wägung ermittelt. Für die Berechnung der relativen Gaspermeabilität wurde die mittlere Einphasen-Gaspermeabilität eingesetzt, da zum einen während des Entsättigungsversuchs keine Klinkenbergkorrektur möglich ist, und zum anderen die Verwendung der nach Klinkenberg korrigierten Gaspermeabilität teilweise zu relativen Permeabilitäten $\gg 1$ geführt hätten.

Messungen zur Ermittlung der effektiven Gaspermeabilitäten bzw. der relativen Gaspermeabilitäten sowie des Kapillardruckverlaufs konnten lediglich an den Sand/Ton-Proben mit den Mischungsverhältnissen 90/10 und 75/25 vorgenommen werden. Wie bereits oben beschrieben, war eine Aufsättigung der Proben mit dem Tonanteil von 50 % nicht möglich.

Für die Proben mit dem höheren Sandanteil (90 %) war ein messbare Durchströmung bereits bei einem Injektionsdruck von ca. 0,03 MPa bzw. 0,05 MPa zu beobachten. Die Ergebnisse (Abb. 5.8 und 5.9) zeigen, dass bereits am Anfang bei geringen Gasinjektionsdrücken offensichtlich die größte Sättigungsreduzierung auftritt. Dies macht sich besonders in der langen Plateauphase in der Kapillardruck-Sättigungsbeziehung bemerkbar. Bei Erhöhung der Injektionsdrücke wird nur noch eine geringfügige Entsättigung der Probe erreicht. Dieses Verhalten deutet auf einen Porenraum mit größeren Porenradien mit nur wenig unterschiedlichen Porengrößen hin.

Bei den Proben mit höherem Tonanteil 25 % traten die ersten Gasflüsse bei 0,05 MPa und 0,2 MPa auf. Bei diesen Messungen ist kein ausgeprägtes Plateau bei den Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen zu beobachten. In einem Sättigungsbereich von 80 %

bis 90 % ist bei zwei Proben ein starkes Ansteigen des Kapillardruckes zu verzeichnen. Bei einer der beiden Proben mit einem Sand/Ton-Anteil vom 75/25 trat eine messbare Durchströmung erst ab einem Injektionsdruck von 0,2 MPa auf. Die Sättigung betrug hier 96,1 %. Eine Erhöhung des Injektionsdruckes auf 0,5 MPa führte zu einer stetigen Zunahme des Gasflusses, ohne dass sich ein stationärer Fluss einstellte. Als eine effektive Gaspermeabilität von ca. $7,7 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ erreicht war, wurde der Versuch abgebrochen. Die sich bis dahin eingestellte Sättigung betrug ca. 29 %.

Die vorliegenden Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei den Proben mit den geringeren Tonanteilen Poren mit größeren Porenradien vorliegen. Die Restwassersättigungen sind bei den tonhaltigeren Proben offensichtlich höher.

Tab. 5.1 Zusammenstellung der Porositäten und Einphasenpermeabilitäten dreier Sand/Ton-Mischungen, Kompaktionsdruck 100 MPa

Korndichte der Mischungen 90/10: $\rho_k = 2,62 \text{ g/cm}^3$
 Korndichte der Mischungen 75/25: $\rho_k = 2,59 \text{ g/cm}^3$
 Korndichte der Mischungen 50/50: $\rho_k = 2,54 \text{ g/cm}^3$

Probe	Gesamtdichte	Gesamtporosität aus den Dichten	effekt. Porosität aus Wasseraufnahme	Klinkenberg korrigierte Permeabilität	mittlere Gaspermeabilität	Wasserpermeabilität
	ρ_g	ϕ_{Di}	ϕ_w	k_∞	k_{gm}	k_w
	g/cm^3	%	%	m^2	m^2	m^2
90/10.7.2	2,054	21,6	22,5	$8,3 \cdot 10^{-14}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-15}$
90/10.7.8	2,057	21,5	22,8	$3,4 \cdot 10^{-14}$	$2,9 \cdot 10^{-13}$	$7,7 \cdot 10^{-16}$
90/10.7.9	2,071	21,0	21,8	-	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$2,9 \cdot 10^{-16}$
90/10.7.10	2,068	21,1	24,7	-	$3,8 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-15}$
75/25.8.12*	2,041	21,2	24,8	-	$4,1 \cdot 10^{-13}$	$1,7 \cdot 10^{-17}$
75/25.8.16	2,062	20,4	23,5	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-18}$
75/25.8.17	2,054	20,7	25,2	-	$2,6 \cdot 10^{-13}$	$7,7 \cdot 10^{-18}$
75/25.8.18	2,056	20,6	24,2	-	$2,4 \cdot 10^{-13}$	$4,9 \cdot 10^{-18}$
50/50.9.7	1,967	22,6	-	-	$7,8 \cdot 10^{-13}$	-
50/50.9.8	1,990	21,7	-	-	$1,2 \cdot 10^{-12}$	-

* Kompaktionsdruck dieser Probe: 25 MPa

5.4 Untersuchungen natürlicher Tongesteine

In Ergänzung zu den Sand/Ton-Gemischen wurden vergleichend natürliche Tonsteinproben aus den Untertagelaboren HADES in Mol (Boom Clay) und Mont Terri in der

Schweiz (Opalinus-Ton) untersucht. Die Gesteinsproben aus diesen beiden Lokalitäten waren in ihrer Beschaffenheit sehr unterschiedlich. Die Proben des Boom Clay waren dickplastisch, hatten keine sichtbare Schichtung und konnten mithilfe der einaxialen Presse problemlos plastisch verformt werden. Daraus folgt, dass im Untertagelabor HADES Hohlräume ohne standfestem Ausbau nicht offen gehalten werden können und Bohrungen für Instrumentierungen sehr schnell wieder zukonvergieren. Die Proben des Opalinus-Tons sind völlig andersartig. Sie haben eine ausgeprägte Schichtung und zeigten bei Belastung ein Bruchverhalten. Im Untertagelabor sind Hohlräume ohne Ausbau standfest und Instrumentierungsbohrungen bleiben offen.

Zur Ermittlung der Gaspermeabilität des Boom Clays wurden drei Kerne mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 100 mm untersucht. Der Gasinjektionsdruck wurde beginnend bei 0,025 MPa in Stufen von 0,05 MPa bis auf 0,475 MPa erhöht, wobei der triaxiale Einspanndruck jeweils 0,025 MPa über dem vorgegebenen Gasdruck eingestellt wurde. In zwei der Proben wurde aufgrund des Einspanndruckes und des einseitig angelegten Gasdruckes der plastische Ton in die Ausgangsleitung gedrückt. An der dritten Probe, deren Untersuchungsablauf in Abb. 5.5 dargestellt ist, zeigte sich beim triaxialen Einspanndruck von 0,4 MPa 0,5 ml und bei 0,5 MPa 0,2 ml Wasser in der abführenden Leitung. Die ausgebaute Probe hatte eine Durchmesserreduktion von etwa 1 mm. Daraus kann gefolgert werden, dass das austretende Wasser nicht durch das angelegte Gas mobilisiert, sondern aufgrund des Manteldruckes ausgepresst wurde. Diese Messungen haben gezeigt, dass die Permeabilität des Boom Clays bei Einspanndrücken bis 5 MPa und Gasinjektionsdrücken bis 4,75 MPa unterhalb der Nachweisgrenze von 10^{-22} m^2 liegt.

Vom Opalinus-Ton aus dem Untertagelabor Mont Terri wurden fünf Bohrkerne untersucht. Zunächst wurde an einem Kern die Differenz zwischen Gasinjektionsdruck und Einspanndruck konstant gehalten, wobei der Manteldruck jeweils 0,3 MPa über dem jeweiligen Injektionsdruck lag. An diesen Messungen mit einer Ausgangspermeabilität von $1,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ wurde die Klinkenbergkorrektur vorgenommen, die eine Permeabilität von $1,8 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ergab. In Abb. 5.6 sind die Messwerte und die Klinkenbergkorrektur dargestellt.

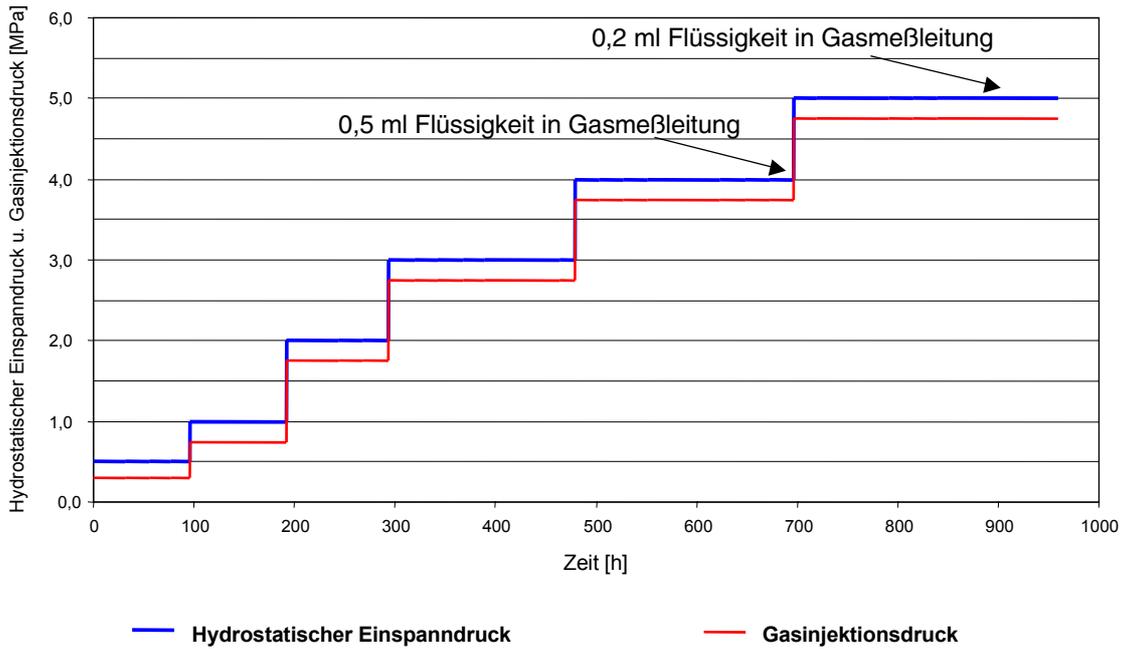


Abb. 5.5 Ermittlung der Gaspermeabilität an einem Boom Clay-Bohrkern in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation des hydrostatischen Einspanndruckes und des Gasinjektionsdruckes.

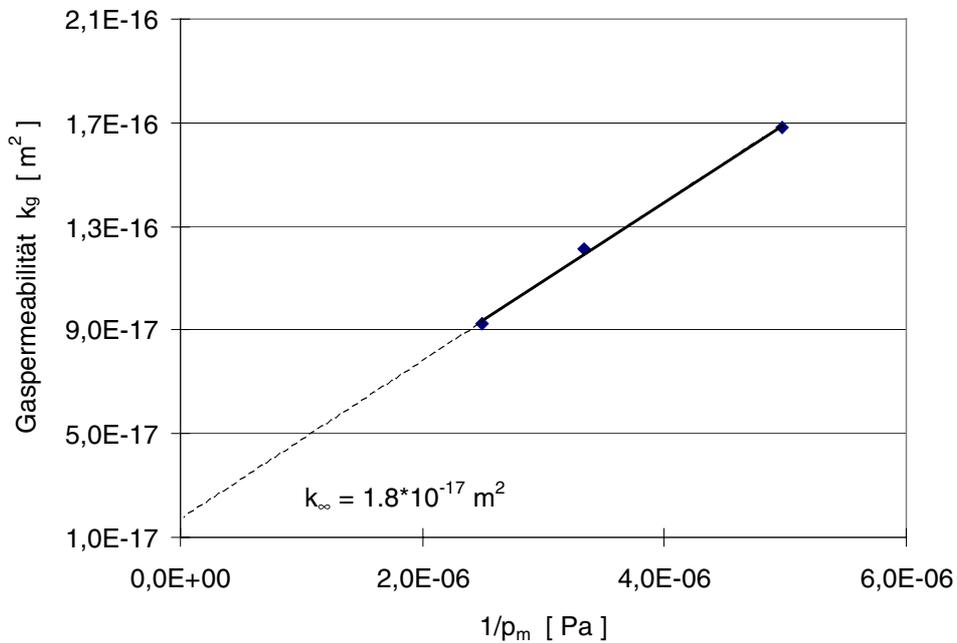


Abb. 5.6 Klinkenbergkorrektur der Gaspermeabilität an der Probe SED-B3-04 aus dem Untertagelabor Mont Terri.

Um den Einfluss des Einspanndruckes auf die Permeabilität zu ermitteln wurde an fünf verschiedenen Bohrkernen bei konstantem Gasinjektionsdruck von 0,25 MPa der Einspanndruck im Bereich zwischen 0,5 und 5,0 MPa variiert. Die Ausgangspermeabilitäten von zwei Proben betragen $0,5$ bzw. $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ und erniedrigten sich mit steigendem Einspanndruck bis auf $1 \cdot 10^{-15}$ bzw. $3 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bei 5 MPa. Die drei weiteren Proben hatten Ausgangspermeabilitäten im Bereich von 10^{-17} bis 10^{-16} m^2 und ihre Permeabilitäten verringerten sich bei 5 MPa Einspanndruck um 1 bis 3 Größenordnungen. Um festzustellen, ob diese Permeabilitätsniedrigungen reversibel sind, wurden die Ausgangswerte der Einspanndrücke von 0,5 MPa wieder eingestellt. Die Werte der Permeabilitäten erhöhten sich zwar wieder, waren aber um den Faktor 2 bis 10 niedriger als die Ausgangspermeabilitäten. Ein typischer Verlauf der Permeabilität in Abhängigkeit von der Zeit und dem jeweiligen Einspanndruck ist in Abb. 5.7 dargestellt.

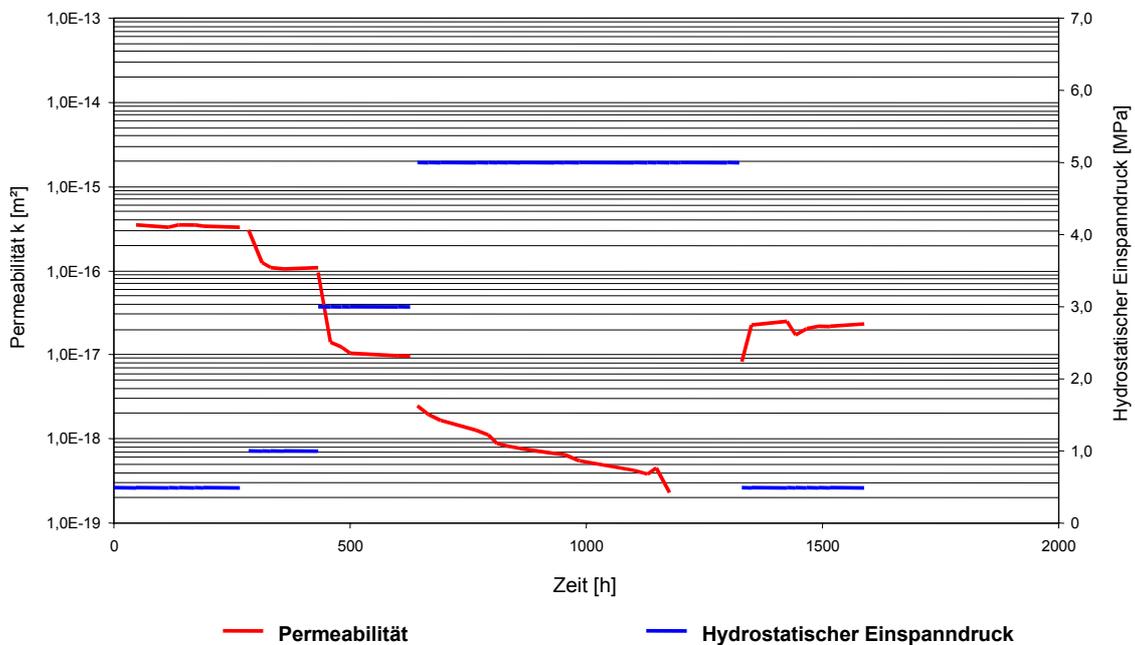


Abb. 5.7 Permeabilität an der Probe SED-B3-03 aus dem Untertagelabor Mont Terri in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Einspanndrücke zwischen 0,5 und 5 MPa.

In den Tab. 8.5-36 bis Tab. 8.5-40 sind die Messwerte der Permeabilität der fünf untersuchten Proben des Opalinus-Tons zusammengestellt. Die sehr unterschiedlichen Permeabilitäten des Opalinus-Ton aus dem Untertagelabor Mont Terri und deren Abhängigkeit von den Einspanndrücken sind in den unterschiedlichen mineralogischen

Zusammensetzungen und dem Gefüge begründet. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden diese sehr viel weiter gehenden Abhängigkeiten nicht untersucht.

Die Proben des Opalinus-Tons konnten weder mit Wasser aufgesättigt, noch konnten Wasser- bzw. Zweiphasenflusspermeabilitäten gemessen werden. Bei Kontakt mit Wasser quillt der Ton auf und verhindert somit ein weiteres Eindringen von Wasser.

5.5 Ermittlung der Zweiphasenflussparameter von Sand/Tongemischen

Die Messwerte der Wassersättigung, der relativen Permeabilität und des Kapillardruckes sind in den Tab. 8.5-26 bis Tab. 8.5-35 im Anhang aufgeführt. Diese werden für die je vier Proben mit 10 % und 25 % Tonanteil, für die wegen des Umfangs der vorhandenen Messwerte eine Auswertung zur Bestimmung der Zweiphasenflussparameter möglich ist, in den Abb. 5.8 und Abb. 5.9 zusammenfassend gegenübergestellt.

Die Proben mit 50 % Tonanteil konnten, wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, nicht mit Wasser aufgesättigt werden, da bei Kontakt mit Wasser der Ton quillt und somit die Poren dicht verschlossen werden. Es konnten demzufolge an diesen Proben weder Wasserpermeabilitäten bestimmt noch Untersuchungen zum Zweiphasenfluss durchgeführt werden.

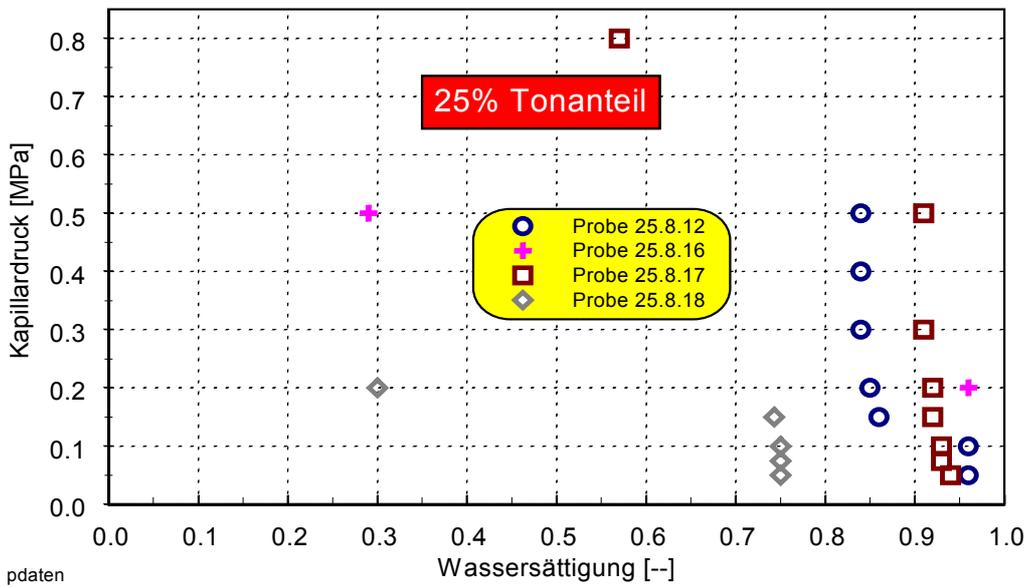
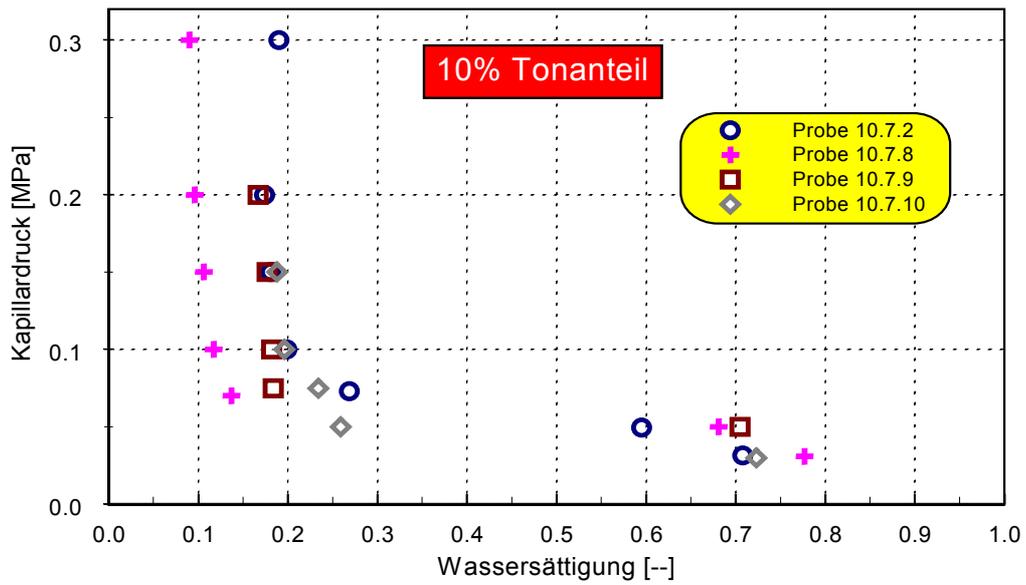


Abb. 5.8 Gemessene Kapillardrücke für Ton-/Sandproben mit 10 % (oberes Diagramm) und 25 % (unteres Diagramm) Tonanteil in Abhängigkeit von der Wassersättigung.

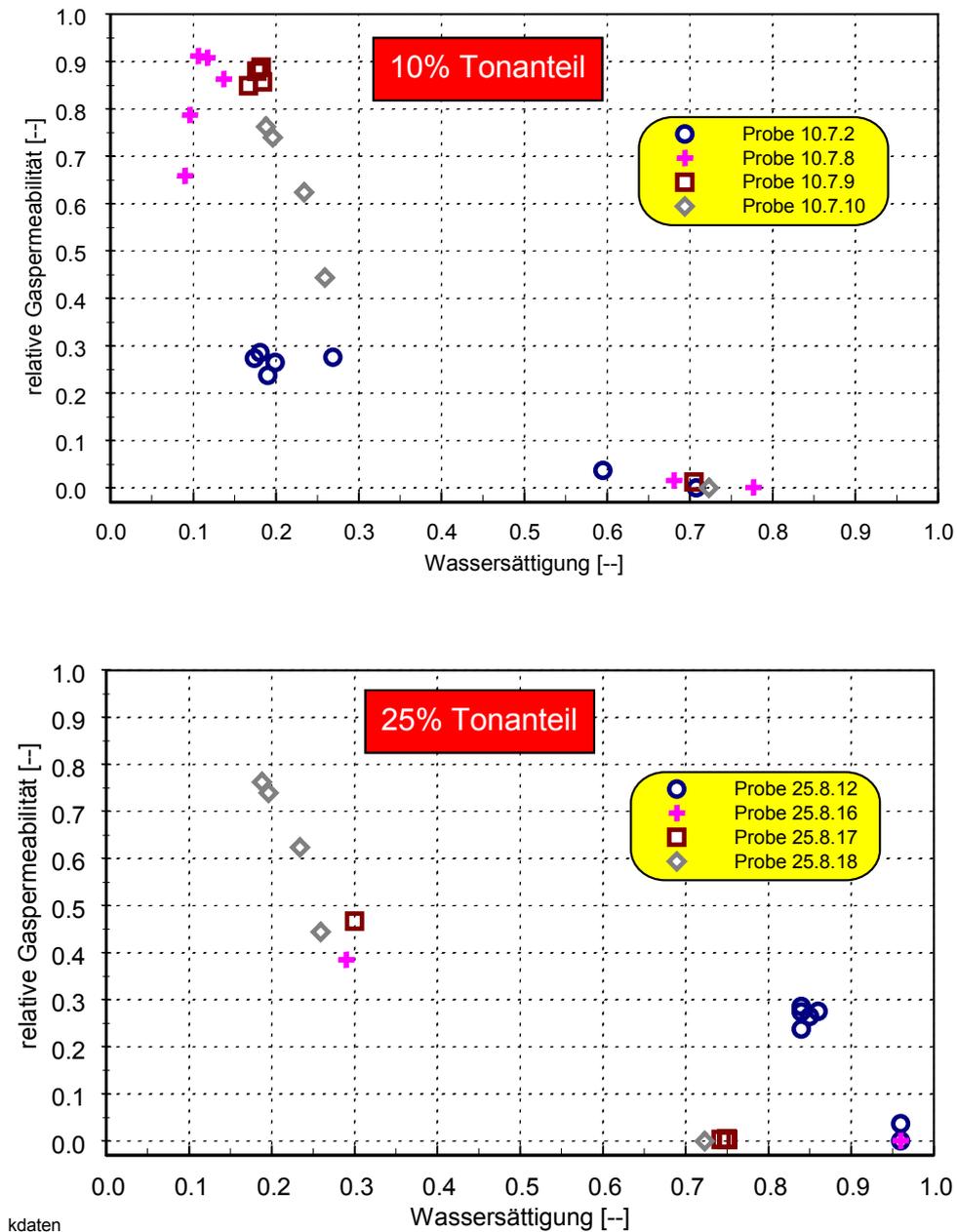


Abb. 5.9 Gemessene relative Gaspermeabilitäten für Ton-/Sandproben mit 10 % (oberes Diagramm) und 25 % (unteres Diagramm) Tonanteil in Abhängigkeit von der Wassersättigung.

5.5.1 Auswertung der Messwerte für die Proben mit 10 % Tonanteil

Im oberen Teil von Abb. 5.8 sind die Kapillardrücke für die vier Proben mit 10 % Tonanteil in Abhängigkeit von der experimentell bestimmten Wassersättigung darge-

stellt. Aus dem Verlauf der Kurven lässt sich ablesen, dass drei der Proben nahezu identische Restwassersättigungen von ca. 0,18 aufweisen. Demgegenüber zeigt die Probe 10.7.8 einen signifikant niedrigeren Wert, der mit ca. 0,09 nur halb so groß ist. Eine gewisse Übereinstimmung der Messwerte ist auch bei den relativen Gaspermeabilitäten in Abb. 5.9 erkennbar, wo nur die Probe 10.7.2 vergleichsweise niedrige Werte im Bereich kleiner Wassersättigungen ergab.

Bei den Proben mit 10 % Tonanteil konnten im Bereich der mittleren Wassersättigungen $0,3 < S_w < 0,7$ keine Werte bestimmt werden. Damit ist die in Kapitel 4.3 unter dem Punkt c) aufgeführte wesentliche Voraussetzung, dass die Zweiphasenflussparameter für eine einzelne Probe durch Kurvenanpassung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden können, nicht erfüllt.

Bei der Regressionsanalyse erhält man dann für die Parameter Bestwerte, mit denen die Messdaten in dem am dichtesten mit Messpunkten belegten Bereich, d. h. im Bereich niedriger S_w -Werte, gut approximiert werden. Dieses ergibt manchmal aber physikalisch unsinnige Resultate. Daher wurde auch eine visuelle Anpassung vorgenommen, bei der die Kurvenverläufe gewissermaßen von Hand approximiert wurden. Die visuelle Anpassung an das vG-Modell wurde außerdem dadurch vereinfacht, dass die Gültigkeit des theoretischen Zusammenhangs zwischen den Parametern n und m nach (2.13) unterstellt wurde. Die Ergebnisse der verschiedenen Analysen der Messdaten für alle Proben mit 10 % Tonanteil sind in Tab. 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.2 Bestwerte der Parameter zur Anpassung der Daten von Einzelproben mit 10 % Tonanteil an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey aus der Regressionsanalyse und Schätzwerte über die visuelle Anpassung.

Probe	Modell	S_{rw0} [--]	S_{rg0} [--]	α_0 [MPa ⁻¹]	m_0 [--]	n_0 [--]	λ_0 [--]	p_{d0} [kPa]
10.7.2	vG3	0,180	0,200	10,98	2,727	2,864	--	--
	vG5	0,036	-0,260	17,57	0,7408	1,726	--	--
	BC4	-0,161	0,392	--	--	--	0,5735	44,9
	VA	0,170	0,220	17,00	0,833	6,00	3,00	35,0
10.7.8	vG3	0,080	0,100	61,22	1,217	1,160	--	--
	vG5	0,089	0,133	17,57	0,7408	1,726	--	--
	BC4	0,000	0,033	--	--	--	0,671	6,48
	VA	0,080	0,200	25,00	0,833	6,00	3,50	38,0
10.7.9	vG3	0,150	0,200	20,81	2,922	1,036	--	--
	vG5	0,164	0,013	24,32	2,407	1,438	--	--
	BC4	0,00	-0,175	--	--	--	0,57	5,06
	VA	0,170	0,200	25,00	0,833	6,00	3,5	38,0
10.7.10	vG3	0,180	0,200	24,12	2,727	2,864	--	--
	vG5	0,181	0,148	20,71	0,7408	1,726	--	--
	BC4	-0,161	0,392	--	--	--	0,874	12,6
	VA	0,170	0,200	17,00	0,833	6,00	3,00	35,0

Die Bezeichnungen in der Spalte „Modell“ haben folgende Bedeutung:

1. vG3: Anpassung an das vG-Modell mit den Parametern α_0 , m_0 , n_0 und festgehaltenen Schätzwerten für die Restgas- und Restwassersättigung S_{rg} und S_{rw} .
2. vG5: wie vG3, jedoch mit zusätzlicher Anpassung von S_{rw} und S_{rg} .
3. BC4: Anpassung an das Brooks/Corey Modell mit den 4 Parametern λ , p_d , S_{rw} und S_{rg} .
4. VA: visuelle Anpassung an die Relationen für beide Modelle mit denselben Werten für S_{rw} und S_{rg} .

Die Verläufe der verschiedenen Approximationsfunktionen mit den Parameterwerten aus Tab. 5.2 sind für das Beispiel der Messwerte für die Probe 10.7.8 in Abb. 5.10 wiedergegeben.

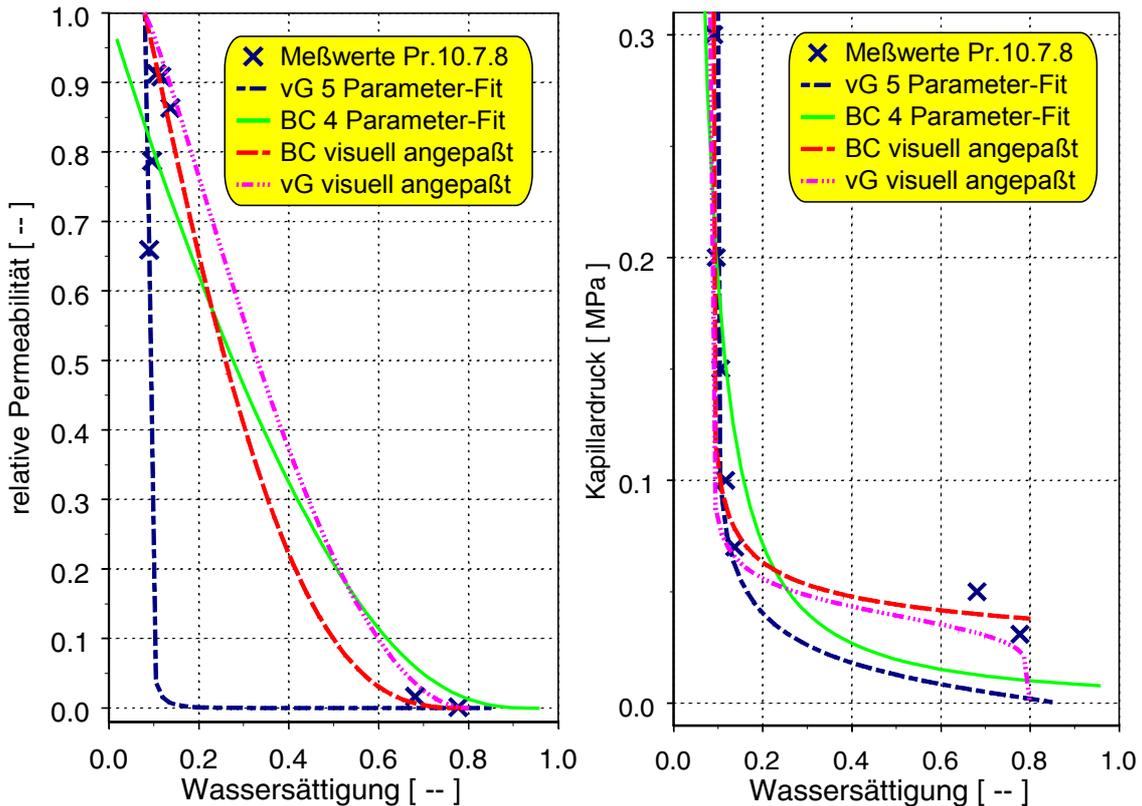


Abb. 5.10 Relative Permeabilität und Kapillardruck in Abhängigkeit von der Wassersättigung. Messergebnisse für die Probe 10.7.8 und Kurvenanpassungen an die Beziehungen nach den Modellen von van Genuchten (vG) und Brooks/Corey (BC).

Das Beispiel verdeutlicht, dass die Regressionsanalyse nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate Ausgleichskurven liefert, welche die k_w - und p_c -Messwerte bei $S_w \approx S_{rw}$ bevorzugt wiedergeben, während die beiden p_c -Messwerte bei $S_w \approx 0,7$ deutlich unterschätzt werden. Das bedeutet im Fall des BC-Modells, dass die Regressionsanalyse mit $p_{d0} = 6,4$ kPa einen zu kleinen Wert liefert, und der Anschluss an die Messwerte bei niedrigem S_w über einen relativ niedrigen Wert für λ (0,67) erreicht wird, vgl. das Beispiel der beiden p_c^{BC} -Kurven in Abb. 5.10. Bei der Anpassung der p_c^{vG} -Kurven sind die entsprechenden Abweichungen noch größer. Die Lücke bei den Messdaten im Bereich der mittleren Sättigungen $0,3 < S_w < 0,7$ hat also zur Folge, dass die Regression unzutreffende Parameterwerte für die sättigungsabhängigen Zweiphasenrelationen in beiden Modellen liefert. Dass eine Beschreibung mit den genannten Modellen aber grundsätzlich möglich ist, zeigen die visuellen Anpassungen, die mit in Abb. 5.10 dar-

gestellt sind. Mit den Bestwerten für die BC-Parameter $\lambda_0 = 3,5$ und $p_{d0} = 38$ kPa ist die Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Approximationsfunktionen zufriedenstellend. Dasselbe gilt auch für die vG-Relationen mit den in Tab. 5.2 aufgeführten Werten für die vG-Parameter zu.

Die Anpassungen für die Ergebnisse der Proben 10.7.9 und 10.7.10 ergeben ebenfalls zu niedrige Werte für λ und p_d . Mit den in Tab. 5.2 angegebenen Werten aus der visuellen Anpassung lässt sich ebenfalls gute Übereinstimmung zwischen den Mess- und Fitwerten erreichen. Die Bestimmung der Restgassättigung S_{rg} ist bei allen Anpassungsverfahren - wegen des flachen Verlaufs der Kurven bei großen S_w und der Unempfindlichkeit der p_d - und k_g -Kurven gegenüber S_{rg} in dem durch Messdaten abgedeckten Bereich - ziemlich ungenau. Dementsprechend sind die per Regression bestimmten S_{rg0} -Werte in Tab. 5.2 sehr unterschiedlich bzw. im Falle negativer Werte sogar unsinnig. Bei den visuellen Anpassungen wurde nach Maßgabe der experimentellen Daten S_{rg} -Werte von ca. 0,20 angenommen, die zumindest die Obergrenzen der wahren Werte darstellen.

Eine gemeinsame Regression der Messwerte aller Proben mit 10 % Tonanteil nach der Wassersättigung S_w , d. h. die Bestimmung eines einzigen Parametersatzes, mit dem die Messwerte aller Proben wiedergegeben werden können, ist wegen der unterschiedlichen Restwassersättigungen S_{rw} nicht direkt möglich. Diese Unterschiede werden durch die Skalierung auf die Effektivsättigung S_e nach Gl. (2.6) ausgeglichen. Für die Skalierung werden für S_{rg} und S_{rw} die entsprechenden Werte aus Tab. 5.2 verwendet, die durch visuelle Anpassung bestimmt wurden. Bei der Anpassung der Parameter des vG-Modells wurden abweichend von der Vorgehensweise bei den Einzelproben n und m frei variiert, d. h. die Gl. (2.13) wurde hier ignoriert. Die beste visuelle Anpassung an die Messdaten von allen vier Proben an die jeweiligen BC- und vG-Relationen wurde mit dem Parametersatz in der ersten Zeile der Tab. 5.3 erzielt. Der Vergleich mit den entsprechenden Werten aus Tab. 5.2 für die Einzelproben zeigt, dass sich die Werte für die Parameter n und m stark verändert haben. Das Vergleichsdiagramm in Abb. 5.11 links zeigt, dass die relativen Permeabilitäten an das vG-Modell mit einem Wert für den Parameter m angepasst werden können, der mit 4,5 wesentlich höher als der nach der Theorie nach (2.13) zu erwartende Wert von ca. 0,9 ist. Die Kapillardrücke werden durch die Änderung von m dagegen nur wenig beeinflusst.

Tab. 5.3 Schätzwerte der Parameter zur Anpassung der Daten aller Proben mit 10 % Tongehalt an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey über die visuelle Anpassung.

Probe	S_{rv0} [--]	S_{rg0} [--]	α_0 [MPa ⁻¹]	m_0 [--]	n_0 [--]	λ_0 [--]	P_{d0} [kPa]
alle	0,08-0,17	0,180	18,0	4,500	1,5	3,0	36,0
10.7.2	0,170	0,220	17,00	0,833	6,00	3,0	35,0
10.7.8	0,080	0,200	25,00	0,833	6,00	3,5	38,0
10.7.9	0,170	0,200	25,00	0,833	6,00	3,5	38,0
10.7.10	0,170	0,200	17,00	0,833	6,00	3,0	35,0

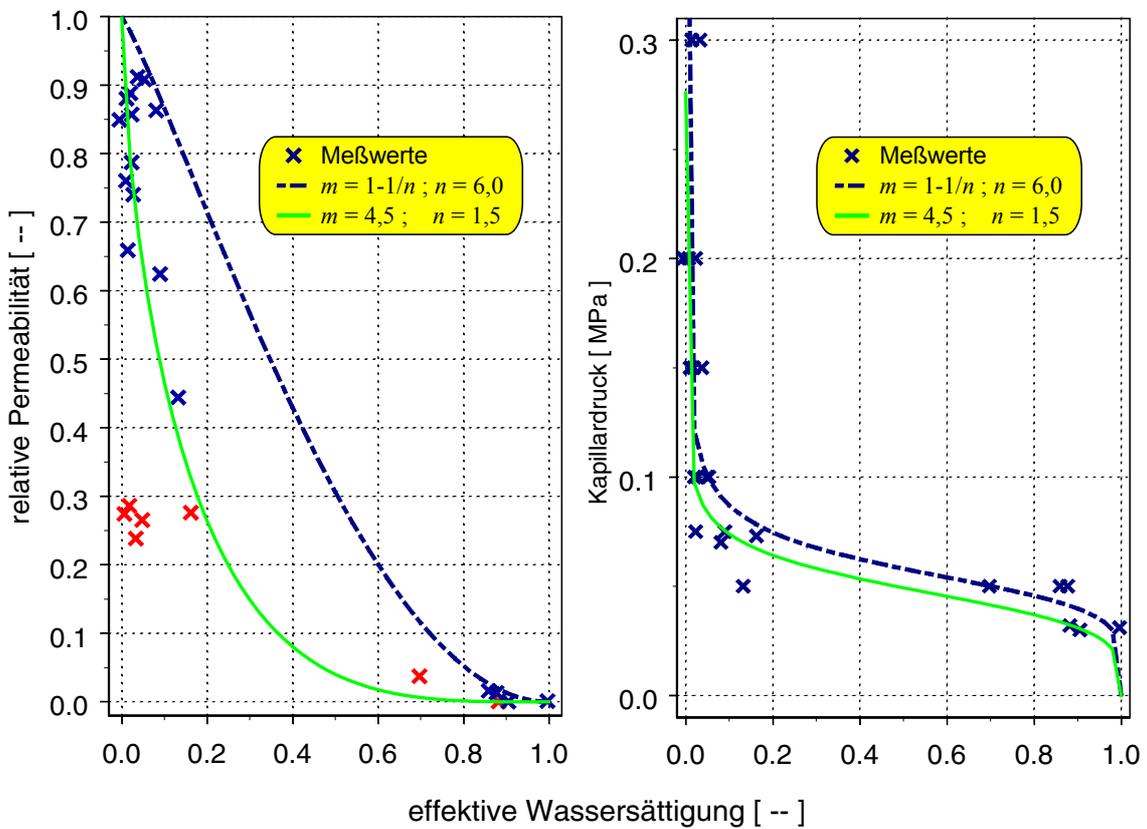


Abb. 5.11 Anpassung der Daten der Proben mit 10 % Tonanteil an die Relation von van Genuchten mit unterschiedlichen Werten für die Parameter n und m .

Die Messwerte und die gemeinsamen Approximationsfunktionen mit den Parameterwerten aus der ersten Zeile in Tab. 5.2 werden in Abb. 5.12 gegenübergestellt. Die

Auswertung hat ergeben, dass die Gaseindringdrücke p_d aller Proben mit 10 % Tonanteil im Rahmen der Messgenauigkeit identisch sind. Aus den Vergleichsdiagrammen lässt sich schließen, dass die Messdaten für die Proben mit 10 % Tonanteil in Anbetracht der erreichten Messgenauigkeiten und den vermutlich bestehenden probenspezifischen Unterschieden durch einen einheitlichen Datensatz wiedergegeben werden können. Nur bei den Messdaten für die relative Permeabilität der Probe 10.7.2 besteht bei den niedrigen Sättigungen eine auffällige Abweichung. Diese Werte sind in dem linken Diagramm in Abb. 5.12 hervorgehoben. Die Ursachen für diese auffällige Abweichung ist nicht bekannt.

Die Gegenüberstellung der verschiedenen Anpassungen zeigt, dass die vorliegenden experimentellen Ergebnisse durch das vG-Modell die Messwerte etwas besser wiedergegeben werden.

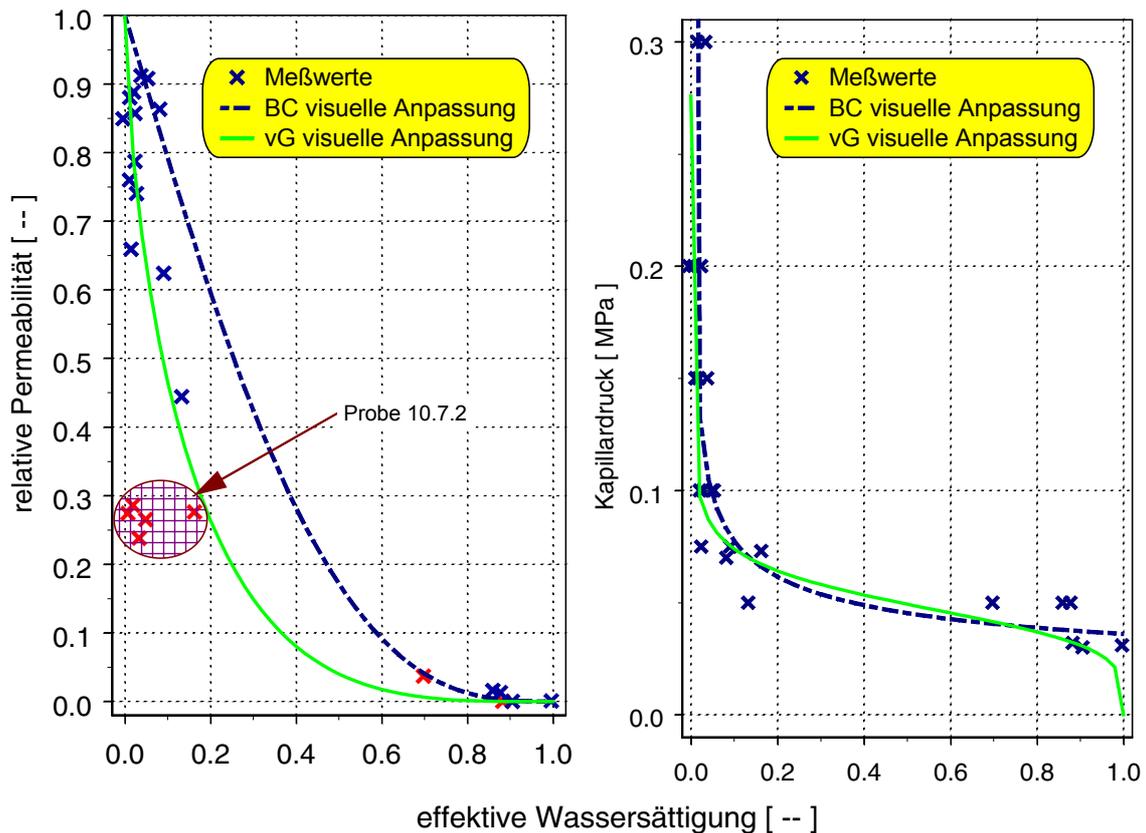


Abb. 5.12 Relative Permeabilität und Kapillardruck in Abhängigkeit von der effektiven Wassersättigung S_e . Messergebnisse für alle Proben mit 10 % Tonanteil und visuelle Kurvenanpassungen an die Beziehungen nach den Modellen von van Genuchten (vG) und Brooks/Corey (BC).

5.5.2 Auswertung der Messwerte für die Proben mit 25 % Tonanteil

Im unteren Teil von Abb. 5.8 sind die relativen Kapillardrücke für die vier Proben mit 25 % Tonanteil in Abhängigkeit von der experimentell bestimmten Wassersättigung dargestellt. Der Unterschied zu den entsprechenden Werten für die 10 %-Proben ist gravierend, weil die Kapillardrücke mehr als doppelt so hoch sind, mit steigender Sättigung zunächst langsamer abnehmen und erst kurz vor Erreichen der Restsättigungen sehr steil auf einen Endwert zurückfallen. Bei den relativen Gaspermeabilitäten (Abb. 5.9) sind die Unterschiede weniger ausgeprägt.

Von den vier untersuchten Proben erfüllen nur die Messdaten für die Probe 25.8.17 und die 25.8.18 die Voraussetzungen für die Ableitung der Zweiphasenflussparameter. Für die Probe 25.8.12 stehen nur Messwerte für sehr hohe Wassersättigungen und für die Probe 25.8.16 nur zwei Einzelmesswerte zur Verfügung und daher sind die in Kap. 4.3 genannten Bedingungen b) bzw. c) nicht erfüllt.

Die Anpassungen der Parameter an die Daten für die Proben 25.8.17 und 25.8.18 nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate haben keine verwertbaren Resultate geliefert. Daher wurde wiederum eine visuelle Anpassung vorgenommen. Die numerischen Ergebnisse dieser Anpassungen sind in Tab. 5.4 wiedergegeben. Dabei hat sich gezeigt, dass der bei den beiden Proben gemessenen auffällige steile Abfall des Kapillardruckes im Bereich der hohen Effektivsättigungen durch das vG-Modell sehr gut beschrieben wird.

Tab. 5.4 Schätzwerte der Parameter zur Anpassung der Daten aller Proben mit 25 % Tongehalt an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey über die visuelle Anpassung.

Probe	S_{rv0} [--]	S_{rg0} [--]	α_0 [MPa ⁻¹]	m_0 [--]	n_0 [--]	λ_0 [--]	P_{d0} [kPa]
25.8.17	0,080	0,200	1,20	1,20	10,0	4,0	450
25.8.18	0,100	0,245	5,20	0,950	20,0	3,5	120

Die Messwerte für den Kapillardruck und die relative Permeabilität und die daran angepassten vG-Kurven sind in Abb. 5.13 dargestellt. Wegen des großen Unterschiedes bei den Gaseindringdrücken) ist eine Beschreibung der Messdaten beider Proben in

Abhängigkeit von der effektiven Sättigung durch einen einzigen Parametersatz, wie das bei den Proben mit 10 % Tonanteil der Fall war, nicht möglich.

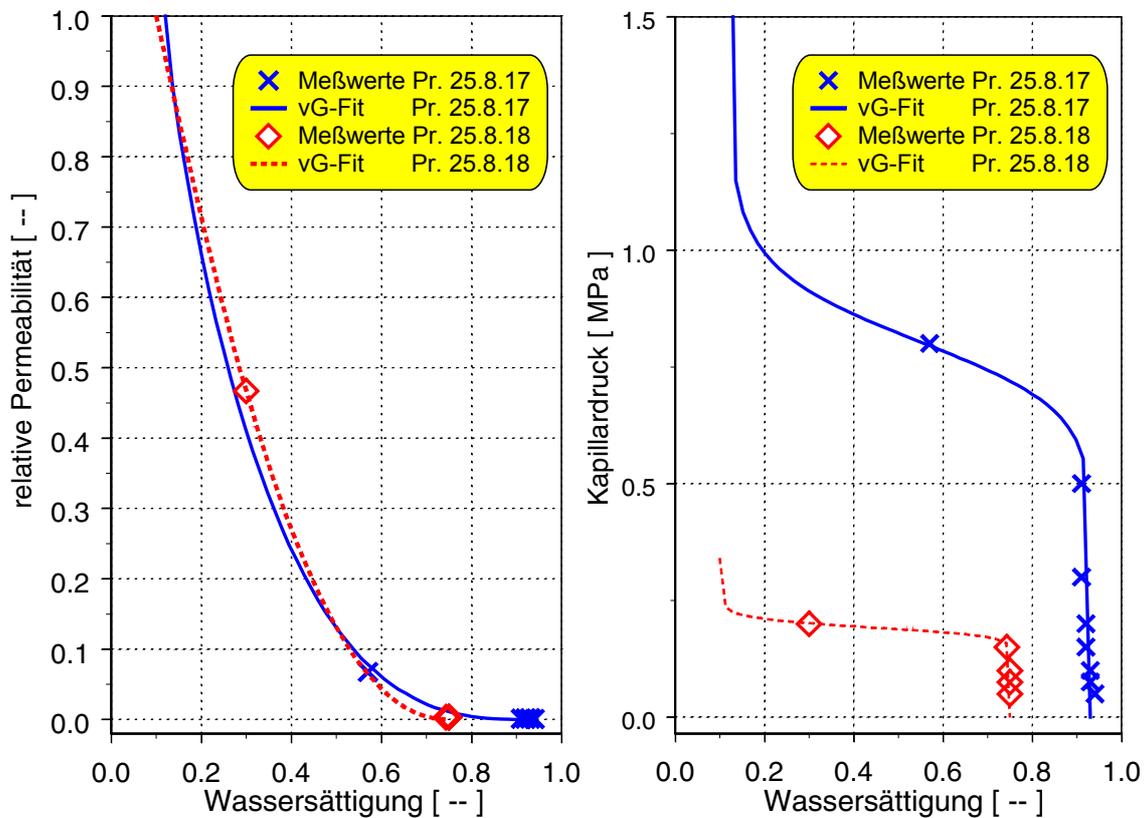


Abb. 5.13 Anpassung der Messwerte für zwei Proben mit 25 % Tonanteil an das Modell von van Genuchten.

5.6 Gasdiffusionskonstanten

Die Diffusionskonstanten der Gaskomponenten Wasserstoff, Helium, Methan und Kohlendioxid wurden an Sand/Ton-Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktion im trockenen und wassergesättigten Zustand bestimmt.

Diese Untersuchungen haben ergeben, dass die Diffusionskonstanten im trockenen und luftgefüllten Porenraum der Proben im Bereich von $14 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $415 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ liegen. Bei gleichen Kompaktionsdrücken und Mischungsverhältnissen der Proben ergaben sich keine signifikante Abhängigkeiten der Diffusionskonstanten von den Gaskomponenten. Abhängigkeiten zeigen sich aber von den Tonanteilen und den Kom-

paktionsdrücken. Bei Tonanteilen von 25 bzw. 50 % in den Proben erniedrigten sich die Diffusionskonstanten gegenüber den reinen Sandproben bzw. den Mischungsverhältnissen 90/10 um den Faktor 2 bis 3. Durch die Erhöhung des Kompaktionsdruckes von 25 auf 50 bzw. 100 MPa erniedrigten sich die Diffusionskonstanten um einen Faktor 5 bis 30. Im trockenen Zustand sind daher technische Barrieren aus Sand/Ton, wie aus diesen Untersuchungen hervorgeht, für den diffusiven Gastransport durchlässig, so dass langfristig ein Konzentrationsausgleich in den verschiedenen Bereichen des Endlagers stattfindet.

Im wassergesättigten Porenraum hat Kohlendioxid gegenüber den anderen Gaskomponenten Wasserstoff, Helium und Methan eine wesentlich größere Diffusionskonstante. Die Ursache ist darin begründet, dass die Löslichkeit von Kohlendioxid in Wasser bei 20 °C und 1 bar mit 0,87 Liter pro kg Wasser um den Faktor 25 bis 105 größer ist als die von Wasserstoff (0,0178 l/kg), Helium (0,0083 l/kg) und Methan (0,035 l/kg) /LID 94/, /LIN/. In der bei diesen Untersuchungen benutzten Messzelle werden an der Aufgabeseite der Probe die Gase im Wasser gelöst, diffundieren als gelöste Komponente im wassererfüllten Porenraum durch die Probe und entlösen am freien Ende wieder in den Gasraum. Da Kohlendioxid in größeren Mengen im Wasser gelöst wird, diffundieren im Porenraum auch größere Mengen und es ergibt sich somit auch eine größere Diffusionskonstante.

Weiterhin ist aus den Messungen im wassererfüllten Porenraum zu erkennen, dass die Diffusion vom Tongehalt und dem Kompaktionsdruck abhängig ist. Für Wasserstoff, Helium und Methan konnten nur für reinen Bausand sowie in den Proben mit einem Sand/Ton-Mischungsverhältnis 90/10 und einem Kompaktionsdruck von 25 MPa Diffusionskonstanten in der Größe von $0,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $2,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen werden. Bei höheren Tongehalten bzw. höheren Kompaktionsdrücken ergaben sich Diffusionskonstanten unterhalb der Nachweisgrenze der Messanordnung von $0,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Diffusionskonstanten für Kohlendioxid im reinen Bausand sowie in den Proben mit dem Sand/Ton-Mischungsverhältnis 90/10 und dem Kompaktionsdruck von 25 MPa waren im Bereich von $3,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $11,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei höheren Tongehalten und höheren Kompaktionsdrücken lagen die Diffusionskonstanten im Bereich von $0,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $0,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Bei diesen höheren Tongehalten und Kompaktionsdrücken wird offensichtlich der freie Porenraum beim Quellen des Tons ausgefüllt und steht somit der Diffusion nicht mehr zur Verfügung. Die Diffusion kann dann nur noch über die benetzte innere Oberfläche des Tones erfolgen und ist somit wesentlich kleiner als die im

freien Porenraum. In den Abb. 5.14 und Abb. 5.15 sind exemplarisch die Messwerte der Diffusionskonstanten für Wasserstoff im luftgefüllten Porenraum sowie die für Kohlendioxid im luft- und wassererfüllten Porenraum für die verschiedenen Sand/Ton-Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke dargestellt. In Tab. 8.5-41 sind die Werte der gemessenen Diffusionskonstanten für Wasserstoff, Helium, Methan und Kohlendioxid in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis und Kompaktionsdruck zusammengestellt.

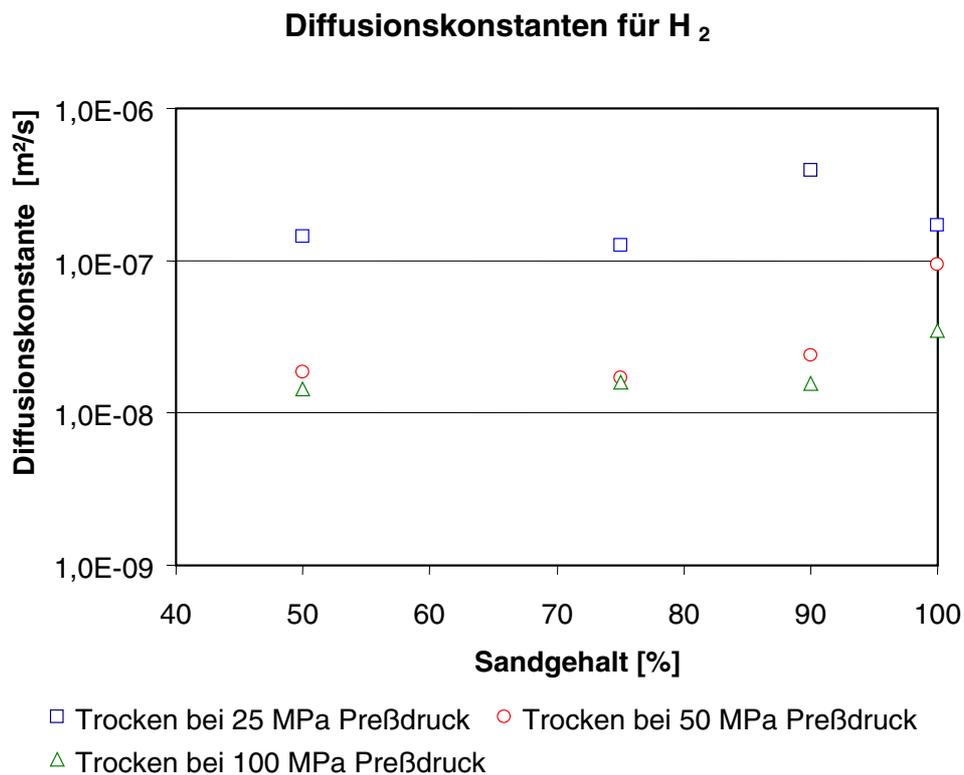


Abb. 5.14 Diffusionskonstanten für Wasserstoff im luftgefüllten Porenraum in Abhängigkeit von den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und den Kompaktionsdrücken.

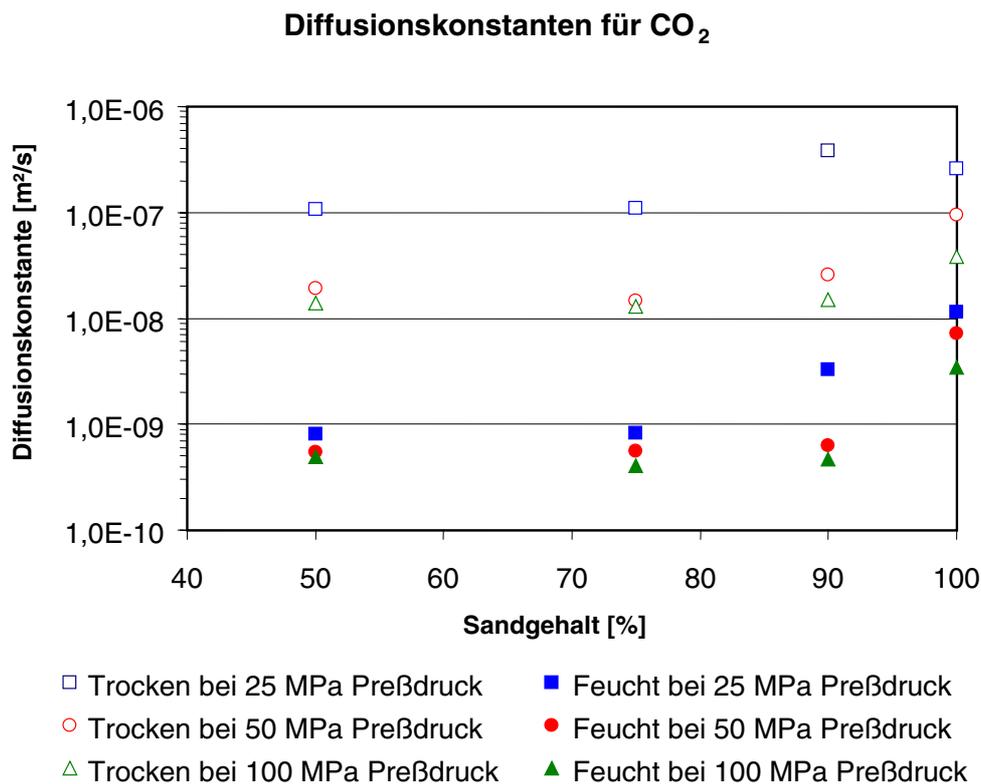


Abb. 5.15 Diffusionskonstanten für Kohlendioxid im luft- und wassererfüllten Porenraum in Abhängigkeit von den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und den Kompaktionsdrücken.

5.7 Innere Oberfläche

Die Messungen der inneren Oberfläche wurden an den Ausgangsmaterialien Bausand und Calcigel (Ton) sowie an Proben, die aus diesen Komponenten mit den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen 75/25 und 50/50 und den Kompaktionsdrücken von 25, 50 und 100 MPa hergestellt worden sind, durchgeführt. Zusätzlich wurde eine natürliche Tonsteinprobe aus dem Untertagelabor Mont Terri untersucht. Die Auswertung erfolgte nach der Ein- und Mehrpunktmethode. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sowie die mit einem Pyknometer bestimmten Korndichten sind in Tab. 8.5-42 zusammengestellt.

Die spezifische innere Oberfläche des Bausandes lag bei 1,69 m²/g, die des Calcigels bei 11,48 m²/g. Die der kompaktierten Proben mit 14,14 m²/g bis 42,94 m²/g war

durchweg größer als die der Ausgangskomponenten. Die Dichten entsprachen jedoch dem Mischungsverhältnis der Ausgangskomponenten.

Eine Erklärung für diese Diskrepanz in den unterschiedlichen inneren Oberflächen der Ausgangsmaterialien und den gemischten kompaktierten Proben konnte trotz eingehender Diskussion mit dem Auftragnehmer (Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin) nicht gefunden werden. Zusätzliche Kalibrier- und Kontrollmessungen mit anderen Probenmaterialien zeigten eine einwandfreie Funktion der Messanlage.

Die Messungen der inneren Oberflächen an unterschiedlich großen Teilproben einer Probe, die um den Faktor 1,5 bis 2 variierten, deuten auf Inhomogenitäten im Porenraum und der Porenraumstruktur hin. Bei den Dichtemessungen zeigten sich derartige Unterschiede nicht, so dass von einer homogenen Zusammensetzung der Proben ausgegangen werden kann. Proben gleicher Mischungsverhältnisse von 75/25 aber unterschiedlicher Kompaktionsdrücke zeigten keinen Unterschied in der inneren Oberfläche. Proben gleicher Mischungsverhältnisse von 50/50 und gleicher Kompaktionsdrücke von 25 MPa zeigten im Rahmen der Messgenauigkeit gleiche Werte. Signifikante Unterschiede in der Auswertung nach der Ein- und Mehrpunktmethode gab es nicht.

Die innere Oberfläche der natürlichen Probe des Opalinus-Tons aus dem Untertagelabor Mont Terri mit $10,0 \text{ m}^2/\text{g}$ bis $24,0 \text{ m}^2/\text{g}$ lag im Bereich der kompaktierten Proben.

Da die Messergebnisse der inneren Oberfläche nicht in Zusammenhang mit den Ein- und Zweiphasenflusspermeabilitäten für Gas und Wasser gebracht werden konnten, wurden keine weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden im Labor an Sand/Ton-Gemischen die Ein- und Zweiphasenflussvorgänge sowie die Gasdiffusion untersucht. Sand/Ton-Gemische sind potentielle Komponenten für den Versatz von Strecken und den Bau von Verschlüssen in Endlagern für radioaktive Abfälle bzw. Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle. Für die Entwicklung langfristiger Sicherheitskonzepte sind die Kenntnis der petrophysikalischen Fließparameter der verwandten Baustoffe von Bedeutung, da auch Wasser- oder Gasströmungen freigesetzte Radionuklide und Schadstoffe vom Endlager bzw. von der Deponie in die Biosphäre transportieren können.

Die Ausgangsmaterialien dieser Untersuchung waren handelsüblicher Bausand mit der Korngröße von 0 bis 2 mm und ein Bentonit-Ton (Calcigel). Die Komponenten wurden in den Verhältnissen 90/10, 75/25 und 50/50 unter Zugabe von Wasser mit dem konstanten Ton/Wasser-Verhältnis von 2,5 homogen durchmischt. In einer entsprechenden Form wurden dann Proben von 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge der verschiedenen Mischungsverhältnisse mit den Kompaktionsdrücken von 25, 50 und 100 MPa gepresst. Anschließend wurden die Proben in einem Exsikkator über Silikagel bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, wobei das zuvor zugegebene Wasser wieder entfernt wurde. Die Zugabe von Wasser war notwendig, da aus den trockenen Ausgangsmaterialien mit den Kompaktionsdrücken bis 100 MPa keine handhabbaren Proben hergestellt werden konnten. Weiterhin zeigte sich, dass der trockene Ton so wie er in 50-kg-Säcken angeliefert wurde, im Labor nur mit großer Vorsicht verarbeitet werden konnte, da er aufgrund des sehr feinen, pulverförmigen Zustandes zu einer starken Staubentwicklung neigte. In einem Bergwerk kann dieses Material demzufolge wegen der potenziellen Staubentwicklung auf keinen Fall trocken als Pulver eingebracht werden. Sollen Strecken mit Ton bzw. Sand/Ton-Gemischen versetzt oder Abschlussbauwerke erstellt werden, so kann das Material nur mit entsprechendem Wasserzusatz oder als fertige Formsteine verarbeitet werden.

Aus den Korndichten des Sandes und des Tons, dem Mischungsverhältnis sowie der Gesamtdichte der kompaktierten Probe wurde die Porosität der Proben berechnet. Die Gesamtdichten der Proben lagen im Bereich von 1,97 bis 2,07 g/cm³ und die Porositäten im Bereich von 20,4 bis 22,6 %. Beide Parameter zeigten keine signifikante Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis bzw. dem Kompaktionsdruck. Offensichtlich ist in den Proben der Sand das entscheidende Stützgerüst, und bei der Kompaktion bis

100 MPa kommt es zu keiner weiteren Verdichtung. Aus den aufgenommenen Wassermengen, die bei der Bestimmung der Wasserpermeabilität zur vollständigen Sättigung der Proben notwendig waren, wurden ebenfalls die Porositäten bestimmt. Hierbei ergaben sich Porositäten im Bereich von 21,8 bis 25,2 %. Es zeigte sich die Tendenz, dass die Porositäten der Proben mit 25 % Tonanteil gegenüber denen mit 10 % Tonanteil um etwa 2 % größer waren. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass bei der Flutung das Wasser nicht nur den Porenraum vollständig ausfüllt, sondern auch zusätzlich in den Zwischenschichten des Tons eingelagert wird.

Die Messung der Permeabilität erfolgte in einer modifizierten Hasslerzelle, in der der triaxiale Einspanndruck der Probe im Bereich von 0,1 bis 5,0 MPa und der Gas- bzw. Wasserinjektionsdruck im Bereich von 0,01 bis 4,75 MPa variiert wurde.

Die mit trockenem Stickstoff gemessene Gaspermeabilität der trockenen Proben unterschiedlicher Sand/Ton-Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke lag im Bereich von $6 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ bis $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$. Sie zeigte keine signifikante Abhängigkeit vom triaxialen Einspanndruck, dem Gasinjektionsdruck, dem Kompaktionsdruck und dem Mischungsverhältnis. Die Gaspermeabilität sowie auch die Gesamtdichte und die Porosität wird bei den gewählten Randbedingungen nicht durch den Tonanteil sondern nur durch den Stützkörper des Sandes bestimmt.

Die Untersuchungen mit Stickstoff von 55 und 100 % relativer Feuchte ergaben, dass die Proben etwa 50 % des aus dem Gasstrom angebotenen Wassers adsorbieren, aber die Gaspermeabilität sich nicht signifikant erniedrigt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Proben über Zeiträume von 1000 bis 2000 Stunden mit Gasmengen von 1 bis 3 m^3 durchströmt. Die Gasmenge von 1 m^3 mit der die Probe von 50 mm Durchmesser und 100 mm Länge durchströmt worden ist, entspricht in einem Abschlussbauwerk eines Endlagers mit einem Durchmesser von 5 m und einer Länge von 10 m einer Gasmenge von 10^6 m^3 . In einem Endlager wird demzufolge ein Abschlussbauwerk, das mit einer wassergesättigten Gasmenge, die etwa den Resthohl- und Porenräumen des Endlagers entspricht, seine Permeabilität nicht signifikant ändern. Im Normalbetrieb, wenn die Versatzkörper bzw. die Abschlussbauwerke keinen direkten Kontakt mit Wasser oder Lauge haben, werden diese technischen Barrieren permeabel bleiben und es wird zu keinem Druckaufbau infolge Gasproduktion aus den Abfällen oder der Volumenverkleinerung infolge der Hohlraumkonvergenz in einem Endlager kommen.

Die Einphasen-Wasserpermeabilitäten zeigten eine Abhängigkeit vom den Sand/Ton-Mischungsverhältnis. Proben mit 10 % Tonanteil hatten eine Wasserpermeabilität von $5,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bis $7,7 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und die mit 25 % Tonanteil eine von $1,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $2,4 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$. Bei einem Sand/Ton-Mischungsverhältnis von 50/50 konnten die Proben nicht mit Wasser gesättigt und somit auch keine Wasserpermeabilitäten ermittelt werden. Bei Kontakt mit Wasser quillt der Ton und bei einem Anteil von 50 % werden offensichtlich die vorhandenen Porenräume geschlossen. Ein Ausbreiten des Wassers in der Probe und auch ein Fließen wird dadurch verhindert. Mit einem Tonanteil von 50 % können folglich wasserdichte Abschlussbauwerke erstellt werden.

Die Untersuchungen der Zweiphasenpermeabilitäten konnten daher nur an Proben mit Sand/Ton-Mischungsverhältnissen von 90/10 und 75/25 durchgeführt werden.

Die wassergesättigten Proben mit einem Tonanteil von 10 % hatten einen Gasdurchbruchdruck von 0,03 bis 0,05 MPa, und 80 % des im Porenraum vorhandenen Wassers wurden beim Durchbruchdruck aus den Poren verdrängt. Bei weiterer Injektionsdruckerhöhung bis auf 0,3 MPa konnten nur noch weitere 5 bis 10 % verdrängt werden, so dass im Porenraum ein Restsättigung von 10 bis 20 % verblieb. Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass etwa 80 % der Strömungskanäle im Porenraum annähernd gleiche Radien haben und untereinander in Verbindung stehen.

Die Proben mit 25 % Tonanteil zeigten hinsichtlich des Entwässerungsverhaltens bei der Gasinjektion ein uneinheitliches Bild. Die Gasdurchbruchdrücke variierten im Bereich zwischen 0,05 und 0,2 MPa, und es zeigte sich auch kein Plateaubereich in der Kapillardruck - Sättigungsbeziehung. Eine weitere Erhöhung des Gasinjektionsdruckes führte in einigen Proben zu einer weiteren Verdrängung des im Porenraum gespeicherten Wassers, während an anderen Proben bis zu einem Gasinjektionsdruck von 0,5 MPa nicht weiter entsättigt werden konnte. Unterhalb des Injektionsdruckes von 0,5 MPa ergaben sich effektive Gaspermeabilitäten im Bereich von 10^{-16} m^2 . Oberhalb dieser Injektionsdrücke mit Permeabilitäten größer als 10^{-14} m^2 stellte sich kein stationärer Fluss ein. Bei diesen hohen Gasströmungen kam es offensichtlich zu Austrocknungseffekten in den Proben, da nicht sichergestellt werden konnte, dass der Stickstoff immer absolut wassergesättigt war.

Durch die Wassersättigung der Proben quellen die in ihnen enthaltenen Tone. Unterhalb von 25 % Tonanteil reicht diese Volumenzunahme offensichtlich nicht aus, um die

20 bis 22 % Porosität auszufüllen. Es bleibt also noch offener, für den advektiven Fluss von Wasser und Gas zugängiger Porenraum erhalten, während bei einem Tonanteil von 25 % ein grosser Anteil dieses Porenraums durch das Quellen ausgefüllt wird. Für die Entsättigung sind daher wesentlich höhere Gasinjektionsdrücke notwendig. Folglich ergaben sich auch andere Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen.

Bei noch größerem Tonanteil, z. B. 50 %, wird durch das Quellen der Porenraum völlig ausgefüllt. Demzufolge findet in der Probe, in dem in diesem Vorhaben betrachteten Druckbereich, auch keine Gas- bzw. Wasserströmung statt. Hieraus kann gefolgert werden, dass durch die Wahl des Sand/Ton-Mischungsverhältnisses Versatzkörper mit definierten Einphasen-Gas- und Wasserpermeabilitäten sowie Zweiphasenpermeabilitäten erstellt werden können. Weitergehende Untersuchungen dieses Sachverhalts, auch unter Einbeziehung von Sanden anderer Kornspektren, sollten daher durchgeführt werden.

Die relativen Permeabilitäten und Kapillardrücke können in Gas-Wassersystemen durch die Beziehungen von Brooks/Corey oder van Genuchten beschrieben werden. Durch Anpassung dieser Beziehungen an die gemessenen Werte der Gas- und Wasserpermeabilität, der Restgas- und Restwassersättigung sowie der Kapillardrücke wurden die für die weiteren theoretischen Betrachtungen notwendigen Zweiphasenflussparameter ermittelt.

Eine Anpassung dieser theoretischen Beziehungen an die Messwerte durch Regression nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate konnte nur bedingt durchgeführt werden, da bei den Proben mit 10 % Tonanteil für Wassersättigungen von 0,3 bis 0,7 wegen der spontanen Entsättigung keine Kapillardruckmesswerte vorlagen und die Proben mit 25 % Tonanteil ein sehr unterschiedliches Verhalten zeigten. Es wurde daher eine visuelle Anpassung vorgenommen, die für die beiden Beziehungen und die weiteren Betrachtungen brauchbare Parameter des Zweiphasenflusses ergaben. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Anpassungen zeigte, dass die vorliegenden experimentellen Ergebnisse durch das van Genuchten-Modell besser beschrieben werden konnte. Dieser Sachverhalt wurde nur an wenigen Proben ermittelt, er sollte daher ebenso wie die aus diesen Modellen abgeleiteten Parameter durch eine größere Probenzahl überprüft und ergänzt werden.

Ergänzend zu den gepressten Versatzproben unterschiedlicher Sand/Ton-Mischungsverhältnisse wurden natürliche Tonsteine aus den Untertagelaboren HADES in Mol/Belgien (Boom Clay) und Mont Terri in der Schweiz (Opalinus-Ton) untersucht. Die natürlichen Tonsteinproben waren in ihrem Verhalten hinsichtlich der Permeabilität untereinander und mit den gepressten Versatzproben unterschiedlicher Sand/Ton-Mischungsverhältnisse nicht vergleichbar.

An den Proben des Boom Clay konnten bis zu Einspanndrücken von 5 MPa und Gasinjektionsdrücken von 4,75 MPa keine Gasströmungen gemessen werden, woraus sich eine Permeabilität kleiner als 10^{-22} m^2 ergab.

Die fünf untersuchten Proben des Opalinus-Tons hatten sehr unterschiedliche Permeabilitäten. Bei einem Einspanndruck von 0,5 MPa hatten zwei eine Permeabilität von 10^{-13} m^2 , während die der drei anderen im Bereich von 10^{-17} bis 10^{-16} m^2 lag. Bei Erhöhung des Einspanndruckes auf 5 MPa erniedrigten sich die Werte um 1 bis 3 Größenordnungen. Wurde der Einspanndruck wieder auf den Ausgangsdruck von 0,5 MPa herabgesetzt, so stieg die Permeabilität zwar wieder, war aber um den Faktor 2 bis 10 niedriger als die unter gleichen Bedingungen gemessene Ausgangspermeabilität. Daraus kann geschlossen werden, dass der Opalinus-Ton elastoplastische Eigenschaften aufweist.

Wasser- und Zweiphasenpermeabilitäten konnten weder in Boom Clay noch in Opalinus-Ton gemessen werden, da bei Kontakt mit Wasser die Tone quellen und sich die noch vorhandenen Porenräume schließen.

Die Bestimmung der Gasdiffusionskonstanten erfolgte an Proben mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Länge von 10 mm in einer speziell hierfür entwickelten Messzelle im trockenen, luftefüllten sowie im wassergesättigten Porenraum. Das Sand/Ton-Mischungsverhältnis der Proben hatte dabei die Werte 100/0, 90/10, 75/25 und 50/50 und der Kompaktionsdruck 25, 50 und 100 MPa.

Für Proben mit trockenem, luftefülltem Porenraum wurden Diffusionskonstanten im Bereich von $14 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $415 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt, die keine signifikante Abhängigkeit von den Gaskomponenten aber von den Kompaktionsdrücken und Mischungsverhältnissen zeigten. Bei Tonanteilen von 25 und 50 % erniedrigten sich die Diffusionskonstanten gegenüber dem reinen Bausand bzw. dem Tonanteil von 10 % um den Faktor

2 bis 3. Durch Erhöhung des Kompaktionsdruckes von 25 auf 100 MPa erniedrigte sich die Diffusionskonstante um den Faktor 5 bis 30. Trockener Versatz aus Sand oder Sand/Ton - Gemischen ist für die diffusive Gasausbreitung durchlässig, und es kommt langfristig innerhalb der verschiedenen Endlagerbereiche zu einem Konzentrationsausgleich.

Für Proben mit wassergesättigten Porenraum zeigten die Diffusionskonstanten eine starke Abhängigkeit vom Sand/Ton-Mischungsverhältnis und Kompaktionsdruck. Weiterhin waren die Diffusionskonstanten von Kohlendioxid infolge der um den Faktor 25 bis 105 höheren Löslichkeit in Wasser auch entsprechend höher. Für Wasserstoff, Helium und Methan konnten nur in reinem Bausand und in den Proben mit 10 % Tonanteil bei einem Kompaktionsdruck von 25 MPa Diffusionskonstanten im Bereich von $0,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $2,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen werden. Bei höheren Tonanteilen und Kompaktionsdrücken lagen sie unter der Nachweisgrenze von $0,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Diffusionskonstanten von Kohlendioxid lagen in Abhängigkeit vom Tonanteil und vom Kompaktionsdruck im Bereich von $0,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ bis $11,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Daraus ergibt sich, dass der wassererfüllte Versatz aus Sand/Ton-Gemischen für den diffusiven Gastransport nur bedingt durchlässig ist.

Die innere Oberfläche des Bausandes lag bei $1,69 \text{ m}^2/\text{g}$ und die des Calcigels bei $11,48 \text{ m}^2/\text{g}$, während die der kompaktierten Proben mit $14,14$ bis $42,94 \text{ m}^2/\text{g}$ durchweg größer war als die der Ausgangskomponenten. Die Dichten entsprachen jedoch dem Mischungsverhältnis der Ausgangskomponenten.

Eine Erklärung für diese Diskrepanz in den unterschiedlichen inneren Oberflächen der Ausgangsmaterialien und den gemischten, kompaktierten Proben konnte nicht gefunden werden. Die Dichtemessungen an den Ausgangsmaterialien sowie an größeren und kleineren kompaktierten Teilproben zeigten derartige Unterschiede nicht.

Die innere Oberfläche der natürlichen Proben des Opalinus-Tons aus dem Untertage-labor Mont Terri mit $10,0$ bis $24,0 \text{ m}^2/\text{g}$ war im Bereich der kompaktierten Proben.

Für die inneren Oberflächen der verschiedenen Proben ist offensichtlich nur die Korngröße der Materialien nicht aber die Kompaktion von Bedeutung, während für den Ein- und Zweiphasenfluss die Porenraumstruktur, die von der Kompaktion abhängt, von Bedeutung ist. Zwischen innerer Oberfläche und Permeabilität existiert folglich kein

direkter Zusammenhang. Daher wurden als Unterauftrag keine weiteren Messungen zur Bestimmung der inneren Oberfläche durchgeführt.

Die Untersuchungen der Ein- und Zweiphasenflussvorgänge in Sand/Ton-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung und Kompaktion als Versatz- und Verschlussmaterial für Endlager und Deponien haben ergeben:

- Im trockenen Zustand sind diese Materialien weitestgehend unabhängig vom Mischungsverhältnis und der Kompaktion durchlässig für den advektiven und diffusiven Gastransport.
- Im teilweise oder vollständig wassergesättigten Zustand sind die Durchlässigkeiten für den advektiven und diffusiven Gastransport sowie den advektiven Wassertransport im starken Maße abhängig vom Sand/Ton-Mischungsverhältnis. Mit einem Tonanteil von 10 % ist der advektive Gastransport in Abhängigkeit von der Wassersättigung bis zum Faktor 10^4 kleiner als im trockenen Zustand. Bei einem Tonanteil größer als 25 % findet kein signifikanter advektiver und diffusiver Stofftransport mehr statt.

Durch die Wahl der Sand/Ton-Mischungsverhältnisse können somit die gewünschten Durchlässigkeiten von Versatzkörpern und Abschlussbauwerken eingestellt werden. Die genaueren funktionellen Abhängigkeiten dieser Durchlässigkeiten von den Ausgangsmaterialien (verschiedene Tone und Mineralzuschläge), deren Korngrößenverteilung (Sand, Kies, Splitt) und deren Kompaktion sind jedoch noch zu ermitteln.

7 Literatur

- /AMY 60/ Amyx, J.; Bass, Jr., D. M.; Whiting, R. L.: Petroleum Reservoir Engineering, Physical Properties.- McGraw-Hill Book Company, New York (1960).
- /DAN 92/ D'Ans, Lax: Taschenbuch für Chemiker in Physiker, Band I, Physikalisch-chemische Daten, Springer Verlag, Berlin (1992)
- /BRO 64/ Brook, R.H.; Corey, A.T.: Hydraulic Properties of Porous Media.-Hydrol. Pap., vol. 3, Fort Collins, , Colorado State University, (1964).
- /DEB 99/ Debschütz, W. G.; Kroupa, M.: Messung der inneren Gesteinsoberfläche mittels Mehrpunkt-Stickstoff-Adsorptionsmessung, Abschlussbericht 1/99, Techn. Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften II.
- /GEN 80/ Van Genuchten, M.T.: A Closed-Form Equation for predicting the hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.- Soil Sci. Soc. Am. J., 44:892-898, (1980).
- /HAU 90/ Hauser, W.; Schmitt, R.E.; Köster, R.: Überlegungen und modellmäßige Berechnungen zur Entwicklung von Gasen bei der Endlagerung hochradioaktiver wärmeproduzierender Abfälle im Steinsalz, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Primärbericht 19.0301P 03A, (1990).
- /HEL 96/ Helmig, R.: Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik.- Eigenverlag des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Heft 86, (1996).
- /HEL 97/ Helmig, R.: Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface.- Berlin, Springer (1997).
- /JOS 72/ Jost,W.; Haufe, K.: Diffusion, Steinkopf Verlag, Darmstadt (1972).
- /KIE 91/ Kienzler, B.; Smailos, E.: Untersuchung der Korrosion von unlegierten Stählen in wässrigen Lösungen mittels thermodynamischer Gleichgewichtsrechnungen, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Primärbericht 10.03.02P 01B, (1991).

- /KOH 86/ Kohlrausch, F.: Praktische Physik Band 3, 23 Auflage, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart (1966).
- /KRO 88/ Kroth, K.; Lammert, H.: Untersuchungen zum Druckaufbau in 200-l-Fässern mit hochdruckverpresstem LAW, Kernforschungsanlage Jülich Jül-2198, (1988).
- /KRO 95/ Kroth, K.: Verfahren zur Abschätzung von Gasbildungsraten aus Gasanalyse-
sedaten, Kernforschungsanlage Jülich, interner Bericht, (1995).
- /LAI 76/ L'Air Liquide: Encyclopedie des Gaz, Elsevier, Amsterdam, (1976).
- /LID 94/ CRC Handbook of Chemistry and Physics, 75th Edition, CRC Press. Boca
Raton 1994
- /LIN/ Sondergase, Linde AG, Bereich Sondergase, Unterschleißheim bei Mün-
chen.
- /MAT 98/ MathSoft Inc.: MATHCAD 8 Benutzerhandbuch. MITP-Verlag, Bonn (1998).
- /SMA 95/ Smailos, E.; Köster, R.: Korrosionsuntersuchungen an ausgewählten me-
tallischen Werkstoffen als Behältermaterial für die Endlagerung von
hochradioaktiven Abfallprodukten in Salzformationen, Kernforschungszen-
trum Karlsruhe, Primärbericht 05.01.02P 01A, (1985).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Kapillardruck (p_c) nach dem Modell von Brooks/Corey (BC) und van Genuchten (vG) in Abhängigkeit von der effektiven Wassersättigung S_{we} für zwei unterschiedliche Parameterkombinationen.	8
Abb. 2.2	Gegenüberstellung der Relationen für die sättigungsabhängige relative Gas- (k_g) und Wasserpermeabilität (k_w) nach dem Modell von Brooks/Corey (BC) und van Genuchten (vG).....	9
Abb. 4.1	Schema der Hasslerzelle.	20
Abb. 4.2	Schema des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Gaspermeabilität, der Wasserpermeabilität und der Zweiphasenflussparameter.	20
Abb. 4.3	Messzelle zur Bestimmung der Gasdiffusionskonstanten.	25
Abb. 5.1	Gaspermeabilität als Funktion der Zeit.	29
Abb. 5.2	Gaspermeabilität der trockenen Proben in Abhängigkeit von den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und den Kompaktionsdrücken bei der Probenherstellung.....	29
Abb. 5.3	Gaspermeabilität als Funktion der Zeit für die relativen Feuchten des Stickstoffstroms vom 0, 55 und 100 %.	31
Abb. 5.4	Klinkenberg-Korrektur am Beispiel der Probe 90/10.7.8.....	32
Abb. 5.5	Ermittlung der Gaspermeabilität an einem Boom Clay-Bohrkern in Abhängigkeit von der Zeit bei Variation des hydrostatischen Einspanndruckes und des Gasinjektionsdruckes.	36
Abb. 5.6	Klinkenbergkorrektur der Gaspermeabilität an der Probe SED-B3-04 aus dem Untertagelabor Mont Terri.....	36
Abb. 5.7	Permeabilität an der Probe SED-B3-03 aus dem Untertagelabor Mont Terri in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Einspanndrucke zwischen 0,5 und 5 MPa.	37
Abb. 5.8	Gemessene Kapillardrücke für Ton-/Sandproben mit 10 % (oberes Diagramm) und 25 % (unteres Diagramm) Tonanteil in Abhängigkeit von der Wassersättigung.	39
Abb. 5.9	Gemessene relative Gaspermeabilitäten für Ton-/Sandproben mit 10 % (oberes Diagramm) und 25 % (unteres Diagramm) Tonanteil in Abhängigkeit von der Wassersättigung.....	40

Abb. 5.10	Relative Permeabilität und Kapillardruck in Abhängigkeit von der Wassersättigung. Messergebnisse für die Probe 10.7.8 und Kurvenanpassungen an die Beziehungen nach den Modellen von van Genuchten (vG) und Brooks/Corey (BC).	43
Abb. 5.11	Anpassung der Daten der Proben mit 10 % Tonanteil an die Relation von van Genuchten mit unterschiedlichen Werten für die Parameter n und m	45
Abb. 5.12	Relative Permeabilität und Kapillardruck in Abhängigkeit von der effektiven Wassersättigung S_e . Messergebnisse für alle Proben mit 10 % Tonanteil und visuelle Kurvenanpassungen an die Beziehungen nach den Modellen von van Genuchten (vG) und Brooks/Corey (BC).	46
Abb. 5.13	Anpassung der Messwerte für zwei Proben mit 25 % Tonanteil an das Modell von van Genuchten.	48
Abb. 5.15	Diffusionskonstanten für Kohlendioxid im luft- und wassererfüllten Porenraum in Abhängigkeit von den Sand/Ton-Mischungsverhältnissen und den Kompaktionsdrücken.	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Zusammenstellung der Porositäten und Einphasenpermeabilitäten dreier Sand/Ton-Mischungen, Kompaktionsdruck 100 MPa.....	34
Tab. 5.2	Bestwerte der Parameter zur Anpassung der Daten von Einzelproben mit 10 % Tonanteil an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey aus der Regressionsanalyse und Schätzwerte über die visuelle Anpassung.	42
Tab. 5.3	Schätzwerte der Parameter zur Anpassung der Daten aller Proben mit 10 % Tongehalt an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey über die visuelle Anpassung.	45
Tab. 5.4	Schätzwerte der Parameter zur Anpassung der Daten aller Proben mit 25 % Tongehalt an die Modelle von van Genuchten und Brooks/Corey über die visuelle Anpassung.	47
Tab. 8.5-1	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.4.....	67
Tab. 8.5-2	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.7.....	70
Tab. 8.5-3	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.0.....	71
Tab. 8.5-4	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.1.....	73
Tab. 8.5-5	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.2.....	74
Tab. 8.5-6	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.4.....	75
Tab. 8.5-7	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.6.....	76
Tab. 8.5-8	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.7.....	77
Tab. 8.5-9	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.9.....	78
Tab. 8.5-10	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.11.....	79
Tab. 8.5-11	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 8.12.....	80
Tab. 8.5-12	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.1.....	81
Tab. 8.5-13	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.2.....	82
Tab. 8.5-14	Wasseraufnahme und Permeabilität der Sand/Ton-Proben bei Variation der relativen Feuchte des Gastromes.....	83
Tab. 8.5-15	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.12.....	85
Tab. 8.5-16	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.13.....	86
Tab. 8.5-17	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.14.....	87
Tab. 8.5-18	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.15.....	88

Tab. 8.5-19	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.16.....	89
Tab. 8.5-20	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.17.....	90
Tab. 8.5-21	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.9.....	91
Tab. 8.5-22	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.11.....	92
Tab. 8.5-23	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.13.....	93
Tab. 8.5-24	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.12.....	94
Tab. 8.5-25	Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 9.15.....	95
Tab. 8.5-26	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 7.2.....	96
Tab. 8.5-27	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 7.8.....	97
Tab. 8.5-28	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 7.9.....	98
Tab. 8.5-29	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 7.10.....	99
Tab. 8.5-30	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 8.12.....	100
Tab. 8.5-31	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 8.16.....	101
Tab. 8.5-32	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 8.17.....	102
Tab. 8.5-33	Gas- und Wasserpermeabilitäten Probe 8.18.....	103
Tab. 8.5-34	Gaspermeabilität Probe 9.7.....	104
Tab. 8.5-35	Gaspermeabilität Probe 9.8.....	104
Tab. 8.5-36	Gaspermeabilität Probe SED-B3-04 Untertagelabor Mont Terri.....	105
Tab. 8.5-37	Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Kern 2: Mont Terri Tonkern [SE-B3-03 // 3,90-3,99].....	106
Tab. 8.5-38	Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Kern 3: Mont Terri Tonkern [SE-B3-03 // 4,00-4,10].....	108
Tab. 8.5-39	Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Kern 4: Mont Terri Tonkern [SE-B3-01 // 3,60-3,70].....	109
Tab. 8.5-40	Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Kern 5: Mont Terri Tonkern [SE-B3-01 // 3,50-3,59].....	110
Tab. 8.5-41	Diffusionskonstanten für Wasserstoff, Helium, Methan mit Kohlendioxid in Sand/Ton-Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke.....	111
Tab. 8.5-42	Innere Oberfläche von Bausand, Calcigel und Opalinus-Ton von kompaktierten Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse.....	112

8 Anhang: Messwerte

In diesem Anhang sind die Ergebnisse der Messungen an den im Bericht genannten Proben mit den zugehörigen Präparations- und Messbedingungen tabellarisch zusammengestellt.

Tab. 8.5-1 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.4

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 100,0 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,004	0
2,2	2592	0,5	0,005	0
18,3	31355	0,5	0,005	0
50,9	67954	0,5	0,004	0
67,7	87989	0,5	0,004	0
97,0	120120	0,5	0,004	0
162,0	204988	0,5	0,003	0
193,4	241964	0,5	0,003	0
218,5	275040	0,5	0,004	0
242,0	313925	0,5	0,004	0
267,0	361447	0,5	0,005	0
363,5	527520	0,5	0,005	0
455,5	697330	0,5	0,006	0
504,5	793390	0,5	0,005	0
528,4	837456	0,5	0,004	0
597,8	968780	0,5	0,004	0
666,6	1124519	0,5	0,006	0
698,4	1170588	0,5	0,004	0
713,7	1190680	0,5	0,004	0
746,3	1225843	0,5	0,004	0
767,3	1249015	0,5	0,004	0
833,7	1317700	0,5	0,004	0
842,0	1328419	0,5	0,005	0
866,0	1365865	0,5	0,003	0
882,4	1388336	0,5	0,004	0
890,6	1396398	0,5	0,003	0
907,3	1409710	0,5	0,003	0
932,0	1446702	0,5	0,005	0
1002,0	1546024	0,5	0,005	0
1034,5	1587905	0,5	0,005	0
1058,0	1620003	0,5	0,005	0

Fortsetzung 1 Tab. 8.5-1

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
1074,7	1644525	0,5	0,005	0
1099,4	1687785	0,5	0,046	55
1147,2	1710274	0,5	0,058	55
1150,9	1715839	0,5	0,020	55
1218,3	1878179	0,5	0,018	55
1267,1	1999184	0,5	0,018	55
1120,6	1695619	0,5	0,046	55
1288,0	2053927	0,5	0,018	55
1314,1	2082620	0,5	0,008	55
1386,6	2158422	0,5	0,007	55
1410,0	2178272	0,5	0,007	55
1434,3	2201953	0,5	0,007	55
1483,4	2241861	0,5	0,007	55
1560,3	2309463	0,5	0,007	55
1583,4	2335354	0,5	0,007	55
1602,0	2348860	0,5	0,007	55
1625,5	2365475	0,5	0,007	55
1648,8	2381515	0,5	0,008	55
1719,3	2431575	0,5	0,008	55
1747,3	2449774	0,5	0,007	55
1777,0	2468563	0,5	0,006	55
1797,4	2482701	0,5	0,006	55
1817,8	2496674	0,5	0,006	55
1890,6	2531662	0,5	0,007	55
1897,0	2536485	0,5	0,006	55
1912,1	2549800	0,5	0,006	55
1937,6	2571890	0,5	0,006	55
1943,8	2576015	0,5	0,006	55
1966,2	2594897	0,5	0,006	55
1984,5	2609420	0,5	0,006	55
2064,0	2677816	0,5	0,006	55
2087,1	2694865	0,5	0,006	55
2113,0	2698978	0,5	0,008	100
2128,3	2724867	0,5	0,008	100
2227,1	2887959	0,5	0,008	100
2248,0	2923325	0,5	0,008	100
2280,9	2967530	0,5	0,008	100
2296,3	2988872	0,5	0,008	100
2324,9	3026853	0,5	0,008	100
2399,9	3133199	0,5	0,008	100
2422,6	3165370	0,5	0,008	100
2447,3	3200771	0,5	0,008	100
2467,8	3230961	0,5	0,008	100
2516,3	3301365	0,5	0,008	100
2585,7	3407599	0,5	0,008	100
2614,8	3452405	0,5	0,008	100
2640,8	3491427	0,5	0,008	100

Fortsetzung 2 Tab. 8.5-1

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
2659,1	3520738	0,5	0,008	100
2753,9	3672989	0,5	0,008	100
2783,8	3718126	0,5	0,008	100
2807,3	3754517	0,5	0,008	100
2831,1	3789568	0,5	0,008	100
2901,9	3903936	0,5	0,008	100
2927,9	3940996	0,5	0,008	100
2728,3	3633383	0,5	0,008	100
2951,4	3975967	0,5	0,008	100
2970,0	4003684	0,5	0,008	100
3064,8	4145199	0,5	0,008	100

Tab. 8.5-2 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.7

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 104,2 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0023	0
69,9	83388	0,5	0,0023	0
93,8	109184	0,5	0,0013	0
118,3	135907	0,5	0,0012	0
149,8	171098	0,5	0,0010	0
166,5	190522	0,5	0,0013	0
238,2	278227	0,5	0,0025	0
240,3	280720	0,5	0,0031	0
261,8	297734	0,5	0,0015	55
286,7	323907	0,5	0,0017	55
317,5	356133	0,5	0,0021	55
334,1	373106	0,5	0,0017	55
406,0	444753	0,5	0,0015	55
430,0	468585	0,5	0,0013	55
453,6	489950	0,5	0,0011	55
477,5	510668	0,5	0,0010	55
503,5	535888	0,5	0,0010	55
574,5	611419	0,5	0,0017	55
605,7	616099	0,5	0,0013	100
621,5	631661	0,5	0,0018	100
649,0	661962	0,5	0,0020	100
669,5	683590	0,5	0,0010	100
741,3	764158	0,5	0,0010	100
765,8	789865	0,5	0,0010	100
790,3	813357	0,5	0,0017	100
814,3	836262	0,5	0,0013	100
838,0	858060	0,5	0,0014	100
909,7	924975	0,5	0,0018	100
934,0	947861	0,5	0,0020	100
966,3	978331	0,5	0,0021	100
982,7	993130	0,5	0,0018	100
1006,1	1015065	0,5	0,0015	100
1078,1	1044120	0,5	0,0010	100
1105,5	1066679	0,5	0,0010	100
1126,0	1084219	0,5	0,0010	100
1150,1	1105009	0,5	0,0010	100
1174,0	1124319	0,5	0,0010	100
1245,8	1184346	0,5	0,0010	100

Tab. 8.5-3 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.0

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 100,0 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0010	0
17,7	13559	0,5	0,0010	0
90,4	71589	0,5	0,0010	0
96,8	75379	0,5	0,0010	0
111,9	86792	0,5	0,0010	0
120,1	87714	0,5	0,0010	0
137,4	98397	0,5	0,0010	0
143,7	100753	0,5	0,0010	0
166,0	110790	0,5	0,0010	0
184,5	118171	0,5	0,0010	0
256,1	150071	0,5	0,0010	0
290,3	161628	0,5	0,0010	0
310,4	169874	0,5	0,0010	0
430,1	316171	0,5	0,0030	55
451,0	348641	0,5	0,0030	55
483,9	399609	0,5	0,0030	55
499,2	425114	0,5	0,0030	55
527,9	471374	0,5	0,0030	55
602,9	602558	0,5	0,0030	55
625,6	641829	0,5	0,0030	55
650,2	684818	0,5	0,0030	55
670,7	721380	0,5	0,0030	55
719,2	808074	0,5	0,0030	55
788,7	938677	0,5	0,0030	55
817,8	993935	0,5	0,0030	55
843,7	1042790	0,5	0,0030	55
862,1	1078799	0,5	0,0030	55
931,3	1217542	0,5	0,0030	55
934,0	1222369	0,5	0,0030	55
986,7	1246333	0,5	0,0020	100
1010,3	1266334	0,5	0,0015	100
1034,1	1286166	0,5	0,0010	100
1104,9	1352470	0,5	0,0010	100
1130,9	1374077	0,5	0,0010	100
1154,4	1394750	0,5	0,0010	100
1173,0	1411593	0,5	0,0010	100
1274,3	1516979	0,5	0,0010	100
1299,2	1541580	0,5	0,0010	100
1339,4	1582446	0,5	0,0020	100
1363,6	1606509	0,5	0,0030	100

Fortsetzung 1 Tab. 8.5-3

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
1442,2	1676058	0,5	0,0020	100
1465,7	1689294	0,5	0,0020	100
1486,4	1697843	0,5	0,0020	100
1507,8	1707648	0,5	0,0020	100
1533,9	1721417	0,5	0,0020	100
1611,2	1770766	0,5	0,0020	100
1657,2	1797909	0,5	0,0020	100
1780,0	1900901	0,5	0,0020	100
1795,4	1913847	0,5	0,0020	100
1827,3	1934438	0,5	0,0020	100
1850,2	1947209	0,5	0,0020	100
1872,2	1958712	0,5	0,0020	100
1964,5	2012172	0,5	0,0015	100
1988,7	2027477	0,5	0,0015	100

Tab. 8.5-4 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.1

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 100,0 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,001	0
4,5	2515	0,5	0,001	0
25,0	9173	0,5	0,001	0
73,5	41130	0,5	0,002	0
142,9	86549	0,5	0,002	0
165,3	100666	0,5	0,002	0
198,0	116023	0,5	0,001	55
216,3	127630	0,5	0,001	55
293,1	176533	0,5	0,003	55
311,2	188261	0,5	0,003	55
341,6	207130	0,5	0,004	55
359,8	219047	0,5	0,004	55
382,4	233056	0,5	0,004	55
388,3	236506	0,5	0,004	55
459,2	283482	0,5	0,002	55
477,8	295598	0,5	0,003	55
508,7	315212	0,5	0,003	55
527,3	327456	0,5	0,003	55
628,7	396215	0,5	0,003	55
653,4	411758	0,5	0,003	55
670,0	423006	0,5	0,003	55
671,3	423903	0,5	0,003	55
701,3	425325	0,5	0,003	100
717,8	441930	0,5	0,004	100
796,5	512887	0,5	0,003	100
820,0	529393	0,5	0,003	100
863,5	548213	0,5	0,004	100
888,2	564824	0,5	0,004	100
965,4	624206	0,5	0,004	100
983,5	637477	0,5	0,004	100
1011,4	657252	0,5	0,004	100
1134,3	770226	0,5	0,003	100
1156,7	790462	0,5	0,003	100
1172,8	804250	0,5	0,003	100
1181,3	809663	0,5	0,002	100
1204,2	825826	0,5	0,002	100
1226,2	840877	0,5	0,002	100
1318,5	912523	0,5	0,003	100

Tab. 8.5-5 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.2

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 50 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 93,0 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0080	0
22,5	56897	0,5	0,0080	0
46,7	120675	0,5	0,0080	0
118,7	321241	0,5	0,0080	0
148,8	395050	0,5	0,0070	0
168,0	433994	0,5	0,0060	0
169,4	436721	0,5	0,0060	0
197,0	447038	0,5	0,0100	55
217,0	496130	0,5	0,0100	55
294,3	712108	0,5	0,0100	55
312,0	761291	0,5	0,0110	55
340,3	837103	0,5	0,0110	55
454,9	1221286	0,5	0,0160	55
463,1	1241580	0,5	0,0110	55
485,8	1293283	0,5	0,0110	55
510,4	1335527	0,5	0,0080	55
533,3	1370635	0,5	0,0070	55
555,2	1402147	0,5	0,0070	55
653,9	1564130	0,5	0,0080	55
671,8	1596803	0,5	0,0080	55
676,7	1604867	0,5	0,0080	55
720,5	1606403	0,5	0,0060	100
795,3	1688713	0,5	0,0050	100
815,0	1714498	0,5	0,0060	100
837,4	1746660	0,5	0,0070	100
861,5	1767163	0,5	0,0070	100
864,3	1771300	0,5	0,0070	100
886,2	1802966	0,5	0,0070	100
958,8	1951653	0,5	0,0100	100
981,6	2005130	0,5	0,0110	100
1007,3	2063820	0,5	0,0100	100
1030,3	2119944	0,5	0,0110	100
1056,6	2190021	0,5	0,0110	100
1128,6	2335224	0,5	0,0080	100
1153,2	2377163	0,5	0,0080	100
1173,6	2416871	0,5	0,0080	100
1180,3	2429060	0,5	0,0080	100

Tab. 8.5-6 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.4

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 100,03 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0042	0
69,9	173562	0,5	0,0052	0
93,8	203622	0,5	0,0018	0
118,3	234446	0,5	0,0017	0
149,8	275329	0,5	0,0013	0
166,5	298075	0,5	0,0017	0
238,2	401538	0,5	0,0030	0
261,8	432327	0,5	0,0030	0
286,7	463650	0,5	0,0030	0
288,7	466247	0,5	0,0034	0
317,5	487288	0,5	0,0026	55
334,1	498937	0,5	0,0016	55
406,0	547108	0,5	0,0014	55
430,0	561720	0,5	0,0011	55
453,6	574121	0,5	0,0007	55
477,5	594106	0,5	0,0010	55
503,5	629326	0,5	0,0022	55
574,5	766335	0,5	0,0041	55
600,0	815876	0,5	0,0040	55
621,5	856851	0,5	0,0041	55
649,0	917211	0,5	0,0051	55
669,5	959301	0,5	0,0038	55
741,3	1147378	0,5	0,0047	55
744,1	1154549	0,5	0,0036	55
790,3	1183944	0,5	0,0030	100
814,3	1215930	0,5	0,0028	100
838,0	1244986	0,5	0,0027	100
909,7	1333599	0,5	0,0034	100
934,0	1362900	0,5	0,0034	100
966,3	1404030	0,5	0,0037	100
982,7	1424601	0,5	0,0035	100
1006,1	1452340	0,5	0,0029	100
1078,1	1524285	0,5	0,0021	100
1105,5	1549419	0,5	0,0018	100
1126,0	1571779	0,5	0,0023	100
1150,1	1599629	0,5	0,0023	100
1174,0	1620199	0,5	0,0018	100
1245,8	1707553	0,5	0,0018	100

Tab. 8.5-7 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.6

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 101,4 mm
 Probendurchmesser: 49,9 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0025	0
69,9	111130	0,5	0,0026	0
93,8	145740	0,5	0,0016	0
118,3	181691	0,5	0,0015	0
149,8	228673	0,5	0,0010	0
166,5	254888	0,5	0,0014	0
238,2	370671	0,5	0,0027	0
261,8	406065	0,5	0,0027	0
262,9	407862	0,5	0,0026	0
287,0	433212	0,5	0,0031	55
317,8	477888	0,5	0,0033	55
334,4	501319	0,5	0,0029	55
406,3	601359	0,5	0,0027	55
430,3	634748	0,5	0,0024	55
453,9	664458	0,5	0,0021	55
455,3	666292	0,5	0,0022	55
477,8	691634	0,5	0,0019	100
503,8	730466	0,5	0,0022	100
574,8	841471	0,5	0,0029	100
600,3	878644	0,5	0,0026	100
621,8	910183	0,5	0,0028	100
649,3	952828	0,5	0,0032	100
669,8	981764	0,5	0,0019	100
741,7	1095213	0,5	0,0019	100
766,2	1132901	0,5	0,0021	100
790,7	1170621	0,5	0,0032	100
814,7	1207787	0,5	0,0029	100
838,3	1243880	0,5	0,0029	100
910,0	1354059	0,5	0,0034	100
934,3	1391274	0,5	0,0036	100
966,7	1423033	0,5	0,0027	100
983,0	1436515	0,5	0,0021	100

Tab. 8.5-8 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.7

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 50 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 99,90 mm
 Probendurchmesser: 49,80 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0
22,8	22003	0,5	0,0032	0
52,6	51461	0,5	0,0028	0
70,3	71124	0,5	0,0026	0
95,5	100376	0,5	0,0020	0
166,2	189612	0,5	0,0019	0
193,0	223978	0,5	0,0019	0
196,0	227904	0,5	0,0020	0
214,4	252331	0,5	0,0025	0
240,3	287580	0,5	0,0026	0
262,3	318920	0,5	0,0029	0
335,9	429600	0,5	0,0030	0
358,1	462261	0,5	0,0035	0
382,8	488260	0,5	0,0025	55
407,5	524177	0,5	0,0022	55
430,3	557739	0,5	0,0028	55
502,4	665627	0,5	0,0020	55
532,8	710549	0,5	0,0021	55
555,8	744361	0,5	0,0023	55
580,2	780368	0,5	0,0029	55
599,0	808552	0,5	0,0029	55
670,3	916081	0,5	0,0022	55
725,5	922963	0,5	0,0020	100
742,8	943512	0,5	0,0020	100
768,5	975347	0,5	0,0024	100
840,1	1071904	0,5	0,0025	100
863,6	1103315	0,5	0,0023	100
891,8	1140223	0,5	0,0025	100
911,0	1165122	0,5	0,0026	100
934,8	1195567	0,5	0,0025	100
1007,3	1289612	0,5	0,0025	100
1030,3	1319185	0,5	0,0025	100

Tab. 8.5-9 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.9

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 50 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 98,6 mm
 Probendurchmesser: 49,9 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	Relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0
22,8	38147	0,5	0,0017	0
52,6	88080	0,5	0,0012	0
70,3	118297	0,5	0,0017	0
95,5	160951	0,5	0,0014	0
166,2	283125	0,5	0,0018	0
193,0	329344	0,5	0,0016	0
196,0	334610	0,5	0,0017	0
214,4	358292	0,5	0,0016	0
240,3	391679	0,5	0,0017	0
262,3	420540	0,5	0,0019	0
335,9	520256	0,5	0,0019	0
358,1	548980	0,5	0,0024	0
382,8	580882	0,5	0,0025	0
407,5	614224	0,5	0,0019	55
430,3	654285	0,5	0,0026	55
502,4	780935	0,5	0,0017	55
532,8	833104	0,5	0,0018	55
555,8	872248	0,5	0,0020	55
580,2	913836	0,5	0,0026	55
599,0	942783	0,5	0,0024	55
670,3	1069555	0,5	0,0020	55
725,5	1080871	0,5	0,0020	100
742,8	1112459	0,5	0,0020	100
768,5	1158234	0,5	0,0023	100
840,1	1288214	0,5	0,0024	100
863,6	1329559	0,5	0,0022	100
891,8	1378340	0,5	0,0024	100
911,0	1411113	0,5	0,0024	100
934,8	1451155	0,5	0,0024	100
1007,3	1573175	0,5	0,0025	100
1030,3	1612127	0,5	0,0026	100

Tab. 8.5-10 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.11

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 98,3 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0
1,2	1706	0,5	0,0020	0
16,7	25706	0,5	0,0028	0
88,3	140960	0,5	0,0040	0
111,9	177695	0,5	0,0040	0
136,8	215760	0,5	0,0040	0
167,7	263527	0,5	0,0043	0
184,3	288795	0,5	0,0037	0
256,2	397824	0,5	0,0035	0
280,2	434420	0,5	0,0031	0
303,8	467552	0,5	0,0028	0
327,7	500300	0,5	0,0020	0
353,7	513528	0,5	0,0015	55
424,7	560036	0,5	0,0022	55
450,2	576157	0,5	0,0019	55
471,7	589704	0,5	0,0021	55
499,2	607370	0,5	0,0026	55
519,7	619851	0,5	0,0013	55
591,5	665648	0,5	0,0013	55
616,0	680921	0,5	0,0015	55
640,5	696126	0,5	0,0024	55
672,3	703792	0,5	0,0022	100
688,2	732561	0,5	0,0023	100
759,8	842929	0,5	0,0029	100
784,2	873182	0,5	0,0031	100
816,5	909518	0,5	0,0031	100
832,8	926203	0,5	0,0027	100
856,3	947396	0,5	0,0021	100
928,3	1005305	0,5	0,0015	100
955,7	1024456	0,5	0,0013	100
976,2	1038281	0,5	0,0013	100
1000,3	1054654	0,5	0,0010	100
1024,2	1069676	0,5	0,0010	100
1096,0	1111193	0,5	0,0010	100

Tab. 8.5-11 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 8.12

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 98,7 mm
 Probendurchmesser: 49,9 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0
70,1	63618	0,5	0,0010	0
97,5	88780	0,5	0,0010	0
118,0	106750	0,5	0,0010	0
142,1	129146	0,5	0,0010	0
166,0	149440	0,5	0,0010	0
237,8	219672	0,5	0,0010	0
270,3	251337	0,5	0,0010	0
294,3	273357	0,5	0,0010	0
310,7	288691	0,5	0,0010	0
430,8	301663	0,5	0,0010	55
460,6	322315	0,5	0,0010	55
478,3	335296	0,5	0,0010	55
503,5	353902	0,5	0,0010	55
574,2	409441	0,5	0,0013	55
601,0	430617	0,5	0,0013	55
604,0	433068	0,5	0,0013	55
622,4	465225	0,5	0,0027	55
648,3	510624	0,5	0,0029	55
670,3	550531	0,5	0,0032	55
743,9	694791	0,5	0,0034	55
744,6	695982	0,5	0,0034	55
790,8	729966	0,5	0,0021	100
815,5	764620	0,5	0,0018	100
838,3	797210	0,5	0,0025	100
910,4	904821	0,5	0,0017	100
940,8	950526	0,5	0,0020	100
963,8	985068	0,5	0,0023	100
988,2	1022337	0,5	0,0024	100
1007,0	1052047	0,5	0,0029	100
1078,3	1168088	0,5	0,0023	100

Tab. 8.5-12 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.1

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 102,4 mm
 Probendurchmesser: 48,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0010	0
5,9	6570	0,5	0,0010	0
22,7	26224	0,5	0,0010	0
100,3	125694	0,5	0,0005	0
120,0	154205	0,5	0,0010	0
142,4	189220	0,5	0,0010	0
169,3	192317	0,5	0,0010	55
191,2	215939	0,5	0,0010	55
262,8	315179	0,5	0,0013	55
286,6	349322	0,5	0,0011	55
312,3	385999	0,5	0,0015	55
340,8	427794	0,5	0,0022	55
361,6	459906	0,5	0,0024	55
433,6	562306	0,5	0,0017	55
458,2	594159	0,5	0,0018	55
478,6	622878	0,5	0,0016	55
503,0	656986	0,5	0,0015	55
529,3	691537	0,5	0,0013	55
598,5	789201	0,5	0,0013	55
603,8	797727	0,5	0,0018	55
647,2	829530	0,5	0,0015	100
678,0	885149	0,5	0,0016	100
696,2	919031	0,5	0,0020	100
768,1	1049754	0,5	0,0018	100
798,6	1101330	0,5	0,0023	100
820,7	1143002	0,5	0,0024	100
839,1	1179258	0,5	0,0030	100
868,1	1231936	0,5	0,0029	100
941,3	1323857	0,5	0,0027	100
965,3	1418587	0,5	0,0031	100
965,3	1463977	0,5	0,0031	100
988,8	1508002	0,5	0,0034	100
1010,3	1530757	0,5	0,0027	100
1084,3	1619689	0,5	0,0028	100
1102,5	1638147	0,5	0,0022	100
1129,1	1666672	0,5	0,0022	100

Tab. 8.5-13 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.2

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 101,8 mm
 Probendurchmesser: 48,5 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0023	0
5,8	11139	0,5	0,0020	0
22,6	43916	0,5	0,0020	0
100,3	199821	0,5	0,0020	0
119,9	243094	0,5	0,0020	0
142,3	294726	0,5	0,0020	0
169,3	299754	0,5	0,0020	55
191,1	349300	0,5	0,0020	55
262,7	572782	0,5	0,0040	55
286,5	620866	0,5	0,0025	55
312,3	671355	0,5	0,0025	55
335,3	716340	0,5	0,0034	55
361,5	768210	0,5	0,0037	55
441,7	770449	0,5	0,0020	55
462,1	792571	0,5	0,0025	55
482,5	827010	0,5	0,0025	55
506,9	861260	0,5	0,0023	55
533,3	894690	0,5	0,0020	55
602,4	987846	0,5	0,0020	55
626,5	1022663	0,5	0,0025	55
651,0	1058188	0,5	0,0020	55
681,9	1098813	0,5	0,0025	100
700,1	1128750	0,5	0,0027	100
772,0	1235049	0,5	0,0024	100
802,5	1272788	0,5	0,0014	100
824,6	1307273	0,5	0,0017	100
843,0	1333604	0,5	0,0021	100
872,0	1367795	0,5	0,0018	100
945,3	1461728	0,5	0,0017	100
969,3	1490208	0,5	0,0016	100
993,3	1519338	0,5	0,0021	100
1016,8	1547168	0,5	0,0022	100
1038,3	1563228	0,5	0,0017	100
1112,3	1618868	0,5	0,0018	100
1130,4	1627348	0,5	0,0010	100

Tab. 8.5-14 Wasseraufnahme und Permeabilität der Sand/Ton-Proben bei Variation der relativen Feuchte des Gastromes

Sand/Ton-Mischungsverhältnisse: 90/10, 75/25, 50/50
 Kompaktionsdruck: 25, 50, 100 MPa

Probe Nr.:	Mischungsverhältnis	Kompaktionsdruck	Feuchte des Stickstoffstromes - [%]	Dauer der Durchströmung [h]	Gesamtmenge Stickstoffstrom [m ³]	Gesamtmenge Wasser im Stickstoffstrom [g]	Probengewicht vor der Durchströmung [g]	absorbierte Wassermenge [g]	ausgetretene Wassermenge [g]	Permeabilität am Ende der Durchströmung [m ²]
7.4	90/10	100 MPa	0	1075	1,64	0,0	414,15	-2,76	2,76	7,48E-14
			55	1012	1,05	10,0	411,39	3,48	6,51	3,11E-14
			100	978	1,45	25,1	414,87	4,84	20,25	4,68E-14
7.7	90/10	100 MPa	0	240	0,28	0,0	424,71	-4,17	4,17	1,03E-13
			55	335	0,33	3,1	420,54	1,77	1,38	1,68E-13
			100	671	0,57	9,9	422,31	1,72	8,19	2,26E-13
8.0	75/25	100 MPa	0	310	0,17	0,0	390,50	-0,10	0,10	1,10E-13
			55	624	1,05	10,0	390,40	6,30	3,71	1,50E-13
			100	1055	0,81	13,9	396,70	4,40	9,53	1,10E-13
8.1	75/25	25 MPa	0	165	0,10	0,0	390,45	0,20	-0,20	8,12E-14
			55	506	0,32	3,1	390,65	3,44	-0,36	5,76E-14
			100	647	0,49	8,5	394,09	5,70	2,75	6,64E-14
8.2	75/25	50 MPa	0	169	0,44	0,0	367,53	-0,71	0,71	7,55E-14
			55	508	1,17	11,1	366,82	5,90	5,21	4,86E-14
			100	503	0,82	14,3	372,72	6,58	7,68	5,26E-14
8.4	75/25	100 MPa	0	289	0,47	0,0	407,65	-1,94	1,94	9,82E-14
			55	455	0,69	6,5	405,71	4,83	1,72	1,86E-13
			100	502	0,55	9,6	410,54	3,65	5,92	1,75E-13
8.6	75/25	100 MPa	0	263	0,41	0,0	403,82	-0,73	0,73	1,55E-13
			55	192	0,26	2,5	403,09	2,36	0,10	1,54E-13
			100	528	0,77	13,3	405,45	6,97	6,35	1,03E-13

Fortsetzung 1 Tab. 8.5-14

Probe Nr.:	Feuchte des Stickstoffstromes - [%]	Dauer der Durchströmung [h]	Gesamtmenge Stickstoffstrom [m³]	Gesamtmenge Wasser im Stickstoffstrom [g]	Probengewicht vor der Durchströmung [g]	absorbierte Wassermenge [g]	ausgetretene Wassermenge [g]	Permeabilität am Ende der Durchströmung [m²]
8.7	0	358	0,46	0,0	394,61	-0,96	0,96	1,09E-13
75/25	55	312	0,45	4,3	393,65	4,14	0,18	1,78E-13
50 MPa	100	360	0,40	7,0	397,79	4,36	2,61	1,33E-13
8.9	0	383	0,58	0,0	388,61	-0,19	0,19	1,31E-13
75/25	55	287	0,49	4,6	388,42	2,98	1,67	2,27E-13
50 MPa	100	360	0,54	9,4	391,40	4,26	5,13	1,66E-13
8.11	0	328	0,50	0,0	392,03	-1,06	1,06	1,80E-13
75/25	55	313	0,20	1,9	390,97	1,12	0,74	6,78E-14
25 MPa	100	455	0,42	7,2	392,09	4,15	3,03	1,53E-13
12	0	311	0,29	0,0	394,17	-0,48	0,48	2,40E-13
75/25	55	434	0,41	3,9	393,69	3,18	0,70	1,33E-13
25 MPa	100	333	0,47	8,2	396,87	5,48	2,69	1,81E-13
9.1	0	142	0,19	0,0	328,01	-0,21	0,21	4,38E-13
50/50	55	462	0,61	5,8	327,80	4,66	1,13	2,48E-13
25 MPa	100	525	0,87	15,0	332,46	9,65	5,38	1,36E-13
9.2	0	142	0,29	0,0	330,83	-0,32	0,32	3,21E-13
50/50	55	509	0,76	7,3	330,51	7,42	-0,16	2,02E-13
25 MPa	100	479	0,57	9,8	337,93	7,01	2,84	1,31E-13

Tab. 8.5-15 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.12

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Kompaktionsdruck: 50 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 98,5 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0,0
3,5	3981	0,5	0,0011	0,0
26,0	34230	0,5	0,0013	0,0
44,7	62112	0,5	0,0014	0,0
51,6	72590	0,5	0,0015	0,0
68,7	101381	0,5	0,0016	0,0
70,4	104348	0,5	0,0016	0,0
75,6	112987	1,0	0,0016	0,0
92,4	139893	1,0	0,0015	0,0
96,6	146737	1,0	0,0015	0,0
164,1	257989	1,0	0,0015	0,0
165,7	260750	1,0	0,0015	0,0
171,8	271336	2,0	0,0016	0,0
190,3	302953	2,0	0,0017	0,0
195,4	311685	2,0	0,0017	0,0
212,3	341688	2,0	0,0017	0,0
219,3	353040	2,0	0,0016	0,0
236,4	380277	2,0	0,0015	0,0
243,2	390999	2,0	0,0015	0,0
261,8	421233	2,0	0,0015	0,0
331,4	533815	2,0	0,0016	0,0

Tab. 8.5-16 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.13

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
Kompaktionsdruck: 50 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 100,6 mm
Probendurchmesser: 50,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [Mpa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0,0
6,8	8224	0,5	0,0011	0,0
23,2	26592	0,5	0,0011	0,0
28,4	32685	0,5	0,0011	0,0
94,8	112217	0,5	0,0011	0,0
98,8	115957	0,5	0,0011	0,0
101,8	119874	1,0	0,0012	0,0
120,6	143139	1,0	0,0012	0,0
126,6	150650	1,0	0,0012	0,0
143,2	171702	1,0	0,0012	0,0
150,0	180682	1,0	0,0013	0,0
169,0	206369	1,0	0,0013	0,0
170,9	208965	1,0	0,0013	0,0
174,5	214027	2,0	0,0014	0,0
194,3	242800	2,0	0,0014	0,0
262,9	346855	2,0	0,0015	0,0
270,5	358826	2,0	0,0016	0,0
287,0	385440	2,0	0,0017	0,0

Tab. 8.5-17 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.14

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
Kompaktionsdruck: 50 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 101,0 mm
Probendurchmesser: 50,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,50	0,0000	0,0
4,4	5949	0,50	0,0010	0,0
22,2	28236	0,50	0,0011	0,0
30,5	38649	0,50	0,0010	0,0
44,3	55637	0,50	0,0010	0,0
52,3	65679	0,50	0,0010	0,0
67,8	85111	0,50	0,0010	0,0
70,1	88044	0,50	0,0010	0,0
74,2	93420	1,00	0,0011	0,0
140,4	178807	1,00	0,0011	0,0
142,8	181964	1,00	0,0010	0,0
164,3	206080	2,00	0,0009	0,0
171,8	214422	2,00	0,0009	0,0
190,5	235047	2,00	0,0009	0,0
212,5	258788	2,00	0,0009	0,0
219,8	266726	2,00	0,0009	0,0
241,8	291063	2,00	0,0009	0,0
308,4	364450	2,00	0,0009	0,0

Tab. 8.5-18 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.15

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
Kompaktionsdruck: 25 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 102,2 mm
Probendurchmesser: 50,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [Mpa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,1	0,0000	0,0
16,1	31954	0,1	0,0020	0,0
24,8	53006	0,1	0,0024	0,0
49,1	67577	0,1	0,0020	0,0
66,7	112459	0,1	0,0025	0,0
73,4	124551	0,5	0,0018	0,0
90,2	161024	0,5	0,0022	0,0
97,3	177139	0,5	0,0023	0,0
113,8	223723	0,5	0,0028	0,0
120,6	235932	1,0	0,0019	0,0
137,4	270008	1,0	0,0021	0,0
142,1	280143	1,0	0,0022	0,0
215,1	484276	1,0	0,0029	0,0
240,3	569206	2,0	0,0037	0,0
264,3	651726	2,0	0,0041	0,0
287,8	730506	2,0	0,0045	0,0

Tab. 8.5-19 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit Probe 7.16

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 102,5 mm
 Probendurchmesser: 50,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [Mpa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,15	0,0000	0,0
30,1	51261	0,15	0,0014	0,0
47,5	75491	0,15	0,0012	0,0
51,8	81183	0,15	0,0011	0,0
119,7	165963	0,15	0,0010	0,0
125,5	173044	0,50	0,0010	0,0
144,7	197361	0,50	0,0011	0,0
168,3	242616	0,50	0,0017	0,0
176,2	258082	0,50	0,0018	0,0
192,2	279893	0,50	0,0012	0,0
199,5	292444	1,00	0,0015	0,0
215,7	320488	1,00	0,0015	0,0
221,0	330040	1,00	0,0016	0,0
287,2	470845	1,00	0,0019	0,0

Tab. 8.5-20 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 7.17

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
Kompaktionsdruck: 25 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 108,6 mm
Probendurchmesser: 50,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [Mpa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,10	0,0000	0,0
17,3	17435	0,10	0,0009	0,0
40,9	42899	0,10	0,0010	0,0
48,8	53103	0,10	0,0012	0,0
64,8	76790	0,10	0,0013	0,0
72,0	88893	0,50	0,0015	0,0
88,3	116381	0,50	0,0015	0,0
93,6	125441	0,50	0,0016	0,0
159,8	244142	0,50	0,0017	0,0
168,8	256066	1,00	0,0017	0,0
183,8	284290	1,00	0,0018	0,0
192,3	300609	1,00	0,0018	0,0
208,4	329762	1,00	0,0019	0,0
217,1	345399	1,00	0,0019	0,0
312,1	356504	1,00	0,0013	0,0
329,7	385348	1,00	0,0014	0,0
336,4	396297	2,00	0,0015	0,0
353,2	425168	2,00	0,0015	0,0
360,3	437166	2,00	0,0015	0,0
376,8	465896	2,00	0,0015	0,0
383,6	477683	2,00	0,0016	0,0
400,4	508279	2,00	0,0016	0,0

Tab. 8.5-21 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.9

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
Kompaktionsdruck: 100 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 94,6 mm
Probendurchmesser: 47,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0,0
5,5	5907	0,5	0,0031	0,0
21,9	21677	0,5	0,0030	0,0
27,2	27450	0,5	0,0038	0,0
93,5	99259	0,5	0,0036	0,0
97,5	103930	0,5	0,0037	0,0
100,6	107731	1,0	0,0040	0,0
119,3	132285	1,0	0,0041	0,0
125,3	140972	1,0	0,0041	0,0
141,9	165888	1,0	0,0043	0,0
148,8	176118	1,0	0,0044	0,0
167,8	205190	1,0	0,0046	0,0
169,7	208243	1,0	0,0046	0,0
173,3	213885	2,0	0,0053	0,0
193,0	246550	2,0	0,0057	0,0
261,7	365406	2,0	0,0060	0,0
269,2	378764	2,0	0,0063	0,0
285,7	408674	2,0	0,0067	0,0

Tab. 8.5-22 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.11

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Kompaktionsdruck: 100 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 96,2 mm
 Probendurchmesser: 47,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0,0
3,3	3889	0,5	0,0029	0,0
4,8	5978	0,5	0,0041	0,0
22,0	28625	0,5	0,0037	0,0
28,6	37007	0,5	0,0035	0,0
47,3	61664	0,5	0,0036	0,0
53,2	69214	0,5	0,0035	0,0
70,0	92325	0,5	0,0037	0,0
74,9	99171	0,5	0,0036	0,0
77,7	103321	1,0	0,0038	0,0
94,4	128217	1,0	0,0040	0,0
98,6	134760	1,0	0,0041	0,0
167,1	256180	1,0	0,0045	0,0
171,0	262011	1,0	0,0044	0,0
173,2	265224	1,0	0,0042	0,0
189,5	287843	1,0	0,0041	0,0
190,3	288967	1,0	0,0041	0,0
196,0	297060	2,0	0,0044	0,0
197,6	299280	2,0	0,0043	0,0
214,4	325163	2,0	0,0047	0,0
221,5	336752	2,0	0,0049	0,0
239,1	370360	2,0	0,0057	0,0
245,4	379237	2,0	0,0043	0,0
264,8	411702	2,0	0,0049	0,0
333,1	481235	2,0	0,0030	0,0

Tab. 8.5-23 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.13

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
Kompaktionsdruck: 50 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 96,0 mm
Probendurchmesser: 47,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss cm ³	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,50	0,0000	0,0
2,2	2399	0,50	0,0014	0,0
19,1	18480	0,50	0,0014	0,0
26,3	25159	0,50	0,0013	0,0
43,2	40785	0,50	0,0013	0,0
49,2	46375	0,50	0,0013	0,0
66,8	62733	0,50	0,0013	0,0
68,6	64358	0,75	0,0013	0,0
74,6	69970	0,75	0,0014	0,0
162,5	160672	0,75	0,0014	0,0
168,3	166976	0,75	0,0015	0,0

Tab. 8.5-24 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.12

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
Kompaktionsdruck: 50 MPa
Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
Probenlänge: 93,3 mm
Probendurchmesser: 47,0 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,5	0,0000	0,0
7,0	7395	0,5	0,0014	0,0
23,9	24388	0,5	0,0014	0,0
31,2	31815	0,5	0,0014	0,0
48,0	49438	0,5	0,0014	0,0
54,1	55877	0,5	0,0015	0,0
71,7	74842	0,5	0,0015	0,0
73,4	76733	0,5	0,0015	0,0
79,4	83280	1,0	0,0016	0,0
167,3	189095	1,0	0,0018	0,0
191,9	221684	1,0	0,0021	0,0
240,7	288703	1,0	0,0021	0,0
246,7	297025	2,0	0,0025	0,0
264,4	324413	2,0	0,0028	0,0
268,1	330267	2,0	0,0027	0,0
335,1	429360	2,0	0,0027	0,0

Tab. 8.5-25 Integraler Gasdurchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Probe 9.15

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Kompaktionsdruck: 25 MPa
 Variation der relativen Feuchte: 0, 55, 100 %
 Probenlänge: 97,0 mm
 Probendurchmesser: 46,0 - 47,0 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]	relative Feuchte [%]
0,0	0	0,50	0,0000	0,0
4,0	6320	0,50	0,0027	0,0
5,5	8382	0,50	0,0024	0,0
22,7	30669	0,50	0,0022	0,0
29,2	39069	0,50	0,0022	0,0
48,0	63775	0,50	0,0023	0,0
53,8	71747	0,50	0,0023	0,0
70,7	95650	0,50	0,0024	0,0
75,6	102666	0,50	0,0025	0,0
78,3	106864	1,00	0,0027	0,0
95,1	132179	1,00	0,0028	0,0
99,3	138706	1,00	0,0029	0,0
167,8	264737	1,00	0,0032	0,0
171,4	271537	1,00	0,0032	0,0
173,6	275134	1,00	0,0030	0,0
189,9	303277	1,00	0,0032	0,0
190,7	304702	1,00	0,0032	0,0
196,4	314978	2,00	0,0038	0,0
198,0	317461	2,00	0,0034	0,0
214,8	341962	2,00	0,0031	0,0
221,9	353187	2,00	0,0034	0,0
239,5	386007	2,00	0,0040	0,0
245,8	396304	2,00	0,0035	0,0
265,2	424027	2,00	0,0031	0,0
333,5	547906	2,00	0,0038	0,0

Tab. 8.5-26 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 7.2

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 100,0$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50,0$ mm

Gaspermeabilitätsmessung					
Probenmasse			m = 403,15 g		
q	$p_{lü}$	k_g			
cm ³ /min	MPa	m ²			
1596	0,05	3,8E-13			
3482	0,1	3,5E-13			
5539	0,15	3,1E-13			
7489	0,2	2,8E-13			
11381	0,3	2,3E-13			
Wasserpermeabilitätsmessung					
Probenmasse m = 402,45 g					
0,244	0,1	2,1E-15			
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten					
Probenmasse nach Sättigung m = 446,65 g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effs}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,179	0,032	12,9	0,71	7,2E-17	2E-4
47,4	0,05	17,9	0,6	1,1E-14	0,037
577,4	0,073	32,3	0,27	8,6E-14	0,276
820,6	0,1	35,4	0,2	8,2E-14	0,265
1547	0,15	36,2	0,18	8,8E-14	0,286
2263	0,2	36,5	0,17	8,5E-14	0,274
3678	0,3	38,0	0,14	7,3E-14	0,238

Tab. 8.5-27 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 7.8

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 99,2$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50$ mm

Gaspermeabilitätsmessung Probenmasse $m = 400,71$ g					
q	$p_{lü}$			k_g	
cm ³ /min	MPa			m ²	
3970	0,1			4,2E-13	
8400	0,2			3,3E-13	
12650	0,3			2,7E-13	
17300	0,4			2,3E-13	
22050	0,5			2,0E-13	
Wasserpermeabilitätsbestimmung Probenmasse $m = 400,71$ g					
0,092	0,1			7,7E-16	
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten Probenmasse nach Sättigung $m = 445,06$ g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effs}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,957	0,03	9,9	0,78	3,7E-16	0,001
17,6	0,05	14,2	0,68	4,5E-15	0,016
1440	0,07	38,3	0,14	2,5E-13	0,863
2490	0,1	39,2	0,12	2,6E-13	0,908
4290	0,15	39,6	0,11	2,6E-13	0,912
5760	0,2	40,1	0,1	2,3E-13	0,787
9000	0,3	40,4	0,09	1,9E-13	0,659

Tab. 8.5-28 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 7.9

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{l\ddot{u}}$
 Probenlänge: $l = 96,3$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50$ mm

Gaspermeabilitätsmessung					
Probenmasse m = 392,42 g					
q	$p_{l\ddot{u}}$			k_g	
cm ³ /min	MPa			m ²	
228,5	0,01			3,3E-13	
498,8	0,02			3,2E-13	
1689	0,05			3,9E-13	
4231	0,1			3,9E-13	
10190	0,2			3,6E-13	
Wasserpermeabilitätsbestimmung					
Probenmasse m = 391,52 g					
0,035	0,1			2,9E-16	
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten					
Probenmasse nach Sättigung m = 432,82 g					
q	$p_{l\ddot{u}}$	Δm	S	k_{effs}	k_r
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
20,5	0,05	12,2	0,71	4,7E-15	0,013
2209	0,075	33,7	0,184	3,1E-13	0,857
3324	0,1	33,8	0,182	3,2E-13	0,888
5752	0,15	34	0,77	3,1E-13	0,88
8463	0,2	34,4	0,176	3,0E-13	0,849

Tab. 8.5-29 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 7.10

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 90/10
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 101,7$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50,05$ mm

Gaspermeabilitätsmessung					
Probenmasse m = 413,77 g					
q	$p_{lü}$		k_g		
cm ³ /min	MPa		m ²		
237,1	0,01		3,4E-13		
502	0,02		3,4E-13		
1724	0,05		1,1E-13		
4234	0,1		4,2E-13		
Wasserpermeabilitätsbestimmung					
Probenmasse m = 413,77 g					
0,619	0,1		5,3E-15		
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten					
Probenmasse nach Sättigung m = 463,27 g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effg}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,025	0,03	13,7	0,723	1,1E-17	3E-5
657,1	0,05	36,7	0,259	1,7E-13	0,444
1521	0,075	37,9	0,234	2,4E-13	0,624
2610	0,1	39,8	0,196	2,8E-13	0,74
4706	0,15	40,2	0,188	2,9E-13	0,763

Tab. 8.5-30 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 8.12

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 98,7$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50$ mm

Gaspermeabilitätsmessung					
Probenmasse		m		= 395,63 g	
q	$p_{lü}$	k_g			
cm ³ /min	MPa	m ²			
249,0	0,01	3,5E-13			
639,7	0,025	3,3E-13			
1760	0,05	4,1E-13			
3005	0,075	4,2E-13			
4379	0,1	4,3E-13			
7416	0,15	4,2E-13			
4486	0,1	4,4E-13			
1867	0,05	4,4E-13			
816	0,025	4,2E-13			
Wasserpermeabilitätsbestimmung					
Probenmasse m = 395,63 g					
0,01	0,5	1,7E-17			
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten					
Probenmasse nach Sättigung m = 443,13 g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effg}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,0003	0,05	2,1	0,96	7,3E-20	2E-7
1,12	0,1	2,1	0,96	1,1E-16	3E-4
4,85	0,15	6,5	0,86	2,7E-16	7E-4
7,59	0,2	6,9	0,85	2,7E-16	7E-4
13,5	0,3	7,2	0,84	2,7E-16	7E-4
22,1	0,4	7,8	0,84	2,7E-16	7E-4
11999	0,5	36,2	0,84	1,0E-13	0,25

Tab. 8.5-31 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 8.16

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 99,8$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50$ mm

Gaspermeabilitätsmessung Probenmasse $m = 404,04$ g					
q	$p_{lü}$			k_g	
cm ³ /min	MPa			m ²	
148,1	0,01			4,2E-13	
386,4	0,025			3,3E-13	
831,8	0,05			2,7E-13	
1320	0,075			2,3E-13	
Wasserpermeabilitätsbestimmung Probenmasse $m = 404,04$ g					
0,002	0,8			2,4E-18	
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten Probenmasse nach Sättigung $m = 450,04$ g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effg}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,543	0,2	1,8	0,96	2,0E-17	1E-4
9040	0,5	32,9	0,29	7,7E-14	0,385

Tab. 8.5-32 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 8.17

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{lü}$
 Probenlänge: $l = 101,2$ mm
 Probendurchmesser: $d = 49,8$ mm

Gaspermeabilitätsmessung					
Probenmasse m = 404,86 g					
q	$p_{lü}$	k_g			
cm ³ /min	MPa	m ²			
154,6	0,0095	2,3E-13			
340,2	0,02	2,3E-13			
1116	0,05	2,7E-13			
2891	0,1	2,8E-13			
6976	0,2	2,6E-13			
Wasserpermeabilitätsbestimmung					
Probenmasse m = 404,66 g					
0,007	0,8	7,6E-18			
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten					
Probenmasse nach Sättigung m = 454,26 g					
q	$p_{lü}$	Δm	S	k_{effs}	k_{rg}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
0,305	0,05	3,2	0,94	7,4E-17	0,0003
1,89	0,075	3,6	0,93	2,8E-16	0,0011
3,76	0,1	3,7	0,93	3,8E-16	0,0015
5,74	0,15	3,8	0,92	3,3E-16	0,0013
8,21	0,2	3,9	0,92	3,1E-16	0,0012
12,88	0,3	4,3	0,91	2,6E-16	0,001
26,83	0,5	4,5	0,91	2,3E-16	0,0009
*4507	0,8	21,4	0,57	1,7E-16	0,0674

* Durchfluss wurde nicht konstant; Versuch hier abgebrochen.

Tab. 8.5-33 Gas- und Wasserpermeabilitäten

Probe 8.18

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 75/25
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{l\ddot{u}}$
 Probenlänge: $l = 100,8$ mm
 Probendurchmesser: $d = 49,9$ mm

Gaspermeabilitätsmessung Probenmasse $m = 405,23$ g					
q	$p_{l\ddot{u}}$			k_g	
cm ³ /min	MPa			m ²	
164,2	0,01			2,eE-13	
344,5	0,02			2,3E-13	
948,8	0,05			2,3E-13	
2812	0,1			2,8E-13	
Wasserpermeabilitätsbestimmung Probenmasse $m = 405,23$ g					
0,005	0,8			4,9E-18	
Bestimmung der effektiven Gaspermeabilitäten Probenmasse nach Sättigung $m = 453,03$ g					
q	$p_{l\ddot{u}}$	Δm	S	k_{effg}	k_{rv}
cm ³ /min	MPa	g	-	m ²	-
3,84	0,05	11,9	0,75	9E-16	0,0037
5,77	0,075	12	0,75	8,3E-16	0,0034
8,26	0,1	12,2	0,75	8,2E-16	0,0034
13,2	0,15	12,3	0,743	7,5E-16	0,0031
3231	0,2	33,7	0,3	1,2E-13	0,467

Tab. 8.5-34 Gaspermeabilität

Probe 9.7

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{l\ddot{u}}$
 Probenlänge: $l = 97,6$ mm
 Probendurchmesser: $d = 47,4$ mm

Gaspermeabilitätsmessung Probenmasse $m = 338,81$ g		
q	$p_{l\ddot{u}}$	k_g
cm^3/min	MPa	m^2
534,5	0,01	8,2E-13
1034	0,02	7,5E-13
3649	0,05	9,4E-13
7320	0,1	7,7E-13
10668	0,16	5,9E-13

Tab. 8.5-35 Gaspermeabilität

Probe 9.8

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Hydrostatischer Einspanndruck: $p_m = 0,1$ MPa über dem Injektionsdruck $p_{l\ddot{u}}$
 Probenlänge: $l = 94,3$ mm
 Probendurchmesser: $d = 46,7$ mm

Gaspermeabilitätsmessung Probenmasse $m = 321,43$ g		
q	$p_{l\ddot{u}}$	k_g
cm^3/min	MPa	m^2
912,3	0,01	1,4E-12
1782	0,02	1,3E-12
4336	0,05	1,1E-12
8264	0,1	8,8E-13

Tab. 8.5-36 Gaspermeabilität

Probe SED-B3-04 Untertagelabor Mont Terri

Sand/Ton-Mischungsverhältnis: 50/50
 Probenlänge: $l = 100,0$ mm
 Probendurchmesser: $d = 50,0$ mm
 Probenmasse: $m = 404,04$ g

Variation des Gasinjektionsdruckes $p_{1ü}$ und des hydrostatisches Einspanndruckes p_u			
q	$p_{1ü}$	k_g	p_u
cm ³ /min	MPa	m ²	MPa
4,5	0,2	1,7E-16	0,5
9,74	0,4	1,2E-16	0,7
15,01	0,6	9,2E-16	0,9
Unterschiedlicher hydrostatischer Einspanndruck und konstanter Injektionsdruck			
4,77	0,6	3E-17	1
3,69	0,6	2,3E-17	1,5
2,4	0,6	1,5E-17	2
1,58	0,6	9,7E-18	2,5
Ausgangsbedingungen des Gasinjektionsdruckes und des hydrostatischen Einspanndruckes			
4,25	0,2	1,6E-16	0,5

Tab. 8.5-37 Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Kern 2: Mont Terri Tonkern [SE-B3-03 // 3,90-3,99]

Probenlänge: 90 mm
 Probendurchmesser: 50 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]
0,0	0	0,5	0,21
46,2	11825	0,5	0,21
115,6	28635	0,5	0,21
138,0	34421	0,5	0,21
170,7	42844	0,5	0,21
189,0	47298	0,5	0,21
265,8	65814	0,5	0,21
283,8	70416	1,0	0,22
313,7	75013	1,0	0,26
332,4	77721	1,0	0,27
361,0	81779	1,0	0,27
431,8	92050	1,0	0,27
433,8	92329	3,0	0,28
457,8	93054	3,0	0,33
481,3	93665	3,0	0,33
499,9	94129	3,0	0,35
601,3	96545	3,0	0,35
626,1	97118	3,0	0,35
642,7	97249	5,0	0,40
666,3	97396	5,0	0,40
690,5	97524	5,0	0,40
765,8	97882	5,0	0,43
792,7	97994	5,0	0,43
809,8	98050	5,0	0,43
834,8	98134	5,0	0,44
860,8	98217	5,0	0,45
933,0	98446	5,0	0,48
954,3	98510	5,0	0,48
984,1	98587	5,0	0,48
1101,0	98863	5,0	0,52
1129,6	98923	5,0	0,52
1148,3	98969	5,0	0,52
1177,1	99006	5,0	0,52
1195,1	99032	5,0	0,52
1199,1	99035	5,0	0,24

Fortsetzung 1 Tab. 8.5-37

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]
1297,8	99058	5,0	0,28
1300,0	99058	5,0	0,30
1324,3	99062	5,0	0,30
1330,0	99094	0,5	0,21
1349,6	99240	0,5	0,16
1424,5	99869	0,5	0,15
1444,1	100215	0,5	0,24
1466,5	100584	0,5	0,22
1493,5	101015	0,5	0,21
1515,3	101358	0,5	0,21
1586,9	102584	0,5	0,21

Tab. 8.5-38 Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Kern 3: Mont Terri Tonkern [SE-B3-03 // 4,00-4,10]

Probenlänge: 100 mm
 Probendurchmesser: 50 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]
0,0	0	0,50	0,00
4,0	4210	0,50	0,22
23,3	21293	0,50	0,22
46,3	42030	0,50	0,23
72,6	73218	0,50	0,24
144,6	171087	0,50	0,26
169,2	206455	0,50	0,27
189,6	237082	0,50	0,28
193,0	242170	0,50	0,28
214,0	286537	0,75	0,47
240,3	338752	0,75	0,48
309,5	479810	0,75	0,50
333,6	530780	0,75	0,53
365,4	598577	0,75	0,54
389,0	659380	1,00	0,71
407,2	710676	1,00	0,75
479,1	908169	1,00	0,77
509,6	988148	1,00	0,78
531,7	1046736	1,00	0,77
550,1	1095671	1,00	0,75
551,1	1098176	1,00	0,75
579,1	1196853	1,25	1,02
652,3	1459590	1,25	1,04
676,3	1546570	1,25	1,07
700,3	1635110	1,25	1,10
723,8	1720270	1,25	1,12
745,3	1767050	1,25	0,71
819,3	1934286	1,25	0,72
837,5	1974309	1,25	0,72

Tab. 8.5-39 Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Kern 4: Mont Terri Tonkern [SE-B3-01 // 3,60-3,70]

Probenlänge: 100 mm
Probendurchmesser: 50 mm
Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]
0	0	0,50	0,0000
90	185575	0,50	0,0039
115	227272	0,50	0,0030
141	270750	0,50	0,0030
161	305968	0,50	0,0033
190	358310	0,50	0,0030
256	474358	0,50	0,0032
289	529761	0,50	0,0032
313	571986	0,50	0,0032
329	601225	0,50	0,0033
353	642860	1,00	0,0035
424	779609	1,00	0,0038
432	793424	1,00	0,0037
449	820999	2,00	0,0041
474	860719	2,00	0,0041
498	897658	2,00	0,0042
521	932514	2,00	0,0042
597	1036340	2,00	0,0042
617	1059291	5,00	0,0106
644	1090125	5,00	0,0107
669	1122588	5,00	0,0112
690	1150067	5,00	0,0113
767	1251250	5,00	0,0112

Tab. 8.5-40 Integraler Durchfluss in Abhängigkeit von der Zeit

Kern 5: Mont Terri Tonkern [SE-B3-01 // 3,50-3,59]

Probenlänge: 90 mm
 Probendurchmesser: 50,3 mm
 Verwendetes Gas: Stickstoff

Zeit [h]	Durchfluss [cm ³]	hydrostatischer Einspanndruck [MPa]	mittlerer Gasdruck [MPa]
0	0	0,50	0,0000
90	84617	0,50	0,0045
115	107290	0,50	0,0038
140	131119	0,50	0,0039
160	149820	0,50	0,0042
189	176780	0,50	0,0038
255	238394	0,50	0,0039
288	268800	0,50	0,0041
312	291324	0,50	0,0041
328	306503	0,50	0,0042
352	328780	1,00	0,0060
423	394834	1,00	0,0068
431	402506	1,00	0,0073
448	418588	2,00	0,0171
473	443027	2,00	0,0198
497	465946	2,00	0,0219
520	488465	2,00	0,0238
596	562130	2,00	0,0279
616	581550	5,00	0,0962
643	606544	5,00	0,1044
668	630412	5,00	0,1094
689	650105	5,00	0,1129
766	725380	5,00	0,1172
1006	731656	5,00	0,1350
1026	752980	5,00	0,1344
1100	830180	5,00	0,1345
1266	1004570	5,00	0,1361
1340	1083360	5,00	0,1380
1432	1181514	5,00	0,1387
1463	1215862	5,00	0,1404
1481	1235028	5,00	0,1411

Tab. 8.5-41 Diffusionskonstanten für Wasserstoff, Helium, Methan mit Kohlendioxid in Sand/Ton-Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse und Kompaktionsdrücke

Zustand der Probe	Mischungsverhältnis [Sand/Ton]	Kompaktionsdruck [MPa]	Diffusionskonstante [$10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$]			
			H ₂	H ₁	CH ₄	CO ₂
trocken, luftgefüllter Porenraum	100/0	25	170	245	264	259
		50	94	110	97	94
		100	35	33	39	38
	90/10	25	390	364	415	384
		50	23	25	25	25
		100	15	15	15	15
	75/25	25	126	128	114	111
		50	16	17	15	14
		100	15	15	14	12
	50/50	25	145	137	113	106
		50	18	18	19	19
		100	14	14	14	14
geflutet, wassergesättigter Porenraum	100/0	25	2,1	2,6	2,7	11,4
		50	1,5	1,7	1,9	7,1
		100	1,6	2,0	1,6	3,4
	90/10	25	0,2	0,2	0,3	3,2
		50	<0,1	<0,1	<0,1	0,6
		100	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
	75/25	25	<0,1	<0,1	<0,1	0,8
		50	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
		100	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
	50/50	25	<0,1	<0,1	<0,1	0,8
		50	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
		100	<0,1	<0,1	<0,1	0,5

Tab. 8.5-42 Innere Oberfläche von Bausand, Calcigel und Opalinus-Ton von kompaktierten Proben unterschiedlicher Mischungsverhältnisse

Probe Mischungsverhältnis Sand/Ton	Kompaktionsdruck MPa	Innere Oberfläche S_c [m ²]		
		eingesetzte Masse [g]	Mehrpunkt- Methode	Einpunkt- Methode
Bausand	0	2,47	1,69	1,65
Calcigel	0	1,24	11,48	11,10
75/25	100	20,07	23,19	23,25
		1,29	16,06	15,95
75/25	50	21,38	14,15	14,02
		15,06	19,73	19,75
		1,15	25,32	25,16
75/25	25	12,49	16,37	16,45
		bei zwei weiteren Messungen ergab sich keine Gleichgewichtseinstellung		
50/50	25	14,67	40,48	40,66
		15,52	43,19	42,99
		1,27	34,30	33,78
50/50	25	13,11	40,98	41,22
		15,57	25,50	25,30
		1,16	26,50	26,24
50/50	25	16,49	42,93	43,20
		14,29	25,36	25,37
		1,04	30,65	30,26
Mont Terri SED B3-03 Opalinus-Ton	natürliche Kompaktion	13,00	20,03	19,09
		1,23	24,04	22,96
		14,11	21,18	20,65

**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