



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

**Modellentwicklung
zur Quellung
hochkompaktierter
Bentonite**



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Modellentwicklung zur Quellung hochkompaktierter Bentonite

Bentonite im Kontakt mit
Lösungen unterschiedlicher
Salinität im Temperatur-
bereich von 25 - 120° C

Horst-Jürgen Herbert
Helge C. Moog
Lothar Meyer
Christian Reichelt

November 2006

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter dem Förderkennzeichen 02 E 9561 gefördert.

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

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

GRS - 211
ISBN 3-931995-78-X

Deskriptoren:

Aktiver Abfall, Deutschland, Dichtigkeit, Endlagerung, Hydrodynamik, Langzeitsicherheit, Mineral, Salz, Technische Barriere

**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

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	III
	Abstract.....	VII
1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
3	Ziele	7
4	Arbeitsprogramm	9
5	Modellierung des Quelldrucks	11
6	Experimentelle Methoden und Verfahren	15
6.1	Eingesetzte Bentonite	15
6.1.1	MX-80.....	15
6.1.2	Calcigel	16
6.2	Verwendete Lösungen	17
6.3	Quelldruckmessverfahren	19
6.3.1	Verfahren der Bergakademie Freiberg.....	20
6.3.2	GRS-Verfahren	22
7	Qualitätssicherung bei der Quelldruckmessung	31
7.1	Konstante Versuchsrandbedingungen	31
7.2	Kontrolle der gebundenen Lösungsmenge in den gequollenen Probekörpern	32
7.3	Kontrolle der gleichmässigen Sättigung der gequollenen Probekörper	36
7.4	Kontrolle der Zwischenschichtabstände.....	48
8	Ergebnisse.....	51
8.1	Quelldrücke bei Umgebungstemperaturen.....	51
8.1.1	Quelldruck parallel und senkrecht zur Einregelung.....	51

8.1.2	Quelldrücke bei unterschiedlichen Rohdichten	52
8.1.3	Quelldrücke bei der Rohdichte 1,6 g/cm ³	54
8.2	Quelldrücke bei höheren pH-Werten.....	58
8.3	Quelldrücke bei erhöhten Temperaturen.....	59
8.4	Quelldrücke in Abhängigkeit von Probengröße und Probenform.....	60
8.5	Quelldrücke in Abhängigkeit vom Messverfahren	62
9	Diskussion der Ergebnisse	65
	Literatur.....	69
	Abbildungsverzeichnis.....	73
	Tabellenverzeichnis	77
	Anhang.....	81

Kurzfassung

Über 200 Quelldruckmessungen wurden in der GRS im Rahmen dieses Vorhabens an reinen MX-80- und Calcigel-Bentoniten unterschiedlicher Kompaktion mit salinaren Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung unter Variation des pH-Wertes sowie der Temperatur durchgeführt. Es wurde das Ziel verfolgt, ein Modell zu erstellen, das die Prognose der Quelldrücke in Abhängigkeit von der Lösungszusammensetzung erlaubt.

Ergebnisse:

- Bentonite quellen auch im Kontakt mit Salzlösungen, wobei die Quelldrücke insgesamt gering sind. Bei einer Rohdichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ liegen sie meist unterhalb von 10 bar, mit einer relativen Standardabweichung bis zu 50 %
- Die Quelldrücke sind stark abhängig vom Kompaktionsgrad. Zwischen $1,55$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ ist der Anstieg flach, zwischen $1,7$ und $1,8 \text{ g/cm}^3$ wird er steil. Bei einer Rohdichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ wurden maximal 50 bar erreicht. Mit steigendem Kompaktionsgrad steigt die Streuung der Messwerte.
- Die Unterschiede zwischen Quelldrücken mit unterschiedlich zusammengesetzten Salzlösungen sind geringer als erwartet.
- Die am besten abgesicherten Quelldruckwerte liegen für MX-80 der Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit den Lösungen NaCl und IP21 vor. Obwohl diese beiden Lösungen sich von ihrer Zusammensetzung stark unterscheiden - die eine enthält ausschließlich NaCl, die andere ist komplex zusammengesetzt und enthält viel Mg - unterscheiden sich die Quelldrücke im Rahmen der Messgenauigkeit nicht. Der mit IP21-Lösung gemessene Wert liegt im Mittel bei 11 bar, der mit NaCl gemessene bei 10,1 bar.
- Bei den komplex zusammengesetzten, hexären Salzlösungen mit Na, K, Ca, Mg, Cl, und SO_4 wurden nur geringfügige Unterschiede in den Quelldrücken bei Variation der Lösungszusammensetzung festgestellt. Je höher der Mg-Gehalt der Lösung, desto höher ist der Quelldruck. K-Gehalte verringern den Quelldruck. Wichtig für die Beurteilung des zu erwartenden Quelldrucks ist jedoch nicht der absolute K-Gehalt, sondern das K/Mg-Verhältnis. Hohe K/Mg-Verhältnisse führen zu niedrigeren Quelldrücken und umgekehrt.

- Ein kurzfristiger Kontakt von Bentoniten mit hochalkalischen, gesättigten Salzlösungen beeinflusst die Quelldrücke nicht wesentlich. Da jedoch hohe pH-Werte den Bentonit mineralogisch verändern und die Wasseraufnahmekapazität sinkt, sind mit längeren Reaktionszeiten auch niedrigere Quelldrücke zu erwarten.
- Höhere Temperaturen führen zu höheren Quelldrücken. An MX-80 der Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ wurde mit IP21 bei Raumtemperatur ein Quelldruck von 11 bar, bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 18 bar und bei $75 \text{ }^\circ\text{C}$ knapp 20 bar gemessen. Auch bei höheren Temperaturen sind die Quelldrücke mit NaCl- und IP21-Lösung sehr ähnlich, wobei die mit IP21-Lösung immer etwas höher liegen.
- Probengröße und Probengeometrie scheinen keinen wesentlichen Einfluss auf den Quelldruck zu haben
- Alle gemessenen Quelldrücke sind keine reinen Quelldrücke, sondern eine Kombination aus Quelldruck und Kristallisationsdruck, wobei nicht klar ist, welcher Anteil überwiegt. Durch die Wasseraufnahme werden die Salzlösungen übersättigt und scheiden je nach Zusammensetzung größere Mengen unterschiedlicher Salze aus. Dadurch entsteht ein Kristallisationsdruck.
- Aufgetretene Probleme:
Die Reproduzierbarkeit der Messungen ist unbefriedigend. Die Streubreiten der Messwerte sind zu groß, um das angestrebte semi-empirische Modell für die Berechnung des Quelldrucks aufzustellen. Eine vollständige und homogene Flutung des Porenraums, die allein eine maximale Quellung mit einer vorgegebenen Salzlösung bei gegebener Rohdichte garantiert, wurde in den seltensten Fällen erreicht. Dies erklärt die Schwankungsbreiten der Messwerte. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass mit keiner anderen uns bekannten Messmethode eine bessere Reproduzierbarkeit von Quelldruckmesswerten kompaktierter Bentonitproben gelingt. Der Frage, ob reproduzierbarere Werte erreichbar sind, geht GRS auch nach dem Abschluss dieses Vorhabens weiter nach. Auch wenn dies im Labor gelingen sollte, muss trotzdem unter In-situ-Bedingungen mit erheblichen Schwankungen gerechnet werden, die nicht kleiner sein werden als die in diesem Projekt festgestellten.

Trotz der aufgetretenen Probleme hat die Vielzahl der Messungen eine Reihe praxisrelevanter Ergebnisse erbracht:

- Bentonite sind in Salzformationen als Dichtmaterialien verwendbar, da sie auch im Kontakt mit Salzlösungen quellen und Quelldrücke erzeugen, wenngleich diese gering sind. Eine erfolgreiche Abdichtung von Feldesteilen mit Bentonitdichtungen kann jedoch nicht garantiert werden. Mit einer Abdichtung kann nicht gerechnet werden, wenn der anstehende Lösungsdruck höher ist als der zu erwartende Quelldruck.
- Die Größenordnung der zu erwartenden Quelldrücke ist bekannt und gut abgesichert. Die Unterschiede mit hexären Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung sind vernachlässigbar klein. Ein mathematisches Modell, um die geringfügigen Unterschiede zu prognostizieren, wird für die Praxis nicht gebraucht.
- Der in Deutschland hergestellte und damit wesentlich billigere Calcigel ist besser prognostizierbar als MX-80.

Obwohl nicht alle angestrebten Ziele erreicht wurden, hat das Projekt insgesamt wichtige, in der Praxis verwertbare, Informationen über das kurzfristige Verhalten von Bentoniten in Salzformationen erbracht. Weitere Arbeiten sind notwendig, um belastbare Aussagen auch zum langfristigen Quellverhalten treffen zu können.

Abstract

More than 200 swelling pressure measurements have been performed with MX-80 and Calcigel bentonites. The experiments were performed with samples of different raw density, with various saturated salt solutions and at temperatures of 22 °C and 70 °C. The aim was to establish a model for the prediction of swelling pressures as a function of fluid composition.

Results:

- Bentonites have a certain swelling capacity even in contact with brines. The resulting swelling pressures are in general rather low. They do not exceed 10 bars. The relative standard deviation is up to 50 %.
- Swelling pressures are strongly dependent on the raw density. Between 1.55 and 1.7 g/cm³ the increase is flat and gets steep between 1.7 and 1.8 g/cm³. A maximum pressure of 50 bars was reached at a density of 1.8 g/cm³. With increasing compaction, the scatter of the results increases.
- The differences between swelling pressures with different brine compositions are less than expected.
- The most reliable swelling pressure values were obtained for MX-80 bentonite of 1.6 g/cm³ raw density with NaCl solution and IP21 solution. The swelling pressures with these two solutions are very similar in spite of their large difference in chemical composition. 11 bars were recorded with IP21 and 10 bars with NaCl solution.
- However, small but systematic differences were measured with different brines of the six-component-system Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄. The swelling pressures increased with increasing Mg content of the solutions. K in solutions decreases the swelling pressure. In order to estimate the swelling pressure with a given brine, the K/Mg ratio is more important than the K content of the solution. High K/Mg ratios lead to low swelling pressures and vice versa.
- A short-term contact of bentonites with high pH brines has no significant impact on swelling pressures compared to those with brines of intermediate pH. But as high pH brines induce mineralogical changes in the bentonites giving rise to a decrease in water uptake capacity, reduced swelling pressures after longer reaction times are to be expected.

- Higher temperatures lead to higher swelling pressures. MX-80 of 1.6 g/cm³ raw density with IP21 solution develops 11 bars swelling pressure at room temperature, 18 bars at 70 °C and 20 bars at 75 °C. Also at higher temperatures the swelling pressures with NaCl and IP21 solution are very similar, but always the pressure with IP21 is slightly higher.
- Sample size and geometry do not seem to influence the swelling pressure.
- The measured swelling pressures are not pure swelling pressures but a combination of real swelling pressure and crystallization pressure. It is not clear which part of the total pressure is higher. The crystallization pressure is due to the water uptake of the Bentonite. This leads to an over-saturation of the brine and the crystallization of large amounts of salt minerals in the pore space of the compacted Bentonite.

Problems encountered

The reproducibility of the measurements is not satisfying. The scatter is too high for the intended correlation between swelling pressure and chemical composition of brines. A mathematical model could not be established. Only a complete and homogeneous flooding, i.e. the full saturation of the pore space leads to the maximum swelling of the compacted Bentonite with a given brine composition. The full saturation of the pore space was reached only in a few experiments. This explains part of the scatter of the measured values. It must be pointed out however that no other method guarantees better results. Furthermore the boundary conditions during the construction of large scale dam in-situ are less well defined than in our laboratory experiments. Therefore the uncertainties recorded in this project must be taken into account for practical purposes.

The multitude of measurements performed in this project has rendered results with high practical value:

- Bentonites are swelling even in contact with high saline brines. Compacted bentonites may thus be used as sealing materials in salt formations. The resulting swelling pressures, however, are rather low. A successful sealing with compacted bentonites can not be guaranteed. In 30 % of the laboratory experiments, no self-sealing was reached when the fluid pressure exceeded the swelling pressure

- The order of magnitude of the swelling pressures which can be expected in salt formations is known and reliable.
- The differences of swelling pressures with different brines are very low. For practical purposes a mathematical model for the prediction of these small differences is not needed.
- Calcigel is more predictable than MX-80.

In spite of the fact that not all objectives have been accomplished in this project, useful practical information has been achieved regarding the short-term swelling pressures of bentonites in salt formations. More work is needed for the prediction of the long-term behaviour and the changes in swelling pressure in a salt environment.

1 Einleitung und Problemstellung

Die besonderen Eigenschaften der Tone, die sie als geologische und geotechnische Barrieren qualifizieren, sind ihr hydraulisches Verhalten (geringe Durchlässigkeit gegenüber Fluiden und Gasen), ihr hydromechanisches Verhalten, sowie die große Sorptionsfähigkeit von Schadstoffen. Diese Eigenschaften müssen quantifizierbar und über bestimmte Zeiträume prognostizierbar sein, damit sie in Rechenprogrammen für die Langzeitsicherheitsanalyse berücksichtigt werden können.

Die Funktion eines Dichtelementes von Verschlussbauwerken, Querschnittsabdichtungen oder Bohrlochverschlüssen aus hochkompaktierten Bentoniten beruht auf der Quellfähigkeit der Bentonite bzw. der darin enthaltenen Montmorillonite (Smektite) im Kontakt mit zutretenden Lösungen. Der sich einstellende Quelldruck muss in Abhängigkeit vom Smektitanteil des Bentonits, von der Rohdichte und der Mikrostruktur des kompaktierten Bentonits, sowie von der Zusammensetzung der zutretenden Lösungen und der Temperatur berechenbar sein. Ebenso müssen Einflüsse unterschiedlicher Geometrie und Größe der Probekörper auf die Ergebnisse bekannt sein. All diese Einflüsse gehen in THMC-Modelle ein, deren Ergebnisse in den Langzeitsicherheitsnachweis einfließen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Im Literaturverzeichnis sind ausgewählte Arbeiten zum Thema Quelldrücke von Tonen aufgelistet. Nur wenige dieser Arbeiten befassen sich mit dem Quellen von Bentoniten in salinaren Lösungen /BUC89/, /COL86/, /HER99/, /HER01/, /HER02a/, /HER02b/, /ELS67/, /KAR77/ und /MCN70/, /GRU05/. Davon wiederum untersuchten die meisten Autoren den Einfluss der NaCl-Konzentration der Lösungen auf den Quelldruck. Es gibt außer den GRS-Arbeiten im Rahmen der Forschungsvorhaben 02 E 8986 /HER99/, /HER02a/, 02 C 0659 /HER02b/, und 02 C 0881 /GRU05/ kaum weitere Veröffentlichungen, die sich mit den geochemischen Aspekten der Bentonitquellung in hochsalinaren Lösungen des ozeanischen Systems befassen.

Im FuE-Vorhaben 02 E 8986 /HER99/, /HER02a/ wurden von Herbert und Moog die chemischen Prozesse untersucht, die für das Quellen kompakter Bentonite in hochsalinaren, komplex zusammengesetzten Lösungen verantwortlich sind. Als Ergebnis dieser Untersuchungen sind die Quellmechanismen von Smektiten in Salzlösungen qualitativ und halbquantitativ bekannt. Man weiß, dass Smektite auch in hochsalinaren Lösungen quellen. Folgende Zusammenhänge zwischen dem Chemismus der Lösungen, der Ausweitung der Zwischenschichten, dem Einbau von Wasser in die Zwischenschichten und dem resultierenden Quelldruck wurden nachgewiesen.

Bei gleich bleibendem Kompaktionsgrad und gleichem Feststoff-Lösungsverhältnis ist der Quelldruck im Wesentlichen vom Mg-Gehalt der Salzlösungen abhängig und zu diesem direkt proportional. Großen Einfluss auf das Quellvermögen haben auch die K-Gehalte der Lösungen. Mit steigendem K-Gehalt sinkt im Allgemeinen der Quelldruck ab. Bei gleichem K-Gehalt steigt der Quelldruck mit steigendem Mg-Gehalt in der Lösung. Die Auswertung der Messungen zum Kationenaustausch weist auf einen nicht-ladungsäquivalenten Austausch hin. Dies deutet auf die Sorption von einwertigen Chlorokomplexen hin, was Auswirkungen auf die Quantifizierung des in die Zwischenschichten eingebauten Wassers hat.

Bei den Quelldruckmessungen hat sich zudem herausgestellt, dass sich kompaktierte Bentonite gegenüber Salzlösungen wie semipermeable Membranen verhalten können, die in der Lage sind, große Mengen Salz zurückzuhalten. Dies bedeutet, dass die gemessenen Drucke nicht allein auf Quelldrücke, sondern zum Teil auch auf Salzkristallisationsdrücke zurückzuführen sind. Der Anteil der Kristallisationsdrücke am Gesamt-

druck ist abhängig vom Salzgehalt der Lösungen. Es bedeutet ferner, dass die eindringende Lösung auf ihrem Weg in das Innere des kompaktierten Bentonits salzärmer wird und dadurch zu einer stärkeren Quellung führt (der Gleichgewichtsquelldruck nimmt bei gleicher Zusammensetzung der Lösung mit fallender Ionenstärke zu).

Quelldruckmessungen bei Umgebungstemperaturen werden für die Beurteilung des Verhaltens von Dammbauwerken gebraucht, die in Endlagern und Untertagedeponien in Salzformationen zum Abschluss von Einlagerungsbereichen errichtet werden. Viel höhere Temperaturen treten in HAW-Bohrlöchern oder in Strecken mit direkt eingelagerten Brennelementen auf. Auch für solche Bereiche sind in manchen Endlagerkonzepten kompaktierte Bentonitformsteine vorgesehen, die einen Wasserzutritt zu den Abfällen verhindern sollen. Für einen solchen Einsatz werden Informationen zur Temperaturabhängigkeit der Quelldrücke gebraucht.

Nur wenige Autoren gehen auf den Einfluss der Temperatur auf die Quelldrücke ein /BUC89/ /COL86/, /SCH92/, /YON90/, /ZHA93/. Zudem sind die Angaben zum Teil widersprüchlich. Der gekoppelte Einfluss komplexer hochsalinärer Lösungen und hoher Temperaturen auf das Quellverhalten wurde bisher noch nicht untersucht.

Zhang et al. /ZHA93/ berichten über die Quellung eines Montmorillonits in 10^{-4} molarer NaCl-Lösung. Mit zunehmender Temperatur wurde eine abnehmende Aufweitung der Zwischenschichten bei ansonsten gleicher Lösungszusammensetzung und gleichem Wassergehalt beobachtet. Colten /COL86/ untersuchte die Zwischenschichtaufweitung von Montmorillonit in bis zu 5 molaren NaCl-Lösungen und fand keinerlei Einfluss der Temperatur. Bucher et al. /BUC89/ untersuchten den Quelldruck von Bentonit-Eisen gemischen bei Raumtemperatur, 80 °C und 150 °C mit niedrigsalinären Lösungen oder entmineralisiertem Wasser. Von sechs Versuchen wurden bei fünf bei höheren Temperaturen niedrigere Quelldrücke gemessen. Die drei genannten Arbeiten lassen sich nur schwer miteinander vergleichen, da der untersuchte Bentonit in unterschiedlichen mikrostrukturellen Zuständen vorlag.

Der EUR-Bericht 18950 EN von Pusch et al. /PUS99/ fasst den bisherigen internationalen Kenntnisstand zum Verhalten von Bentoniten wie folgt zusammen: "Modelling of the evolution of the microstructure of buffer clay exposed to temperature gradients and uptake of water with common and very high salt contents is particularly urgent".

Die Literaturrecherche hat also ergeben, dass es keine systematische Untersuchungen gibt, die die Zusammenhänge zwischen Quelldruck von Bentoniten unterschiedlicher Zusammensetzung, ihrem Kompaktionsgrad, der Mikrostruktur des Porenraums, der Einregelung der Tonminerale, der Lösungszusammensetzung, des Flutungsregimes, der Probengröße, der Probenform und der Temperatur beschreiben, quantifizieren und statistisch absichern. Die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge aber ist Voraussetzung für belastbare Vorhersagen über das Quellverhalten von Abdichtungen auf Bentonitbasis in Salzformationen. Sie stellen die Eingangsparameter für gekoppelte hydraulisch-mechanisch-chemischen, (THMC)-Prognosemodelle und deren Absicherung dar.

3 Ziele

Ziel des Vorhabens war es, mittels einer in der GRS entwickelten Messmethode statistisch abgesicherte Quelldruckdaten für kompaktierte Bentonite im Kontakt mit relevanten Salzlösungen unter endlagerrelevanten Randbedingungen im Temperaturbereich 22 °C bis 120 °C zu ermitteln. Anhand der gemessenen Quelldrücke und der Versuchsparameter Lösungszusammensetzung, Rohdichte, Temperatur, Feststoff-Lösungsverhältnis sollte ein Modell aufgestellt werden, mit dem die experimentellen Ergebnisse durch Regression nachvollzogen werden können.

4 **Arbeitsprogramm**

Arbeitspaket 1: Bau der Messzellen und Messstände für Quelldruckmessungen bei Umgebungstemperaturen

Das Arbeitspaket 1 umfasste den Bau und den Funktionstest von Versuchsständen mit den neu entwickelten GRS-Messzellen. Es wurden drei verschiedene Zellentypen gebaut und eingesetzt: eine kleine zylindrische Zelle, eine große zylindrische Zelle und eine quaderförmige Zelle. Das Probenvolumen der kleinen Zelle beträgt $46,02 \text{ cm}^3$, das der großen zylindrischen und der quaderförmigen Zelle jeweils 222 cm^3 . Alle Zellen wurden aus Titan gefertigt, um Korrosionsprobleme zu vermeiden und Wechselwirkungen des Bentonits mit Eisen auszuschließen.

Arbeitspaket 2: Quelldruckmessungen bei Umgebungstemperaturen

Im Arbeitspaket 2 waren zwei Messprogramme bei der im Labor herrschenden Raumtemperatur von ca. 22°C vorgesehen:

Messprogramm A: MX-80 Bentonit mit der Rohdichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit:

NaCl-Lösung

P9-Lösung

IP24-Lösung

IP21-Lösung

IP19-Lösung

Messprogramm B: Wiederholung von Teilen des Messprogramms A mit Proben unterschiedlicher Trockendichte. In diesem Messprogramm wurden Quelldrücke von MX-80 bei den Rohdichten $1,5 \text{ g/cm}^3$, $1,7 \text{ g/cm}^3$ und $1,8 \text{ g/cm}^3$ gemessen.

Der Quelldruck wurde sowohl senkrecht (Bodendruck) als auch parallel (Manteldruck) zur Schichtung, d.h. zur Einregelung der Tonminerale, erfasst.

Arbeitspaket 3: Quelldruckmessungen in Abhängigkeit von der Probengröße

Die Arbeiten hatten zum Ziel, die Abhängigkeit der Quelldrücke von der Probengröße, bei ansonsten gleich bleibenden Randbedingungen zu untersuchen. Dafür wurde die große zylindrische Messzelle eingesetzt. Gemessen wurden MX-80 Proben mit NaCl- und IP21-Lösung und Calcigelproben mit IP21-Lösung, jeweils mit der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$. Erfasst wurde jeweils Boden- und Manteldruck.

Arbeitspaket 4: Quelldruckmessungen in Abhängigkeit von der Probengeometrie

In diesem Arbeitspaket wurde der Einfluss der Geometrie der Probenkörper auf den Quelldruck bei ansonsten identischen Randbedingungen untersucht. Dafür wurden die große zylindrische und die quaderförmige Messzelle mit gleichem Volumen eingesetzt. Gemessen wurden MX-80 Proben mit NaCl- und IP21-Lösung und Calcigelproben mit IP21-Lösung, jeweils mit der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$.

Arbeitspaket 5: Quelldruckmessungen bei erhöhten Temperaturen

In diesem Arbeitspaket sollte eine Methode zur Messung von Quelldrücken bei erhöhten Temperaturen entwickelt und Einzelmessungen bei 70 °C und bei 120 °C durchgeführt werden. Die Messungen wurden mit MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und IP21-Lösung in der kleinen zylindrischen Zelle in einem Heizschrank durchgeführt.

Arbeitspaket 6: Erstellung eines semi-empirischen Modells der Quelldrücke

Mit den ermittelten Quelldruckdaten sollte durch Regression aller Versuchsergebnisse ein semi-empirisches Modell zur Prognose von Quelldrücken kompaktierter Bentonite in Abhängigkeit von der Lösungszusammensetzung, dem Feststoff-/Lösungsverhältnis, der Rohdichte und der Temperatur aufgestellt werden.

5 Modellierung des Quelldrucks

Die Modellierung des Quelldrucks von quellfähigen Tonen ist ein vieldiskutiertes und kontroverses Thema. Prinzipiell lassen sich die zur Anwendung kommenden Modelle in drei Gruppen einteilen /HER01/: a) empirische Modelle, b) Doppelschichtmodelle und c) thermodynamische Modelle.

Thermodynamische Modelle fassen den Ton als durch Druck, Temperatur und Volumen definiertes Kontinuum auf, in dem die chemische Potentialdifferenz des Wassers zwischen dem Ton und einem Referenzzustand den Quelldruck bestimmt. Die Anisotropie des Tons, Hysterese-Erscheinungen und der Umstand, dass die Ionenstärke der wässrigen Lösung Einfluss auf die Oberfläche des Tones nimmt, macht diesen Ansatz für die Praxis schwer anwendbar.

Die Diffuse-Double-Layer-Theorie (DDL-Theorie) von Gouy und Chapman behandelt die Oberfläche von Tonen als plane, negativ geladene Flächen /GOU10/, /CHA13/. Formal müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein /SPO84/:

1. Die Fläche ist gleichförmig und unendlich groß, mit einer konstanten Ladungsdichte.
2. Die Ionen in Lösung werden als Punktladungen betrachtet, die vollständig von der Oberfläche dissoziiert vorliegen. Zwischen den Ionen untereinander und zwischen den Ionen und der Oberfläche bestehen nur Wechselwirkungen vom Coulomb-Typ.
3. Das Wasser liegt als gleichförmiges Kontinuum vor, das durch die Dielektrizitätskonstante charakterisiert ist.

Im Prinzip bestehen zwischen zwei benachbarten Tonmineraloberflächen anziehende Kräfte vom van der Waals-Typ und elektrostatisch abstoßende Kräfte. Sollen zwei dieser Flächen einander näher gebracht werden, muss zunächst die elektrostatische Abstoßung überwunden werden. Qualitativ kann man damit das makroskopisch beobachtbare Phänomen der Quellung des Tons auf physikochemische Eigenschaften seiner Oberfläche zurückführen.

Der Gleichgewichtsabstand zweier benachbarter Flächen bzw. die Lage des „midplane electric potential“ /KAR77/ hängt von der Kationenaustauschkapazität des Tones bzw. der Ladungsdichte, der spezifischen Oberfläche und der Valenz der in der Doppel-

schicht befindlichen Ionen ab. Hinzu kommen die Dielektrizitätskonstante der wässrigen Lösung und die Temperatur. Zufriedenstellende Ergebnisse werden im Einzelfall mit reiner NaCl-Lösung oder reinem Wasser erzielt. Aber selbst unter solch annähernd idealen Bedingungen ist die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment oft nicht gut. Fig. 2.44 in /GRU05/ (Seite 70) suggeriert auf den ersten Blick eine gute Übereinstimmung. Diese optische gute Übereinstimmung beruht aber mehr auf der gewählten doppelt-logarithmischen Auftragung der Quelldruckmessungen als auf ihrer guten Reproduzierbarkeit.

Die DDL-Theorie ist für idealisierte Bedingungen aufgestellt. Ihre Anwendung auf realistische, endlagerrelevante Bedingungen stellt ein grundsätzliches Problem dar. So können die Wechselwirkungen zwischen Ionen innerhalb der Doppelschicht nicht allgemein als unspezifisch und vom Coulomb-Typ beschrieben werden. Die Behandlung des Wassers zwischen zwei elektrisch geladenen Flächen (im Prinzip handelt es sich dabei ja dann um Zwischenschichtwasser) als „bulk-Wasser“ ist ebenfalls problematisch. Wassermoleküle, die sich in der Nähe von Phyllosilikatoberflächen befinden, bewegen sich eben nicht regellos, sondern richten sich entsprechend ihrem Dipolcharakter aus, ein Umstand, auf den schon vor 1984 hingewiesen wurde /SPO84/. Die Konsequenz ist, dass die abschirmende Wirkung der Wassermoleküle, und damit die Dielektrizitätskonstante des wässrigen Mediums, in der Nähe solcher Oberflächen eben nicht jener von reinem freien Wasser gleicht.

Die Eigenschaften von Oberflächenwasser an Smektiten wurden durch Röntgen- und Neutronenbeugung /PEZ67/, /HAW80/, infrarotspektroskopisch /PRO75/ und weitere Methoden /CEB81/ untersucht. Die Werte für die Dielektrizitätskonstante adsorbierten Wassers schwanken zwischen 2 und 50 (reines Wasser: 80!). Und diese Betrachtungsweise berücksichtigt immer noch nicht den Einfluss von gesättigten hexären Salzlösungen¹.

Aus den genannten Gründen betrachten wir die DDL-Theorie als nicht aussichtsreich für die Berechnung von Quelldrücken in realen Systemen, etwa Bentonit-Sandgemischen in IP21-Lösung.

¹ Übrigens unterscheiden sich auch der pH-Wert und die Eigendissoziation von Oberflächenwasser von jenen des freien Wassers!

Empirische Modelle allgemein haben den Charme, dass sie sich nicht mit den mikro-physikalischen Ursachen für ein beobachtetes Phänomen aufhalten, sondern den zu entwickelnden Formalismus direkt auf die Messdaten abstellen. Diese Vorgehensweise ist durchaus angebracht, wenn die Komplexität des betrachteten Systems hoch, physikalische Zusammenhänge quantitativ wenig bekannt, und die für ein mechanistisches Modell zu erhebenden Daten nicht beschaffbar sind. Der von GRS zur Diskussion gestellte Vorschlag sieht vor, den beobachteten Quelldruck in die folgende Beziehung zu stellen.

$$\ln P_s = A \frac{m_{\text{Na}}}{m_{\text{K}}} + B \frac{m_{\text{Na}}}{m_{\text{EA}}} + C \frac{m_{\text{K}}}{m_{\text{EA}}} + D \rho_{\text{red}} + Ew$$

Mit m_i = Molalität von Spezies i in Lösung (EA = Erdalkali; $m_{\text{EA}} = m_{\text{Mg}} + m_{\text{Ca}}$), ρ_{red} = Trockendichte, w = gesamter Wassergehalt und A bis E einstellbare Parameter. Mit dieser Gleichung wird die von Ingenieuren angewandte Regressionsformel übernommen und um Parameter erweitert, die vermutlich einen Einfluss auf den Quelldruck haben.

Gleichwohl müssen wir den Nachweis über die Anwendbarkeit dieser empirischen Gleichung schuldig bleiben, da die erhaltenen Messergebnisse zu sehr streuen, als dass eine Entwicklung der Modellparameter A.E vertretbar gewesen wäre.

6 Experimentelle Methoden und Verfahren

6.1 Eingesetzte Bentonite

Im experimentellen Programm zur Messung der Quelldrücke mit unterschiedlichen Salzlösungen wurden überwiegend der Bentonit MX-80 und für Einzelmessungen der Bentonit Calcigel eingesetzt. Es wurden die gleichen Bentonite verwendet, die in den früheren GRS-Projekten zur Untersuchung der Quelleigenschaften und des Langzeitverhaltens von Bentoniten (Forschungsvorhaben 02 E 8986 und 02 C 0659) zum Einsatz kamen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Bentonite findet sich in /HER02a/ und /HER02b/. Aus diesen Berichten ist folgende zusammenfassende Charakterisierung übernommen.

6.1.1 MX-80

MX-80 ist ein natürlicher Na-Bentonit aus Wyoming (USA), der von der Bentonit International GmbH (Duisburg) vertrieben wird. MX-80 wird als Granulat geliefert, das durch Trocknen und anschließendes Zerkleinern und Sieben des grubenfrischen Bentonits gewonnen wird.

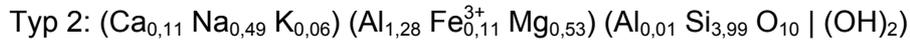
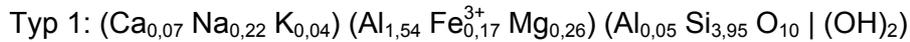
Mineralogisch besteht der eingesetzte MX-80 aus Montmorillonit, Quarz, Feldspat, Muskovit, Pyrit, Calcit, Cristobalit und vereinzelt Chlorit. Die Korngrößenverteilung und die Mineralzusammensetzung des Gesamt-Bentonits sowie der einzelnen Korngrößenfraktionen sind in Tab. 1 angegeben. Diese Zusammensetzung unterscheidet sich von früheren Angaben aus der Literatur /MAD83/, /MÜL93/.

Die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen an Texturpräparaten dokumentieren einen Na-Montmorillonit bei 12,2 – 12,7 Å, der vorwiegend in der ersten Hydratstufe vorliegt.

Im Transmissionselektronenmikroskop zeigt der MX-80-Montmorillonit hinsichtlich seiner morphologischen Ausprägung, seiner Elementzusammensetzung und Kristallinität zwei Erscheinungsformen:

Typ 1: 10,5 – 2 µm große xenomorphe flocken- bis blättchenartige Aggregate mit deutlichen Quellungsmerkmalen und

Typ 2: Sehr dünne xenomorphe blättchen- bis leistenartige Partikel in Form einer sehr feinen filmartigen Matrix. Den beiden morphologischen Grundtypen des MX-80-Montmorillonits liegen geringfügige unterschiedliche Zusammensetzungen zugrunde:



6.1.2 Calcigel

Calcigel (früher Montigel) wird als natürlicher Ca-Bentonit aus Bayern von der Süd-Chemie AG (Moosburg) vermarktet.

Die Korngrößenverteilung ist in Tab. 2 angegeben. Der Vergleich mit Literaturdaten macht die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Chargen auch bei Calcigel deutlich.

Mineralogisch besteht Calcigel zu 80 – 90 % aus Montmorillonit. Weitere Mineralphasen sind: Unregelmäßige Montmorillonit-Muskovit-Wechselagerungen mit einem Montmorillonitschichtanteil von 75 – 90 %, unregelmäßige Montmorillonit-Muskovit-Wechselagerung mit einem Montmorillonitschichtanteil von 30 – 10 %, Quarz, Feldspat, Muskovit/Illit, Calcit, Dolomit, Chlorit, Kaolinit und möglicherweise dioktaedrischer Vermiculit. Akzessorisch können auftreten: Apatit, Cassiterit, Chromit, Pb- und V-haltige Phasen.

Der Montmorillonit zeigt im Transmissionselektronenmikroskop zwar in seiner morphologischen Ausprägung ein differenzierbares Bild, ist jedoch in seiner Elementzusammensetzung und Kristallinität nahezu homogen.

Morphologisch sind zwei verschiedene Typen zu unterscheiden: 0,5 - 1 µm große xenomorphe flocken- bis blättchenartige Aggregate mit deutlichen Quellungsmerkmalen und sehr dünne xenomorphe blättchen- bis lattenartige Partikel in Form einer sehr feinen Matrix.

- Xenomorphe flocken- bis blättchenartige Aggregate mit deutlichen Quellungsmerkmalen:

- Dieser morphologische Typ weist in der Mehrzahl der untersuchten Partikel einen Si-Überschuss ($\text{Si} > 4$ in der Tetraederschicht) und eine Zwischenschichtladung von 0,2 - 0,4 auf. Die Alkali-Elemente Na und K dominieren gegenüber Ca in der Zwischenschicht. Die einzelnen Partikel sind schwach kristallin und weisen eine turbostratische Anordnung der Schichten auf. Nahezu amorpher Montmorillonit, wie er im Bentonit MX-80 zu finden ist, wurde im Calcigel nicht gefunden.
- Dünne xenomorphe Blättchen- bis lattenartige Partikel in Form einer sehr feinen Matrix: Die analysierten Matrixpartikel haben die gleiche Elementzusammensetzung wie die größeren Flocken. Lediglich die Matrix-Montmorillonite mit Si-Überschuss weisen einen höheren Anteil an Alkali-Elementen in der Zwischenschicht auf als die flockenförmigen Aggregate. Die Matrix-Montmorillonite sind ebenfalls vorwiegend schwach kristallin und haben eine turbostratische Stapelanordnung.

6.2 Verwendete Lösungen

In Tab. 4 sind Zusammensetzung, Dichte, pH-Wert und Wasseraktivität der im Versuchsprogramm eingesetzten Salzlösungen zusammengestellt. Hier folgen eine Kurzbeschreibung dieser Lösungen und eine Begründung für ihre Auswahl im Versuchsprogramm:

NaCl: Künstliche, ausschließlich NaCl enthaltende und an kristallinem NaCl (= Halit) gesättigte Lösung. Tritt natürlich nicht auf. Natürliche Lösungen, die bei Wasserzutritt in reinen Salzformationen entstehen, sind immer auch an Anhydrit und meistens auch an Polyhalit gesättigt. Die reine NaCl-Lösung wurde im experimentellen Programm eingesetzt, um für die Modellerstellung der Quelldrücke in Abhängigkeit vom Lösungsschemismus die ganze Bandbreite möglicher Lösungszusammensetzungen durch möglichst viele Stützpunkte zu belegen.

IP9: Eine bei 25 °C gesättigte, invariante hexäre Salzlösung, die an Halit, Glaubertit, Syngenit, Polyhalit und Anhydrit gesättigt ist. Eine solche Lösung entsteht natürlicherweise bei der Auflösung von Steinsalz mit Halit, Anhydrit und Polyhalit. Eine IP9-Lösung ist bei Wasserzutritt in reinen Steinsalzformationen ohne Kalisalze zu erwarten.

IP21: Eine bei 25 °C gesättigte, invariante hexäre Salzlösung, die an Halit, Kainit, Carnallit, Sylvin und Polyhalit gesättigt ist. Sie entsteht natürlicherweise bei Wasserzutritt in sylvin- und kieserithaltige Kalilager. Solche Salzformationen sind im deutschen Zechstein sehr verbreitet und in allen Kali- und Salzbergwerken aufgeschlossen. Bei Wasserzutritt in Salzformationen ist dies die Lösungszusammensetzung, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist.

IP19: Eine bei 25 °C gesättigte, invariante hexäre Salzlösung, die an Halit, Kieserit, Carnallit, Kainit und Polyhalit gesättigt ist. Sie entsteht natürlicherweise bei Wasserzutritt in carnallitische Kalilager. Solche Kalisalze sind im deutschen Zechstein sehr verbreitet und in allen Kali- und Salzbergwerken aufgeschlossen. Bei Wasserzutritt in Salzformationen ist diese Lösungszusammensetzung nur dann zu erwarten, wenn als Kalisalz ausschließlich Carnallit und kein sylvinitisch-kieseritisches Kalisalz aufgeschlossen ist (z.B. in der Asse). Sind beide Kalisalztypen gleichzeitig aufgeschlossen, bildet sich keine IP19- sondern eine IP21-Lösung. Das natürliche Auftreten von IP21-Lösung ist wesentlich wahrscheinlicher als das von IP19-Lösung.

IP24: Eine bei 25 °C gesättigte, invariante hexäre Salzlösung, die an Halit, Schönit, Glaserit, Syngenit und Polyhalit gesättigt ist. Eine solche Lösung bildet sich beim Auflösen der genannten Salze. Da aber solche Salzparagenesen kaum natürlich auftreten, ist mit dem natürlichen Auftreten einer IP24-Lösung auch nicht zu rechnen. In den Versuchen wurde sie eingesetzt um die erforderliche Bandbreite der Na-, K- und Mg-Variation von natürlichen Salzlösungen durch möglichst viele Punkte abzudecken.

Zementwasser: Eine junge Zementporenlösung, die nach wenigen Tagen der Aushärtung eines Portlandzementes als Porenlösung im Zementstein durch die Auflösung von Portlandit im Anmachwasser entsteht.

Porenlösung NaCl: Die Reaktionslösung des Salzbetons M2-4 mit einer nur an NaCl gesättigten Lösung auf dem halben Wege des Reaktionspfades bis zum thermodynamischen Gleichgewicht /MEY03/.

Porenlösung IP21: Die Reaktionslösung des Salzbetons M2-4 mit IP21-Lösung auf dem halben Wege des Reaktionspfades bis zum thermodynamischen Gleichgewicht /MEY03/.

NaCl-MG7: Die Reaktionslösung des Magnesiabinders MG-7 mit einer nur an NaCl gesättigten Lösung auf dem halben Wege des Reaktionspfades bis zum thermodynamischen Gleichgewicht /MEY03/.

Quelldruckmessungen von Bentoniten mit Zementwasser, Porenlösung NaCl, Porenlösung IP21 und NaCl-MG7 waren in diesem Vorhaben nicht vorgesehen. Sie wurden im Rahmen des Vorhabens ECOCLAY II durchgeführt, in welchem der Einfluss von Ton/Zement-Wechselwirkungen bzw. der Einfluss hoher pH-Werte auf die Eigenschaften der Tone untersucht wurden. Die Ergebnisse der Quelldruckmessungen mit diesen Lösungen werden hier mit aufgeführt, um einen Überblick über alle bisher in der GRS durchgeführten Quelldruckmessungen mit Salzlösungen unterschiedlichster Zusammensetzung zu geben.

6.3 Quelldruckmessverfahren

In der GRS liegen Erfahrungen mit drei unterschiedlichen Verfahren zur Quelldruckmessung vor, dem TUBAF (Technische Universität Bergakademie Freiberg)-, dem UPC (Universidad Politécnica de Cataluña)- und dem GRS-Verfahren. Die drei Verfahren unterscheiden sich grundsätzlich vom Aufbau und der Funktionsweise her. Ziel aller dieser Verfahren ist die Generierung von Quelldruckwerten bei vollständiger Sättigung des Porenraums der kompaktierten Bentonite, bei vollständiger Quellung und für einen Lösungsdruck Null. Dieses Ziel wird in jedem Verfahren auf einem anderen Weg verfolgt. Im Freiburger und im GRS-Verfahren wird die Aufsättigung des Porenraums mit Lösung unter Druck erreicht, im Spanischen Verfahren geschieht dies drucklos. Alle drei Verfahren haben Vor- und Nachteile. Alle drei sind jedoch grundsätzlich geeignet und sollten prinzipiell zu gleichen Ergebnissen führen. Es hängt von der Fragestellung ab, und m. E. ist die spanische Methode eher ungeeignet. Systematische Messreihen mit hochsalinaren Lösungen wurden bisher jedoch nur mit dem GRS-Verfahren durchgeführt. Nur dieses Verfahren ist schnell genug und gestattet die Messung großer Probenzahlen mit hochsalinaren Lösungen. Entsprechend liegen auch nur für dieses Verfahren zahlreiche Wiederholungsmessungen pro Parametersatz vor, was die Angabe von Schwankungsbreiten und Standardabweichungen der Messwerte erst ermöglicht. Vergleichende Testmessungen mit identischen Bentonitproben und reinem Wasser mit dem GRS- und dem UPC-Verfahren haben gezeigt, dass die Streubreite der Ergebnisse gleich groß ist. Ohne Umbau sind mit der spanischen Zelle Messungen mit Salzlösungen wegen der schnellen Korrosion des verwendeten Stahls nur bedingt möglich

und liegen darum bisher auch nicht vor. Im Folgenden werden die drei Verfahren näher beschrieben.

6.3.1 Verfahren der Bergakademie Freiberg

Mit den Arbeiten von Herbert und Moog /HER02a/ wurden erstmalig die Zusammenhänge zwischen den geochemischen Vorgängen bei der Quellung von Bentoniten im Kontakt zu endlagerrelevanten Salzlösungen untersucht und die resultierenden Quelldrücke hochkompakter Bentonite unter kontrollierten Randbedingungen gemessen. Die Quelldruckmessungen wurden im Institut für Bergbau der TUBAF mit Apparaturen durchgeführt, die in Abb. 6.1 und Abb. 6.2 dargestellt sind. Es handelt sich um sehr massive und teure Konstruktionen, die jeweils nur eine Messung gleichzeitig zulassen.

Das in /HER02a/ ausführlich beschriebene, von der TUBAF angewandte Verfahren zur Messung von Quelldrücken besteht darin, die eingebaute, kompaktierte Bentonitprobe mit Salzlösung zu perkolieren und dabei den Lösungsdruck in Stufen zu erhöhen. Auf jeder Stufe wird die Gleichgewichtseinstellung zwischen Lösung und Bentonit abgewartet und durch wiederholte Messung der Perkolatzusammensetzung kontrolliert. Damit werden maximale Quelldrücke bei unterschiedlichen Feststoff-Lösungsverhältnissen und unterschiedlichen Lösungsdrücken ermittelt. Durch Extrapolation der so erhaltenen Werte auf einen Lösungsdruck Null wird der eigentliche Quelldruckwert erhalten. Ein solcher Wert ist belastbar, soweit er durch Mehrfachmessungen abgesichert ist. Diese Vorgehensweise ist allerdings mit sehr langen Versuchszeiten, mehrere Wochen bis Monate und für manche Lösungen bis zu einem Jahr verbunden. Die langen Versuchszeiten erlaubten Wiederholungsmessungen zur Absicherung der Quelldruckergebnisse nur in Einzelfällen. Für die im vorliegenden Vorhaben angestrebte Entwicklung eines Quelldruck-Modells sind besser abgesicherte Ergebnisse über einen weiten Konzentrationsbereich der Lösungen notwendig. Im vorliegenden Vorhaben sollten mit einer neuen, in der GRS entwickelten, schnelleren Messmethode durch eine Vielzahl von Messungen statistisch abgesicherte Ergebnisse gewonnen werden.

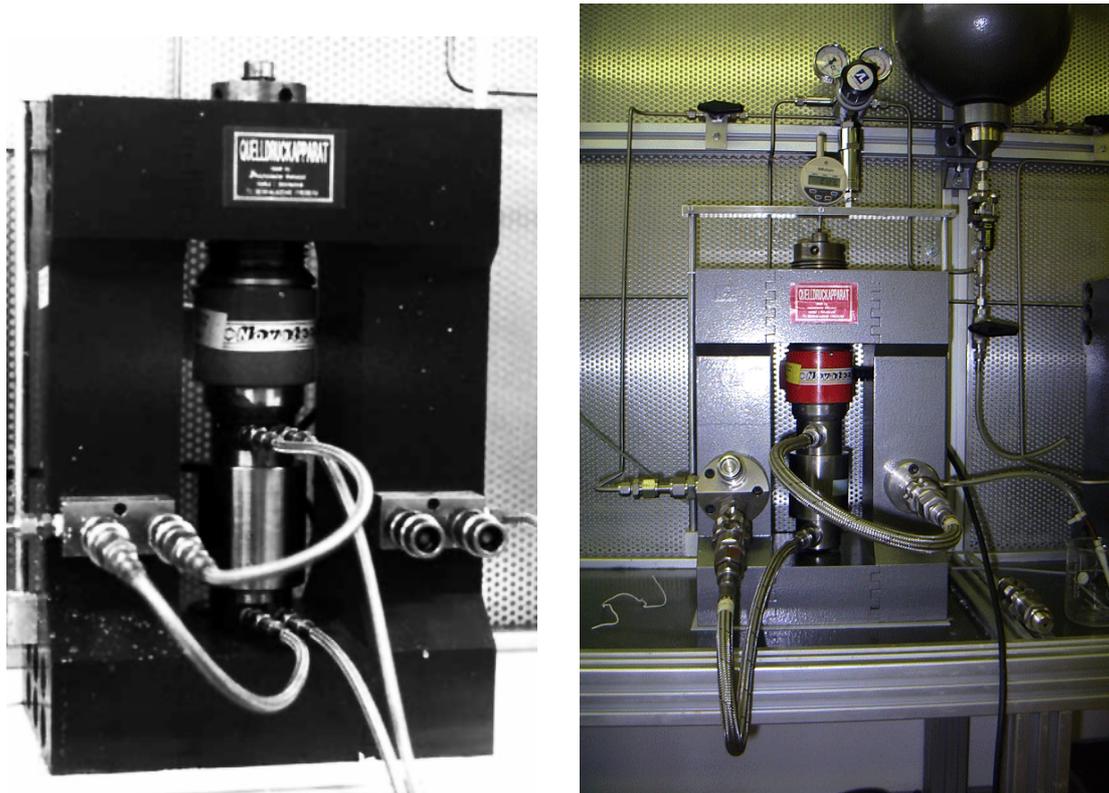


Abb. 6.1 Quelldruckapparaturen des Institutes für Bergbau der TUBAF. Links die erste Ausführung von 1993, rechts die weiterentwickelte Ausführung von 1995

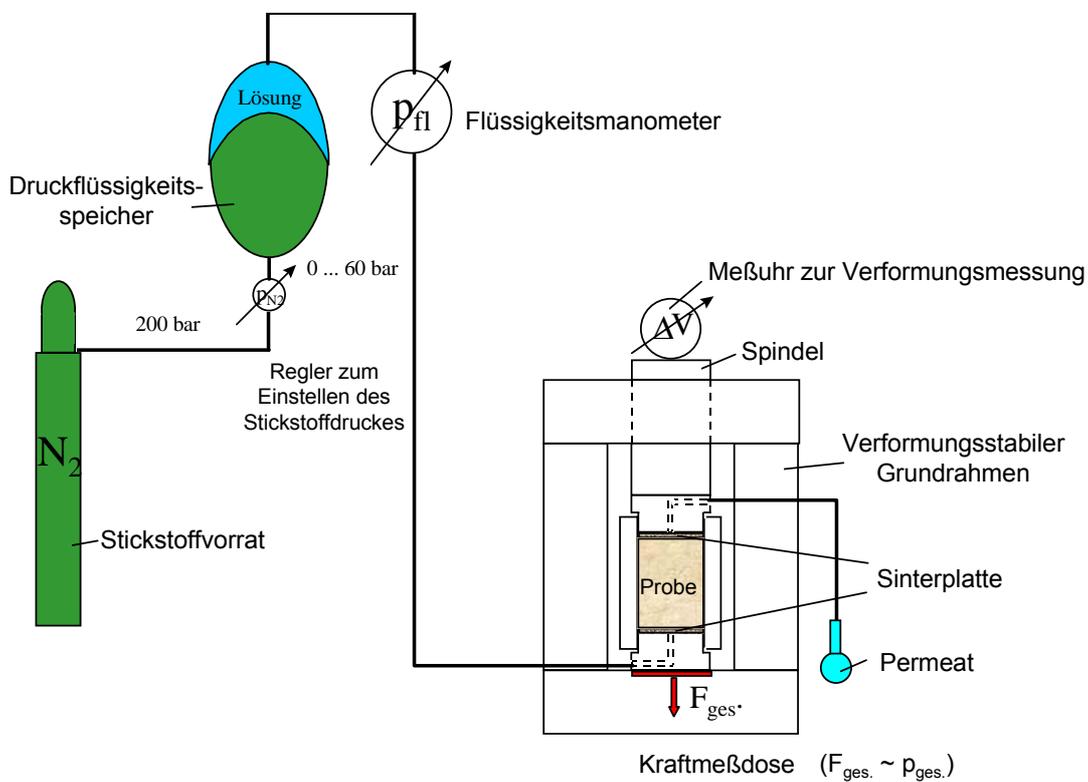


Abb. 6.2 Prinzipskizze der Quelldruckapparatur der TU BAF

6.3.2 GRS-Verfahren

Das GRS-Verfahren unterscheidet sich grundsätzlich vom Freiburger Verfahren. Die Presse mit dem verformungsstabilen Grundrahmen für die Quelldruckmessung selbst wird nicht mehr gebraucht. Die Messzelle selbst ist verformungsstabil und in der Lage, die Volumenkonstanz während der Messung zu gewährleisten. Eine hydraulische Presse wird nur für die Herstellung der Probekörper mit der gewünschten Rohdichte gebraucht. Die Verdichtung der Probe geschieht in der Messzelle selbst. Abb. 6.3 und Abb. 6.4 zeigen zwei unterschiedliche Typen von Messzellen. Für die Quelldruckmessung wird die Messzelle in einen Messstand eingebaut. Dieser besteht aus einer oder mehreren Messzellen, einer HPLC-Pumpe, zwei Waagen pro Messzelle und einer Datenerfassungsanlage (Abb. 6.5, Abb. 6.6). Theoretisch können in einen Messstand vier Messzellen eingebaut und damit bis zu vier Proben gleichzeitig untersucht werden. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass der Arbeitsaufwand für die notwendige, permanente Betreuung der Versuche nur zwei Parallelversuche gleichzeitig zulässt.

Die GRS-Messzelle erlaubt auch eine richtungsabhängige Messung von Quelldrücken, parallel und senkrecht zur Einregelung der Tonpartikel in den kompaktierten Bentoniten. Die Notwendigkeit, Quelldrücke richtungsabhängig zu messen, ergibt sich aus der Anisotropie kompaktierter Bentonite. Diese ist eine Folge des schichtförmigen Aufbaus der quellfähigen Smektite und deren vorzugsweiser Ausrichtung senkrecht zur Richtung des Kompaktionsdruckes.

Quelldruck und Kristallisationsdruckmeßzelle

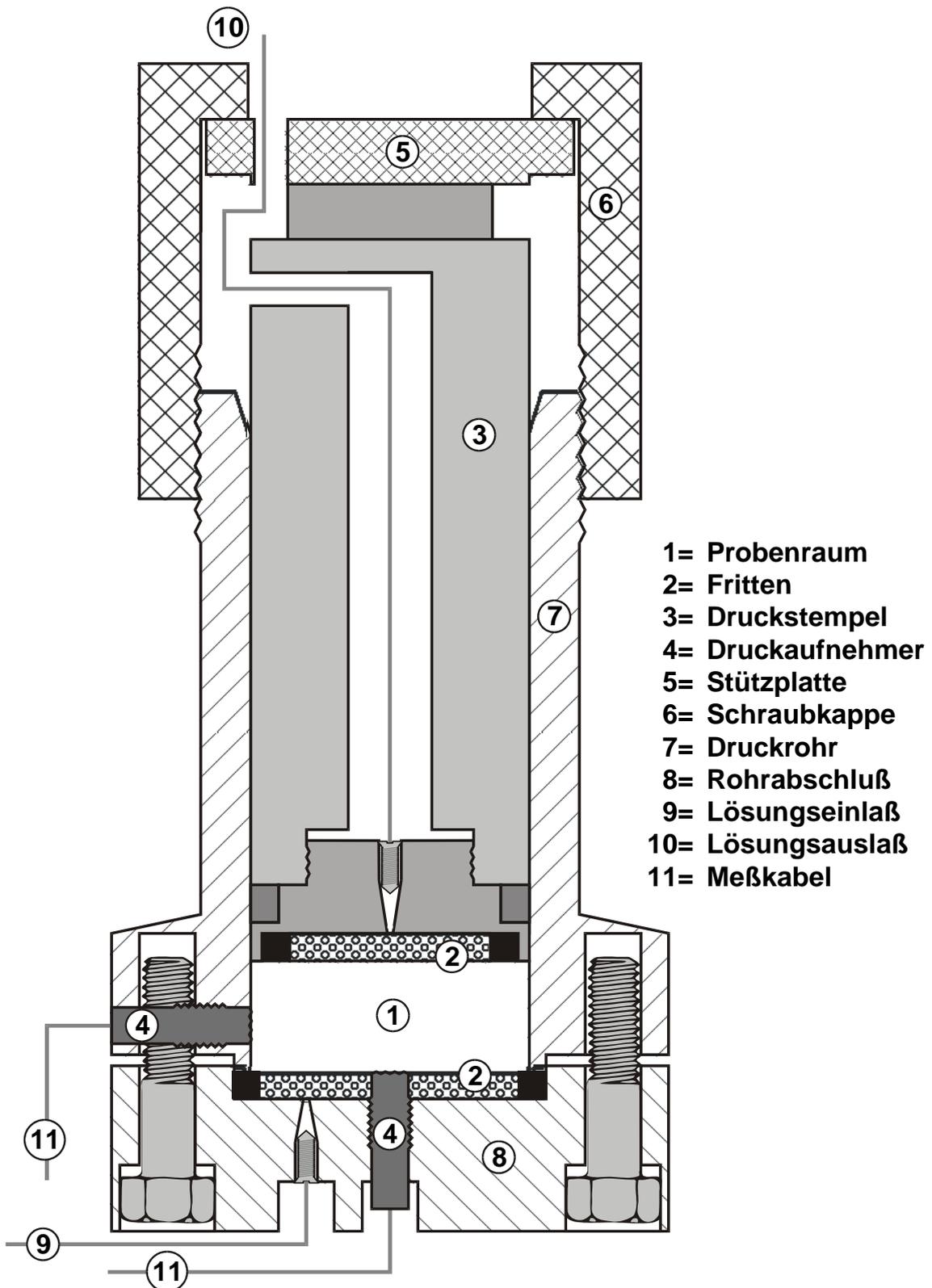


Abb. 6.3 Aufbau der zylindrischen GRS-Quelldruckmesszelle

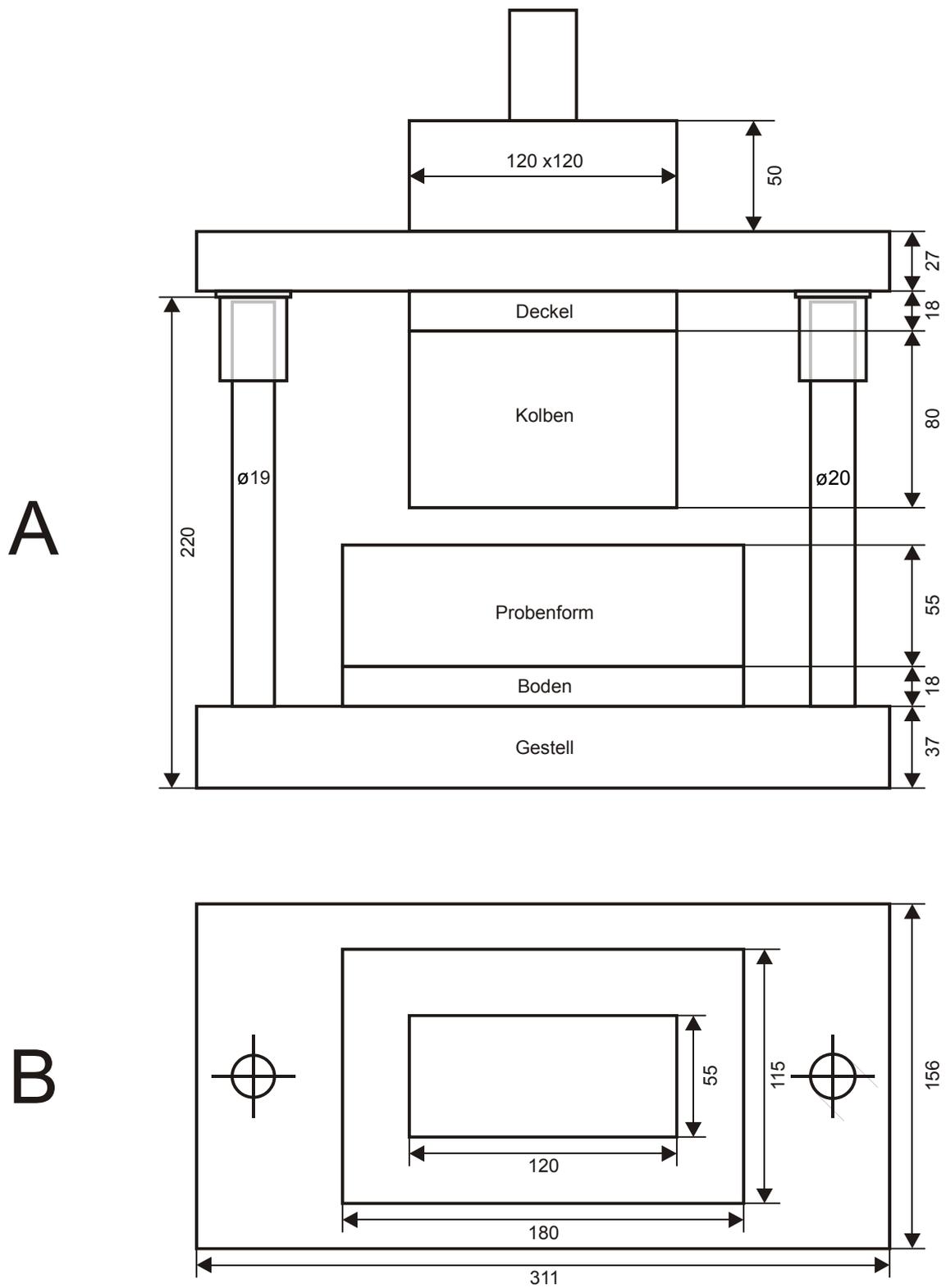


Abb. 6.4 Prinzipskizze der quaderförmigen GRS-Quelldruckmesszelle

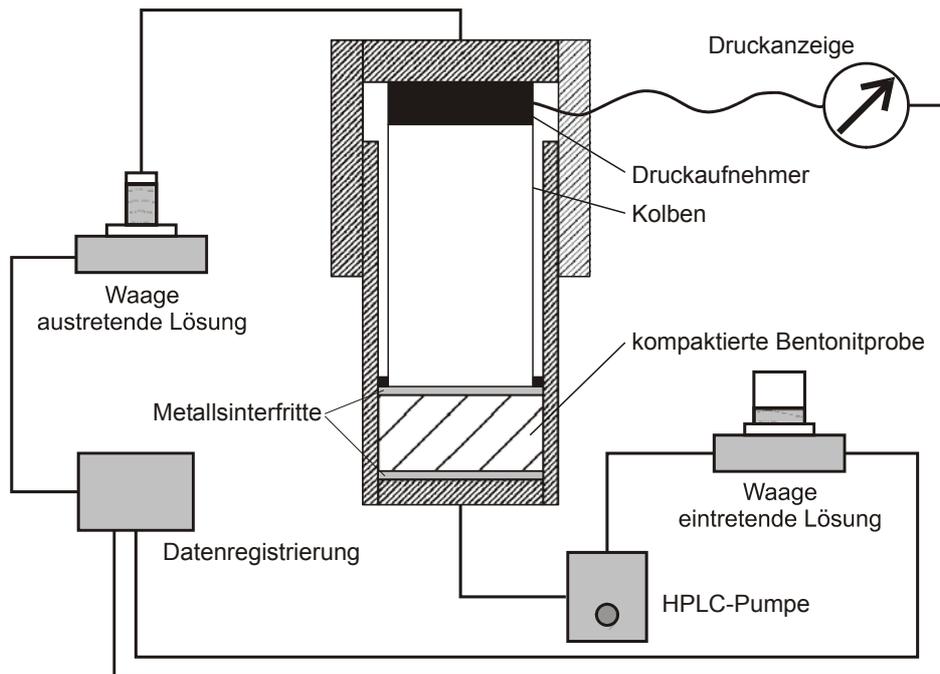


Abb. 6.5 Prinzipskizze eines GRS-Quelldruckmesstandes mit einer einzelnen Messzelle

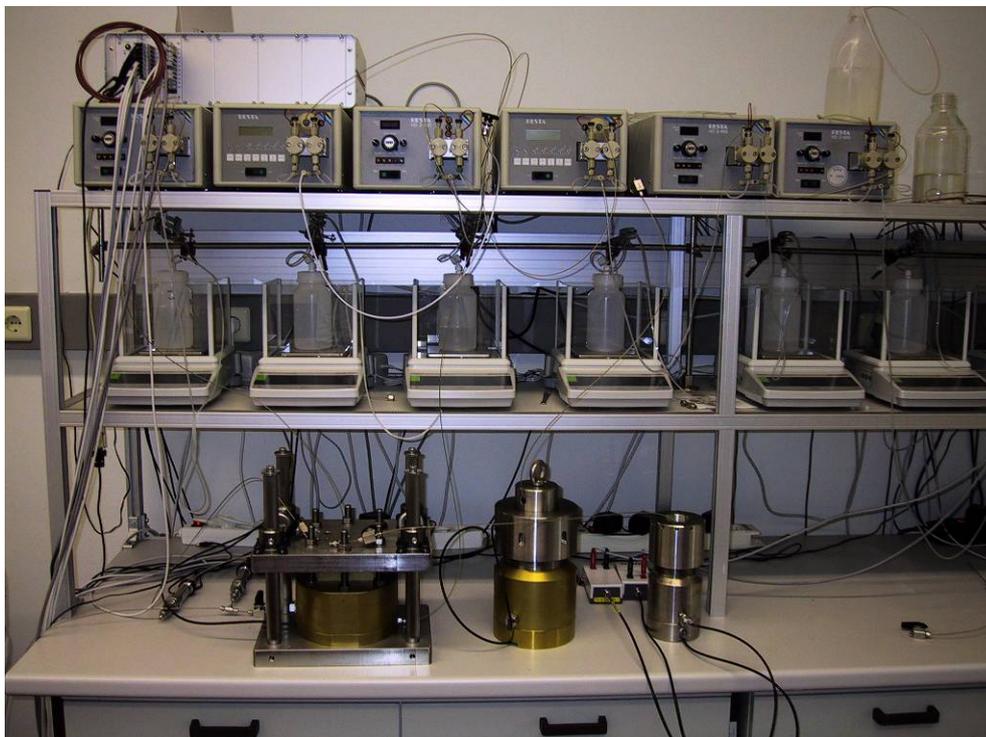


Abb. 6.6 GRS-Quelldruckmesstand mit drei Typen von GRS-Messzellen (unten links: quaderförmige Zelle, unten Mitte: große zylindrische Zelle, unten rechts: kleine zylindrische Zelle), Waagen (Mitte) und HPLC-Pumpen (oben)



Abb. 6.7 Kleine zylindrische Zelle aus Titan in einem Wärmeschrank zur Messung von Quelldrücken bei erhöhten Temperaturen

Herstellung der Probekörper

Es wurden Bentonitprobekörper mit den Rohdichten $1,55 \text{ g/cm}^3$, $1,60 \text{ g/cm}^3$, $1,70 \text{ g/cm}^3$ und $1,80 \text{ g/cm}^3$ hergestellt. Hauptsächlich wurde dafür die kleine zylindrische Messzelle mit einem Probenvolumen von $46,02 \text{ cm}^3$ verwendet (Abb. 6.6 unten rechts). Dafür wurde der Bentonit in der Messzelle mit einem Stempel unter einer Presse verdichtet. Als Presse wurde eine Druckprüfmaschine der Firma Walter + Bai AG Schweiz, Typ D100-DIG, Nr. 562 eingesetzt. Die Maschine verfügt zur Druckanzeige über einen geeichten Druckaufnehmer, Typ P8AP 200 bar, Nr. 51/98 und zur Längenbestimmung über einen ebenfalls geeichten Wegaufnehmer, Typ Novotechnik TS 100, Nr. 045139/A. Die Ansteuerung erfolgt entweder druck- oder weggesteuert. Zur Einstellung einer definierten Festkörperdichte wird nur die Wegsteuerung benötigt. Die Maximalkraft dieser Presse liegt bei 100 kN. Sie reicht gerade noch aus, um Prüfkörper der Rohdichte $1,8 \text{ g/cm}^3$ herzustellen.

Zur Abgleichung des Nullpunktes wurden alle Komponenten der Quelldruckmesszelle (Bodenteil, Stempel und Stempelfixierstück) aufgetürmt, die Maschine kraftschlüssig

gefahren und die so angezeigte Gesamtlänge der Komponenten als Nullpunkt definiert. Danach wurde die Form zusammengebaut und mit Bentonit befüllt.

Für Prüfkörper in der kleinen zylindrischen Messzelle wurden 75 g Ton abgewogen und in die Zelle gegeben. Die Schütthöhe betrug 35 – 36 mm. Zur Abdichtung des Stempels gegen den maximalen Fluiddruck von 100 bar ist dieser am unteren Ende mit einer O-Ring-Dichtung versehen. Der Durchmesser des Dichtrings ist um 0,1 mm größer als der des Stempels. Um die Reibungskräfte zu minimieren, wird die Dichtfläche mit Vaseline eingefettet. Mit Maschinenkraft wird der Stempel in die Zelle gedrückt, bis die Füllhöhe des locker eingefüllten Bentonits erreicht ist. Hierzu sind 1 - 2 kN erforderlich. Mit einer konstanten Kraftzunahme von 0,01 kN/s wird nun die Verdichtung vorgenommen. Bei einer vorgegebenen Rohdichte von 1,6 g/cm³ wird die Endlänge des Probekörpers bei 24,06 mm erreicht. Kurz vor Erreichen der Endlänge wird der Druck gestoppt, da das Material ein wenig nachkompaktiert. Nach Erreichen der Endlänge wird der Stempel mit der Überwurfmutter arretiert. Die nun präparierte Messzelle kann in den Versuchsstand eingebaut und an die Datenerfassungsanlage angeschlossen werden.

Durchführung und Auswertung der Quelldruckmessung mit dem GRS-Verfahren

In Abb. 6.8 ist ein Beispiel einer Quelldruckmessung mit dem GRS-Verfahren dargestellt. Das Diagramm zeigt die Messung an einer MX-80 Probe mit der Einbaudichte 1,6 g/cm³ bei Raumtemperatur mit NaCl-Lösung. Zu Beginn des Versuches dringt die Lösung, von der HPLC-Pumpe gefördert, schnell in den Porenraum ein. Durch Quellung des Materials vermindert sich der Porenraum rasch und der Druck nimmt zu. Bei einem voreingestellten Wert für den maximalen Fluiddruck, in der Regel 100 bar, stellt die Pumpe die weitere Förderung ein. Weitere Lösung wird nur noch eingepresst, wenn der anstehende Fluiddruck wieder abgesunken ist. Probekörper, bei denen ein solcher Verlauf beobachtet wurde, werden als „selbstabdichtend“ bezeichnet. Trotz der großen Anstrengungen, alle Versuchsrandbedingungen gleich zu halten, waren nur ca. 70 % der Proben „selbstabdichtend“ (s. Tab. 22). Bei „durchlässigen“ Proben tritt Lösung schon vor Erreichen des maximalen Lösungsdrucks aus der Probe aus. Solche Proben wurden bei dem anstehenden Lösungsdruck auch nicht mehr „dicht“, d.h. die vollständige Aufsättigung des gesamten Porenraums wurde nicht erreicht, weil die Lösung auf bevorzugten Wegsamkeiten floss. Entlang dieser Wegsamkeiten quillt der Bentonit und verhindert das Eindringen von Lösung in noch nicht gesättigte Bereiche des Poren-

raums. Solche Proben wurden dann durch Schließen des Auslaufventils zwangsgeflutet.

Diese Beobachtung ist praxisrelevant. Sie besagt im Prinzip, dass mit einer Abdichtung von Feldesteilen mit Bentonitdichtungen dann nicht gerechnet werden kann, wenn der anstehende Lösungsdruck höher ist als der zu erwartende Quelldruck.

Wenn keine weitere Lösung in den Probekörper mehr eingepresst werden konnte, wurde die HPLC-Pumpe abgestellt und Zu- und Auslaufventil der Messzelle geöffnet. Durch das Öffnen der Ventile sinkt der Lösungsdruck sofort ab. Der Porendruck wird langsam abgebaut. Angezeigt wird nun nur noch ein Druck, der sich aus dem Quelldruck des Bentonits und dem Kristallisationsdruck der in der Probe ausgefallenen Salze zusammensetzt. Die Ablesung dieses als „Quelldruck“ bezeichneten Druckes erfolgte, wenn er nicht weiter abfiel, sondern konstant blieb.

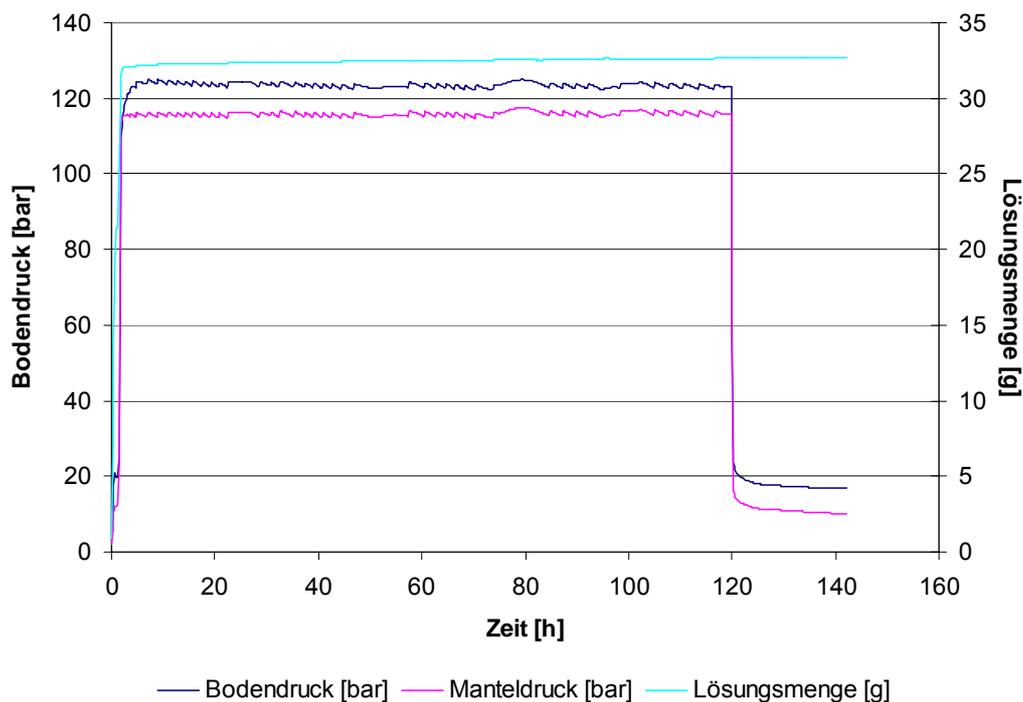


Abb. 6.8 Beispiel einer Quelldruckmessung mit dem GRS-Verfahren

Quelldruckmessungen bei erhöhten Temperaturen

Um Quelldruckmessungen bei erhöhten Temperaturen durchführen zu können, war es notwendig, die wichtigsten Komponenten des Versuchsstandes, die Messzelle mit der Probe, das Lösungsvorratsgefäß, das Lösungsauffanggefäß, die Verbindungsschläuche und die Pumpe in einem Wärmeschrank bei der gewünschten Temperatur unterzubringen. Alle elektronischen Teile der Pumpe und der Datenerfassung mussten jedoch außerhalb des Wärmeschanks liegen. Es ist bekannt, dass bereits bei geringfügigen Temperaturschwankungen Aussalzen auftreten können, die zur Verfälschung der Messwerte führen. Die Durchführung der Messungen erfolgte wie oben beschrieben.

Verfahren der Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona

Abb. 6.9 und Abb. 6.10 zeigen die Messzelle und die Versuchsanordnung des Spanischen Verfahrens der Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (UPC). Dieses Verfahren wird auch von der Arbeitsgruppe von Prof. Schanz an der Bauhaus-Universität Weimar zur Messung von Quelldrücken mit destilliertem Wasser eingesetzt /GRU 05/. Damit können Quelldrücke ohne Fluiddruckbeaufschlagung direkt gemessen werden. Die Proben werden in Stahlzylindern unter einer Presse hergestellt und nach Entspannung und Einstellung einer einheitlichen Saugspannung, die durch Lagerung in einer Atmosphäre mit gleich bleibender Luftfeuchte eingestellt wird, in die Messzelle eingebaut. Die Aufsättigung des Poreriums erfolgt drucklos durch die Saugkraft des kompaktierten Probenkörpers. Die obere und untere Fläche der zylindrischen Probe gelangt über Fritten mit der Lösung in Kontakt. Die Prinzipskizze (Abb. 6.10) zeigt die Zirkulation der Lösung entlang der Zylinderoberflächen. Der Quelldruck wird mittels eines Sensors auf einen kalibrierten Spannungswertgeber übertragen. Mit diesem Direktverfahren sind keine Quelldruckmessungen mit Fluidrücken möglich. Für die Messung von Quelldrücken mit Salzlösungen muss die UPC-Messzelle aus Titan gefertigt werden. Details zur Funktionsweise und den Zusammenhängen zwischen Saugspannung und maximalem Quelldruck werden in /GRU05/ beschrieben.

Ergebnisse mit diesem Verfahren sind auf realistische Szenarien, bei denen der anstehende Fluiddruck bis zu hundert bar betragen kann, nicht anwendbar. Das Material der Druckzelle erlaubt wegen möglicher Korrosion ferner keine Experimente mit hochsalinaren Lösungen.

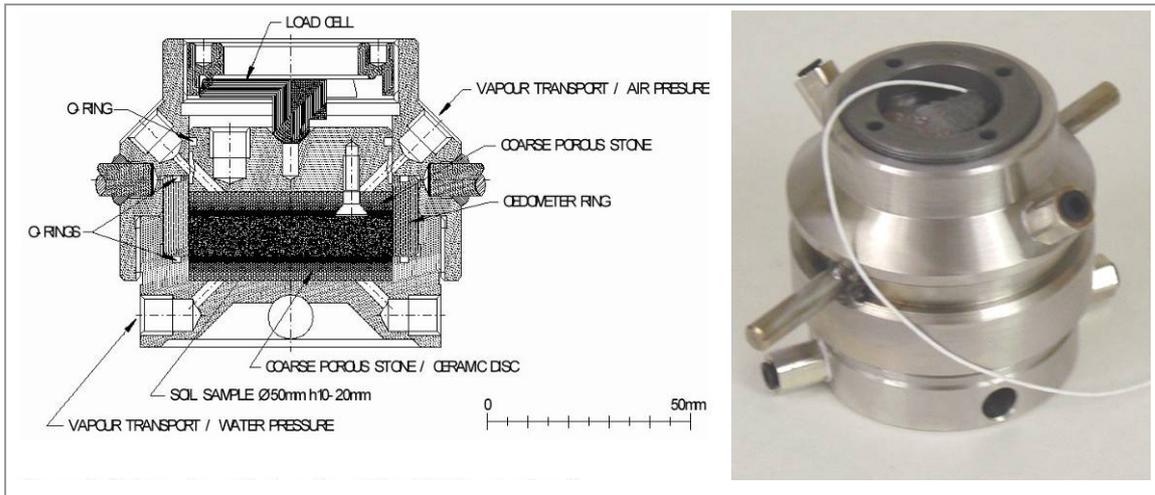


Abb. 6.9 Prinzipskizze und Foto der Messzelle der Universidad Politéchnica de Cataluña, Barcelona (UPC) zur Messung von Quelldrücken mit druckloser Aufsättigung des Porenraums

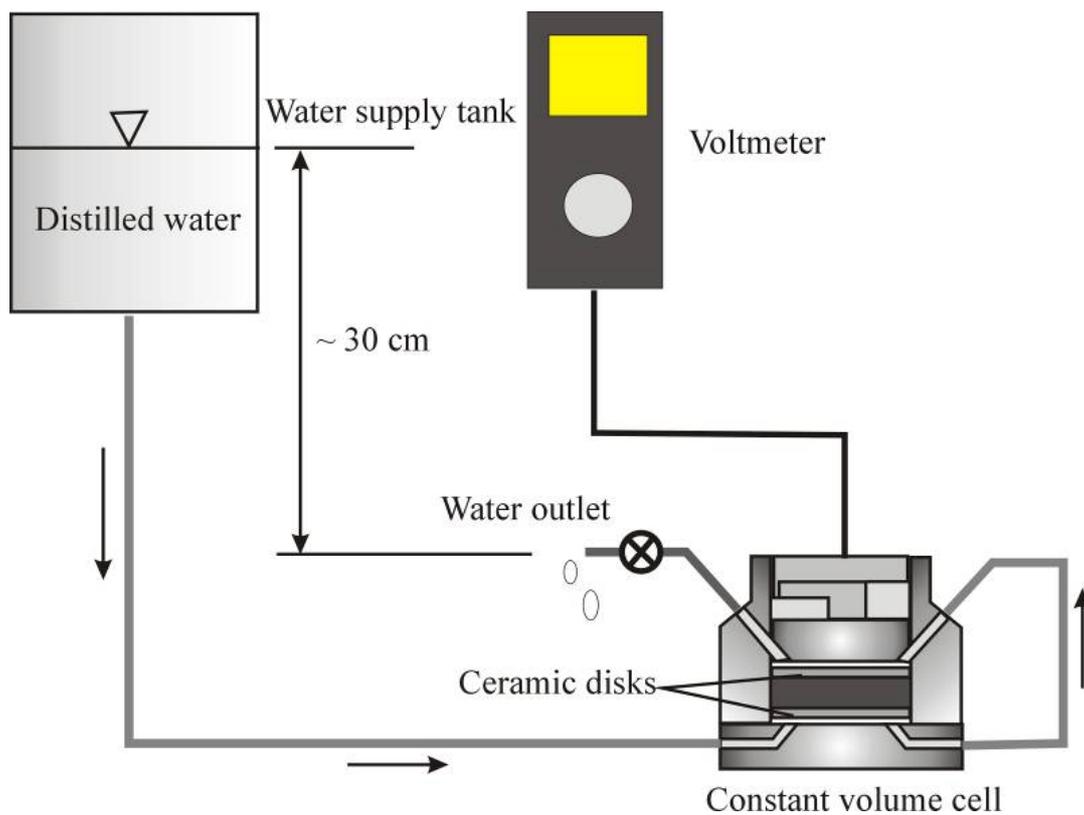


Abb. 6.10 Prinzipskizze des Quelldruckmessstandes mit der UPC-Messzelle

7 Qualitätssicherung bei der Quelldruckmessung

Die GRS ist nach ISO 9001:2000 zertifiziert und erfüllt die Forderungen an die Qualitätssicherung und Dokumentation der Ergebnisse. Im Einzelnen wurden bei der Durchführung des vorliegenden FuE-Vorhabens die unten beschriebenen Maßnahmen zur Qualitätssicherung getroffen. Damit sollte eine vollständige Nachvollziehbarkeit und vor allem die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. Für jede Messung gibt es ein vollständiges Prüfprotokoll. Alle Prüfprotokolle werden nach Abschluss des Projektes 10 Jahre aufbewahrt.

7.1 Konstante Versuchsrandbedingungen

Die Quelldruckmessungen jeder Messreihe wurden mit Proben gleichen Bentonits, gleicher Masse, gleichen Volumens und gleicher Mikrostruktur durchgeführt. Auch alle andern Versuchsrandbedingungen, wie Art der Lösung, Flutungsrate, maximaler Fluiddruck und Versuchslaufzeiten wurden konstant gehalten.

Die meisten Versuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Diese war Schwankungen zwischen Tag und Nacht um maximal ca. 3 °C unterworfen. Deshalb wurden die Versuche grundsätzlich zwischen Dienstag- und Freitagmorgen, und zwar immer zur gleichen Zeit, morgens um 7:00 Uhr beendet und die dann registrierten Drucke für die Auswertung herangezogen. Größere Schwankungen der Raumtemperatur im Labor waren zwischen Sommer und Winter zu verzeichnen, mit Extremen zwischen 18 – 25 °C. Die große Mehrheit der Quelldruckmesswerte wurde bei einer Temperatur von ca. 22 °C erfasst.

Die Mikrostruktur ergibt sich aus der Gesamtheit aller Vorbehandlungen, einschließlich der Probenahmetechnik und der Vorgehensweise bei der Kompaktion. Durch Einhaltung aller in Kapitel 6.3.2 genannten Versuchsvorschriften wurde der Versuch unternommen, die Mikrostruktur als Versuchsvariable auszuschalten.

Die eingesetzte Bentonitmenge in der kleinen zylindrischen Zelle betrug für eine Rohdichte von 1,6 g/cm³ 75,00 g ± 10 mg. Für die Dichte 1,7 g/cm³ 79,69 g ± 10 mg und für die Dichte 1,8 g/cm³ 84,375 g ± 10 mg. In der großen zylindrischen Zelle und der quaderförmigen Zelle waren es jeweils 3356,20 g ± 10 mg.

In der kleinen zylindrischen Zelle betrug die Probenhöhe bei allen Proben unabhängig von der Rohdichte $24,06 \pm 0,02$ mm. In der großen zylindrischen Zell waren es $34,99 \pm 0,02$ mm und in der quaderförmigen Zelle $32,44 \pm 0,02$ mm.

Alle Proben wurden mit einer Flutungsrate von 0,1 ml/min geflutet. Der Fluiddruck baute sich selbständig auf und wurde in allen Versuchen auf 100 bar begrenzt. Die Messung des Fluiddrucks erfolgte über einen externen Druckaufnehmer mit einer Genauigkeit von 0,1 bar. Die Begrenzung dieses Drucks auf 100 bar erfolgte über die HPLC-Pumpe. 100 bar wurde willkürlich als maximaler Lösungsdruck festgelegt. 100 bar können in einem Bergwerk in Salzformationen in einer Tiefe von 800 m auftreten, wenn dieses mit IP21-Lösung der Dichte $1,3 \text{ g/cm}^3$ geflutet ist. Dies ist ein realistisches Szenarium, wie es die Beispiele Asse und Morsleben zeigen.

Ebenfalls automatisch registriert wurden Boden- und Manteldruck in den Messzellen mit einer Genauigkeit von 0,1 bar.

7.2 Kontrolle der gebundenen Lösungsmenge in den gequollenen Probekörpern

Die in den Proben gebundene Lösungsmenge wurde über die Erfassung der eingepumpten und ausgetretenen Lösungsmenge bestimmt. Diese Lösungsmengen wurden mit Mettler-Waagen mit einer Genauigkeit von ± 10 mg erfasst und automatisch registriert. In Tab. 6 bis 22 sind für jede Messung die Quelldrücke (Boden- und Manteldruck) sowie die gebundenen Lösungsmengen angegeben. In Tab. 6 bis 21 werden für jede Messreihe ein Mittelwert, die absolute Standardabweichung und die relative Standardabweichung in % angegeben. Dies gibt einen schnellen Überblick über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Diese ist trotz aller Bemühungen, gleich bleibende Versuchsrandbedingungen einzuhalten, unbefriedigend. Von insgesamt 29 Messreihen bei Raumtemperatur liegt die Standardabweichung der gebundenen Lösungsmenge in 14 Messreihen unter 20 % des Mittelwertes. Bei 12 Messreihen liegt sie zwischen 20 – 25 % des Mittelwertes und bei drei Messreihen über 25 %. Dabei ist es unerheblich, ob in einer Messreihe viele oder wenige Messungen durchgeführt wurden.

Die Menge der Lösung, die in eine kompaktierte Bentonitprobe eindringen kann, ist abhängig vom offenen Porenraum. Je höher der Kompaktionsgrad einer Probe ist, umso kleiner ist der freie Porenraum und entsprechend kleiner ist die Lösungsmenge, die bei 100 % Sättigung darin aufgenommen werden kann. Dieser allgemeine Trend ist

trotz der hohen Fehlerbalken in Abb. 7.1 erkennbar. Gut reproduzierbare Messungen sollten für jede beliebige Lösungszusammensetzung und jede Probendichte geringe Fehlerbalken aufweisen und den beschriebenen Trend deutlicher zeigen.

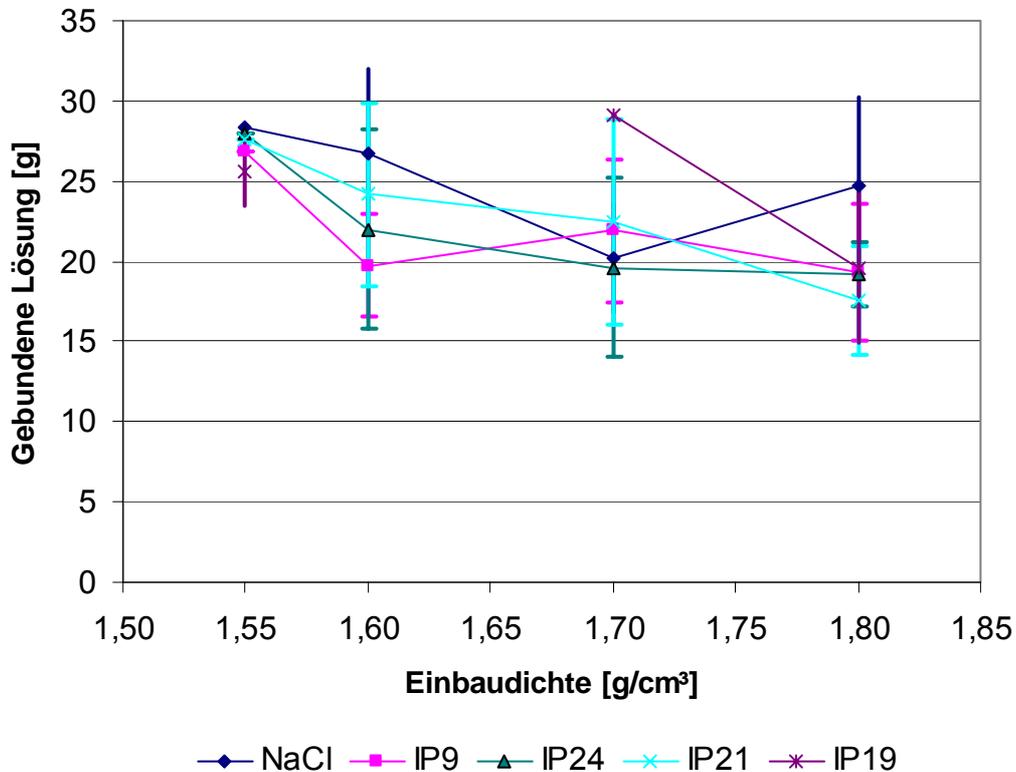


Abb. 7.1 Gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben unterschiedlicher Einbaudichten am Ende der Quelldruckmessungen mit unterschiedlichen Salzlösungen (Tab. 6 bis 10, 22)

Bei gleichem Kompaktionsgrad sollte im Idealfall die Lösungsmenge für eine gegebene Lösungszusammensetzung konstant sein, da das Ausgangsporenvolumen gleich ist. Die Auswertung der Messungen (Abb. 7.2) zeigt allerdings, dass die Realität mit dem Idealfall nicht übereinstimmt.

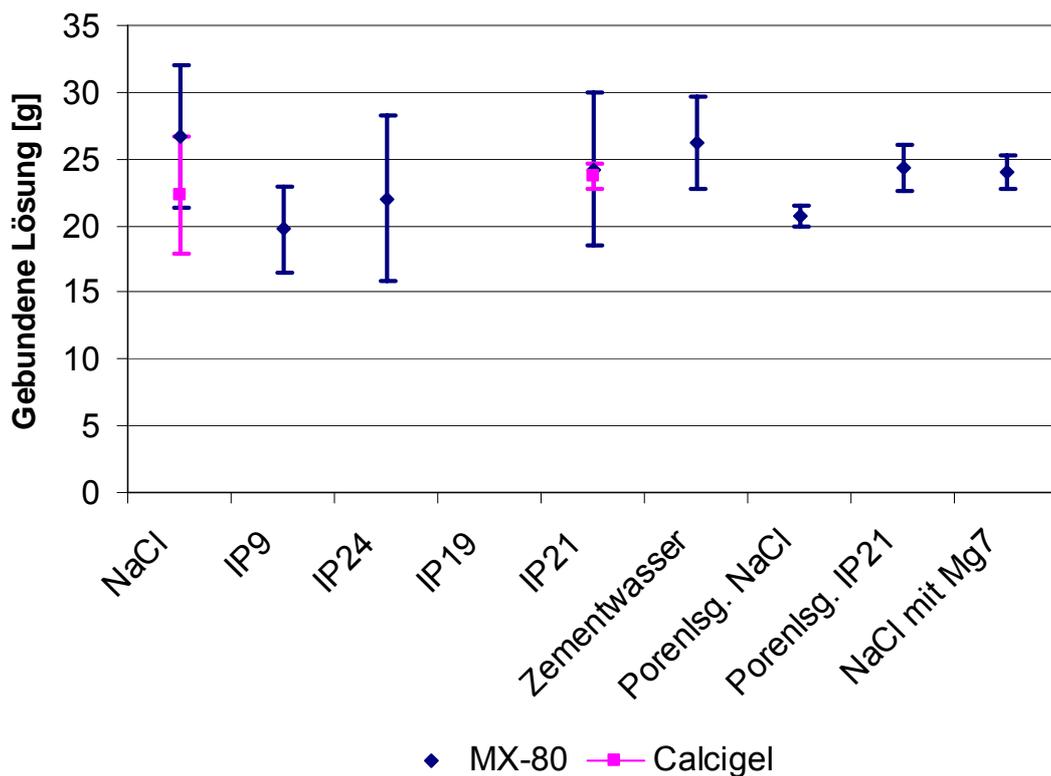


Abb. 7.2 Gebundene Lösungsmenge in MX-80 Proben mit verschiedenen Lösungen, sowie von Calcigel Proben mit NaCl- und IP21-Lösung, Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ (Tab. 6 bis 16, 22)

Auffällig ist, dass die Fehlerbalken für die Messreihen mit NaCl-, IP24-Lösung und Zementwasser höher sind, als für Messreihen mit anderen Lösungen. Es gibt keine klare Korrelation der gebundenen Lösungsmenge mit der Lösungszusammensetzung. Gäbe es eine, könnte man annehmen, dass Lösungen mit mehr freiem Wasser zur schnelleren Quellung führen und damit je nach diskreter Wegsamkeit in der Einzelprobe den Porenraum durch Quellen mal schneller, mal langsamer verschließen, als Lösungen mit höherem Salzgehalt. Es ist zu vermuten, dass die gebunden Lösungsmenge konstanter bleibt, wenn die Geschwindigkeit der Aufsättigung höher ist, als die der Quellung. Da die Flutungsgeschwindigkeit konstant gehalten wurde, aber die Geschwindigkeit der Quellung mit steigendem Salzgehalt der Lösung abnimmt, wäre nahe liegend, dass die gebundene Wassermenge umso konstanter wird, je größer der Unterschied zwischen Aufsättigungsgeschwindigkeit und Quellgeschwindigkeit ist. Dies ist aber bei den vorliegenden Messungen nicht der Fall. Damit gibt es keine plausible Erklärung für die unterschiedlichen Fehlerbalken. Offensichtlich ist nicht die Lösungszusammensetzung

zung der entscheidende Parameter für die von einer Probe aufgenommene Lösungsmenge. Zu vermuten ist, dass die Mikrostruktur der Probe der wichtigere Faktor ist.

Erfreulicherweise scheint die Mikrostruktur in Proben unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Geometrie ziemlich einheitlich zu sein. Normiert man die gebundene Lösungsmenge auf die Probenmenge, weisen die gebundenen Lösungsmengen ähnliche Werte und ähnliche Fehlerbalken auf (Abb. 7.3).

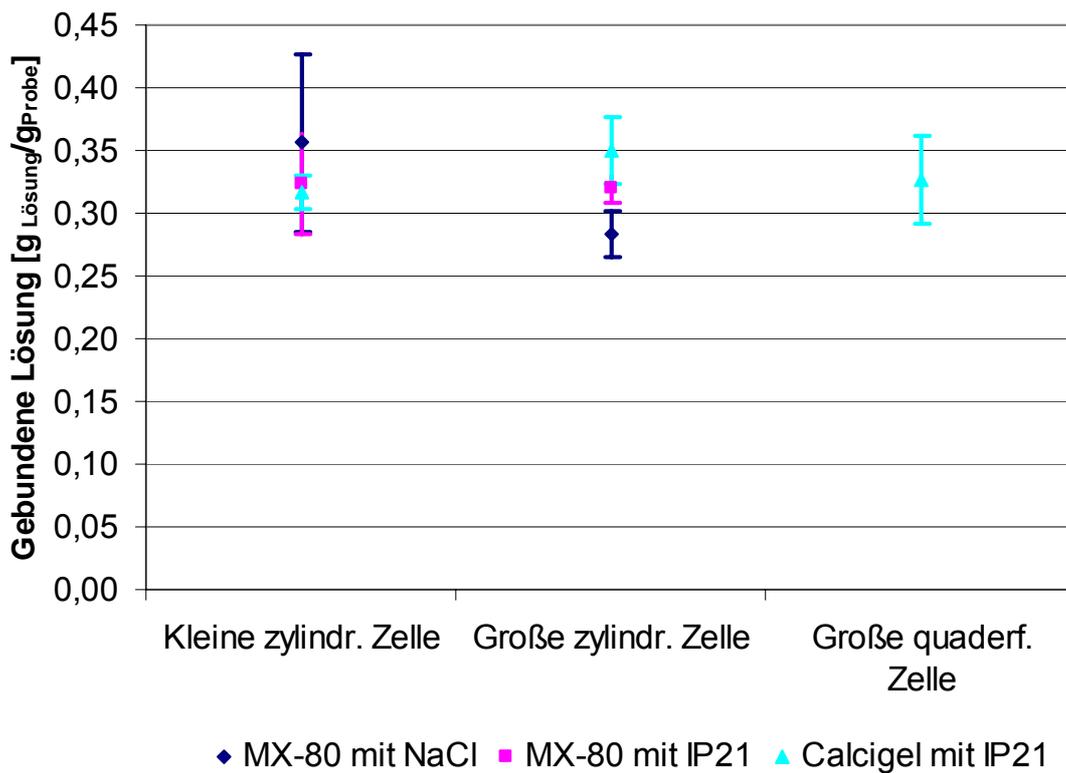


Abb. 7.3 Normierte gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben mit NaCl- und IP21-Lösung sowie in Calcigel-Proben mit IP21-Lösung, jeweils Rohdichte 1,6 g/cm³, in Abhängigkeit von der Probengröße und Probengeometrie am Ende der Quelldruckmessungen (Tab. 17, 18, 22)

Bei den wenigen Probenserien die bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen wurden, lässt sich kein eindeutiger Trend der gebundenen Lösungsmenge in Abhängigkeit von der Temperatur ausmachen (Abb. 7.4).

7.3 Kontrolle der gleichmässigen Sättigung der gequollenen Probekörper

In Abb. 7.5 ist an einem Beispiel die Entwicklung der aufgenommenen Lösungsmenge während eines Quelldruckversuchs dargestellt.

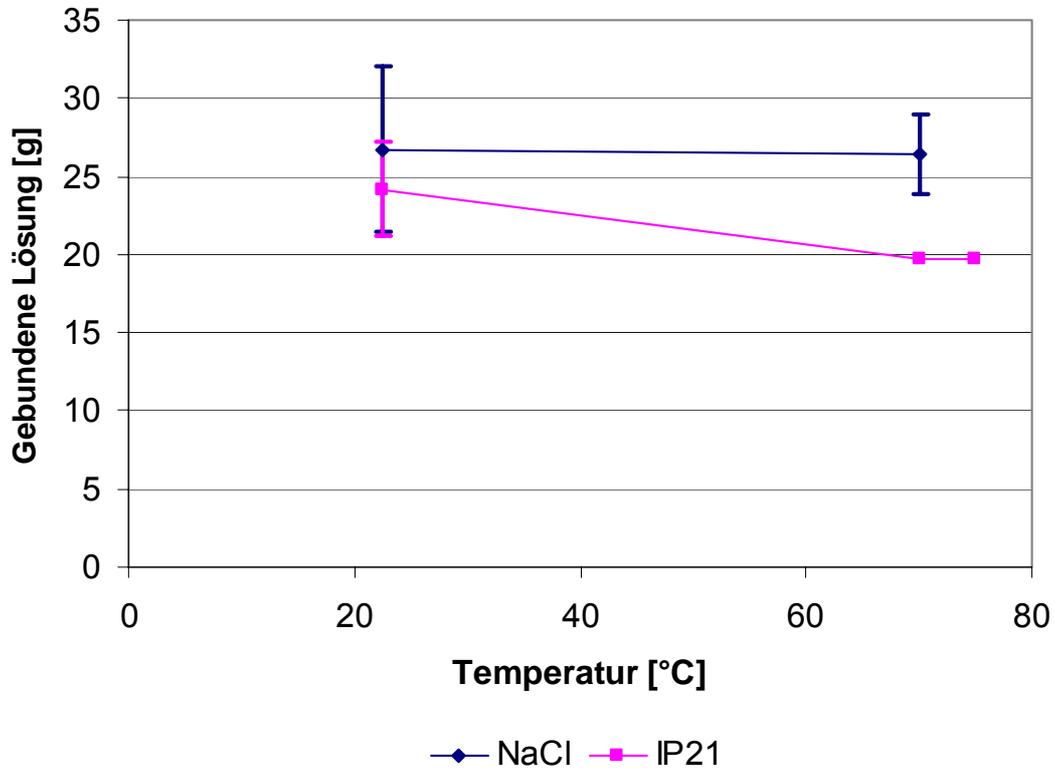


Abb. 7.4 Gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben der Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen in Abhängigkeit von der Temperatur (Tab. 19, 20, 22)

Zur Kontrolle der Homogenität der Lösungsverteilung am Ende eines Versuchs wurde die gequollene Probe in sechs Teile geteilt und der darin enthaltene Chloridgehalt gemessen. Da die Ausgangsroben praktisch Chlorid-frei sind, kann der Chloridgehalt als Maß für die Menge Lösung pro Bentonitmasse dienen. Bei einer einheitlichen Verteilung der Lösung in der Probe müssten die Chloridwerte an jeder Stelle gleich sein. Die tatsächliche Verteilung am Ende der Quelldruckmessungen zeigen die Abb. 7.6 bis 7.10 und die Tab. 5.

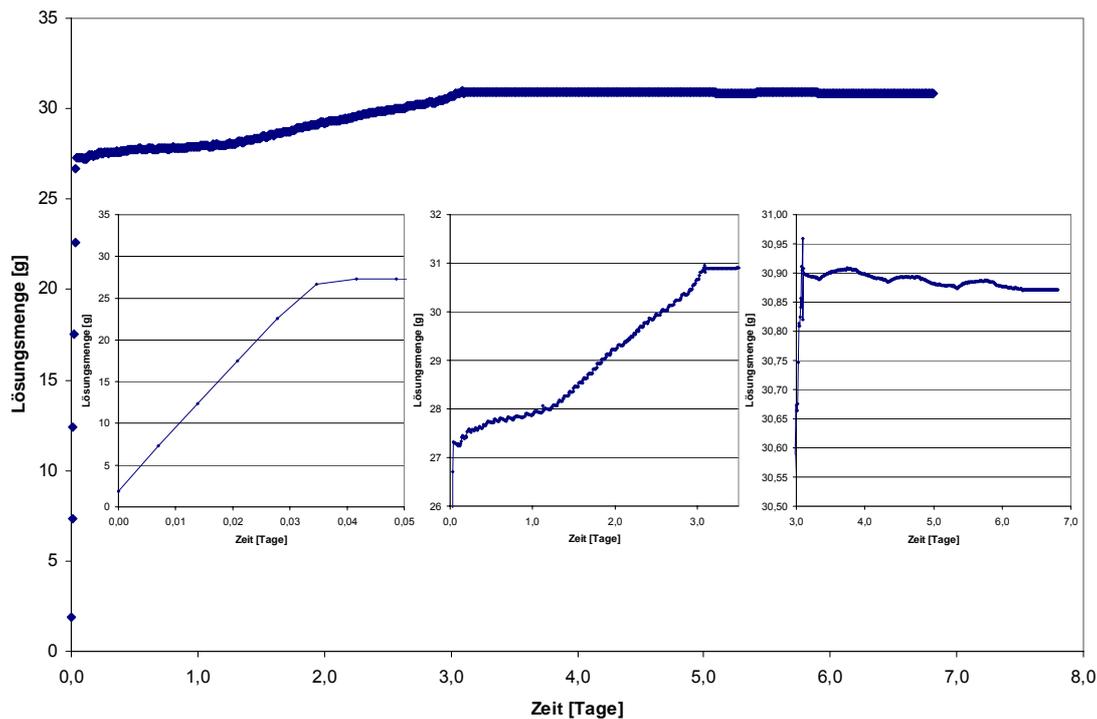


Abb. 7.5 Entwicklung der aufgenommenen Lösungsmenge während der Quelldruckversuche am Beispiel der Probe QV 098, MX-80, Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl-Lösung

Es wird deutlich, dass die Lösungsverteilung von wenigen Ausnahmen abgesehen nicht einheitlich war. Nur wenige Ausnahmen bestätigen die Regel. Proben mit niedrigerer Rohdichte und entsprechend größerem Porenraum waren nicht homogener als Proben mit höherer Dichte. Proben, die mit wasserreicheren Lösungen beaufschlagt wurden, waren nicht homogener als solche mit höher salinaren Lösungen. Daraus ist zu folgern, dass es sehr problematisch ist, eine gleichmäßige, hundertprozentige Sättigung des Porenraums zu erreichen. In der Regel wurden Versuchszeiten von 6 bis 7 Tagen eingehalten. Diese reichten offensichtlich für eine vollständige Sättigung des Porenraums nicht aus. Für das Projekt hätten längere Versuchszeiten keine nennenswerte Verbesserung der Ergebnisse erwarten lassen, da der erste schnelle Prozess der Wasseraufnahme bei Abbruch der Versuche zu Ende war (Abb. 7.5). Mit Erreichen des maximalen Fluiddruckes von 100 bar war in der Regel die schnelle Wasseraufnahme weitestgehend abgeschlossen. Diese dauerte nur wenige Stunden. Im Beispiel des Versuchs QV 098 (MX 80, Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl-Lösung) waren es knapp 8 Stunden (Abb. 7.5, kleines Bild links). In dieser Zeit hatte die Probe bereits 27,58 g (89,4 %) von insgesamt 30,86 g Lösung aufgenommen. In den nächsten 3 Tagen setzte sich die Lösungsaufnahme infolge der kombinierten Wirkung von Saugspannung und Fluiddruck mit wechselnder, aber insgesamt deutlich reduzierter Geschwindigkeit

fort (Abb. 7.5, kleines Bild Mitte). In diesem zweiten Abschnitt der Lösungsaufnahme wurden in der Probe noch 3,28 g Lösung (10,6 %) gebunden. Danach war keine messbare Lösungsaufnahme mehr zu verzeichnen. Die Schwankungen der Lösungsmenge im dritten Zeitabschnitt (Abb. 7.5, kleines Bild rechts) sind auf Temperatureffekte und möglicherweise auf geringe Verdunstung aus dem Probengefäß zurückzuführen. Nach Ende der noch messbaren Lösungsaufnahme (dritter Zeitabschnitt) wurden die Proben noch mehrere Tage unter dem Fluiddruck von 100 bar gehalten. Im Beispiel QV 098 waren es noch vier Tage (Abb. 7.5, kleines Bild rechts). In dieser Zeit kam es wahrscheinlich noch zu einer geringfügigen Umverteilung der Lösung in der Probe. Dieser Prozess dürfte aber ein sehr langsamer sein, da angenommen werden kann, dass er vornehmlich diffusionsgesteuert verläuft.

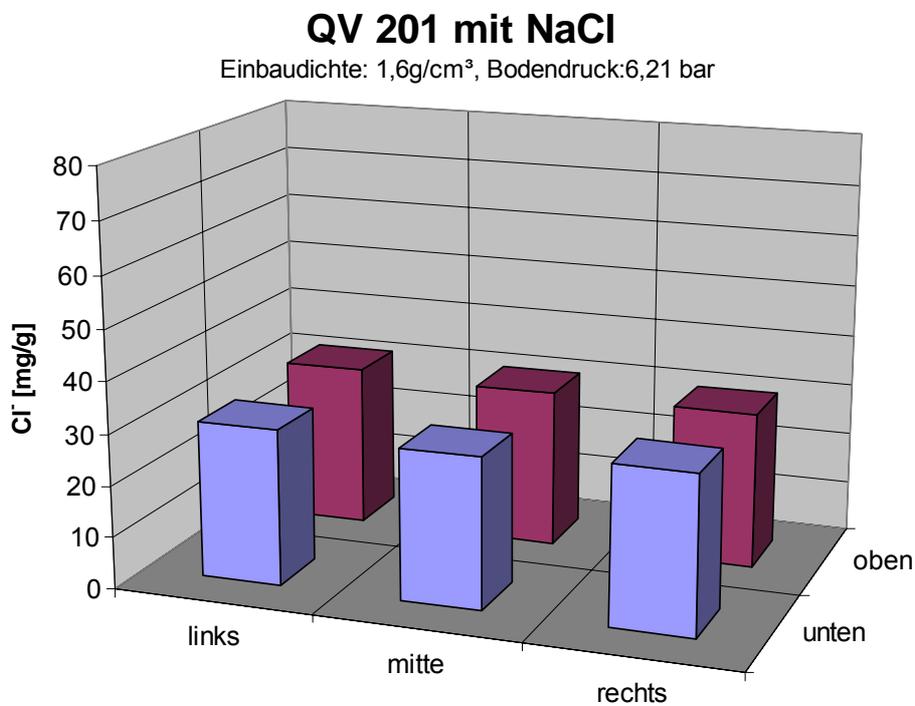


Abb. 7.6 Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,6 g/cm³ [QV 201] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

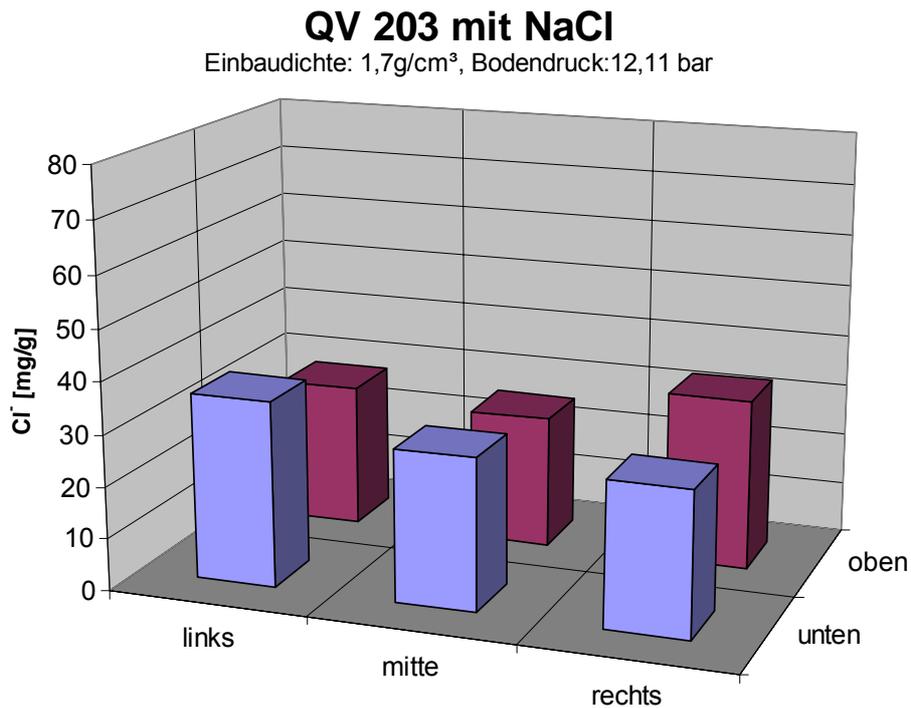


Abb. 7.7 Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 203] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

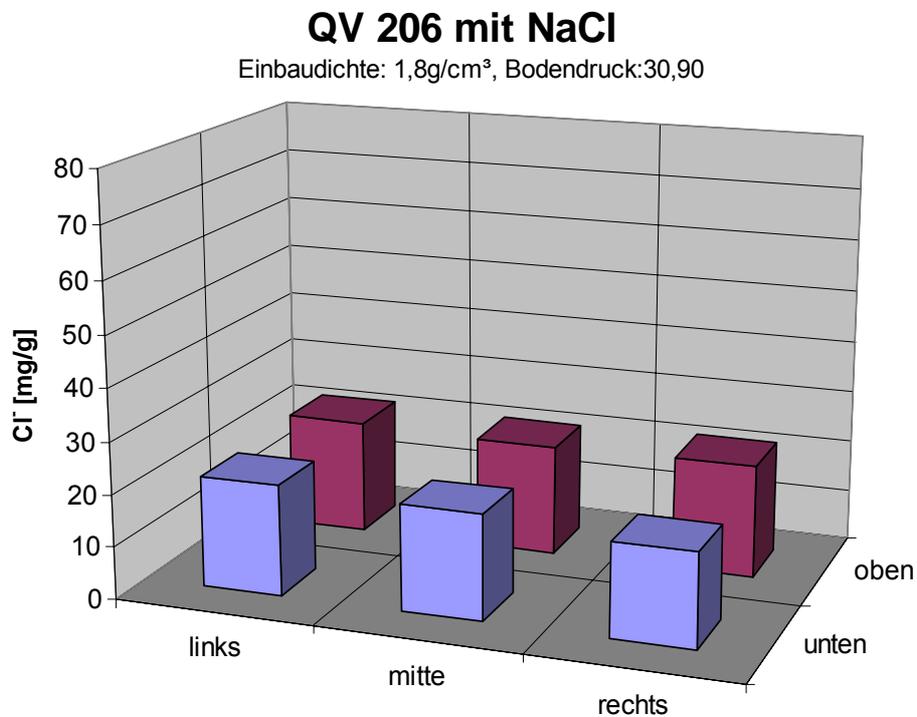


Abb. 7.8 Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,8 g/cm³ [QV 206,] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

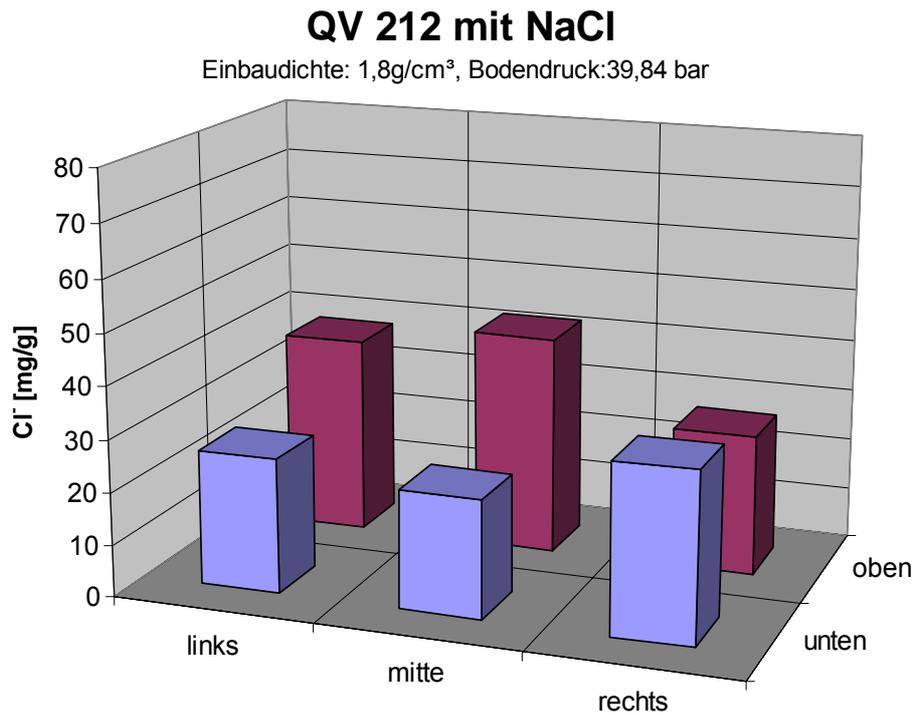


Abb. 7.9 Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,8 g/cm³ [QV 212] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

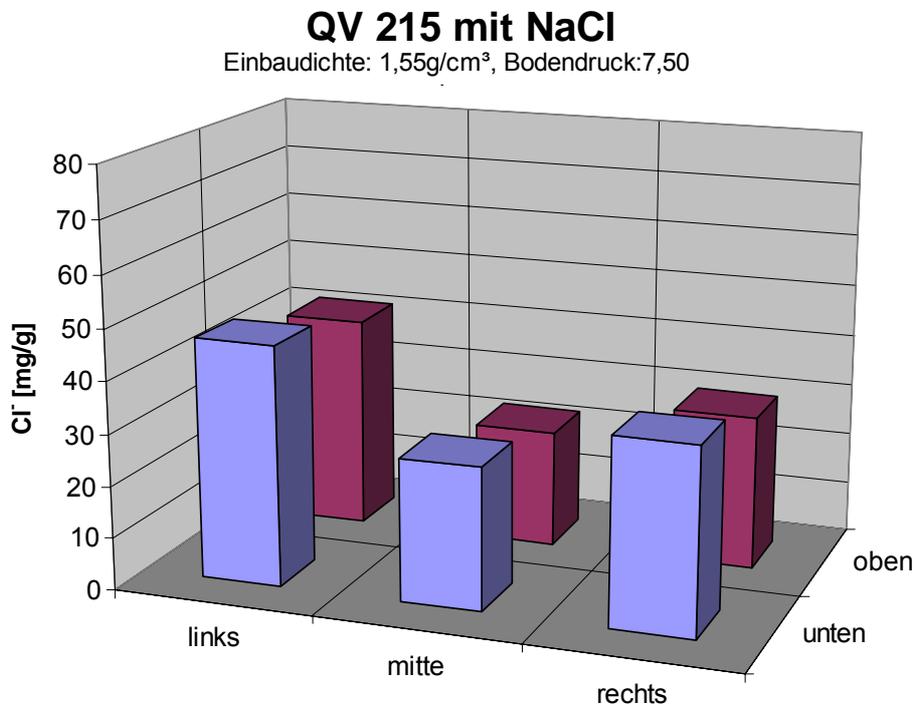


Abb. 7.10 Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm³ [QV 215] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

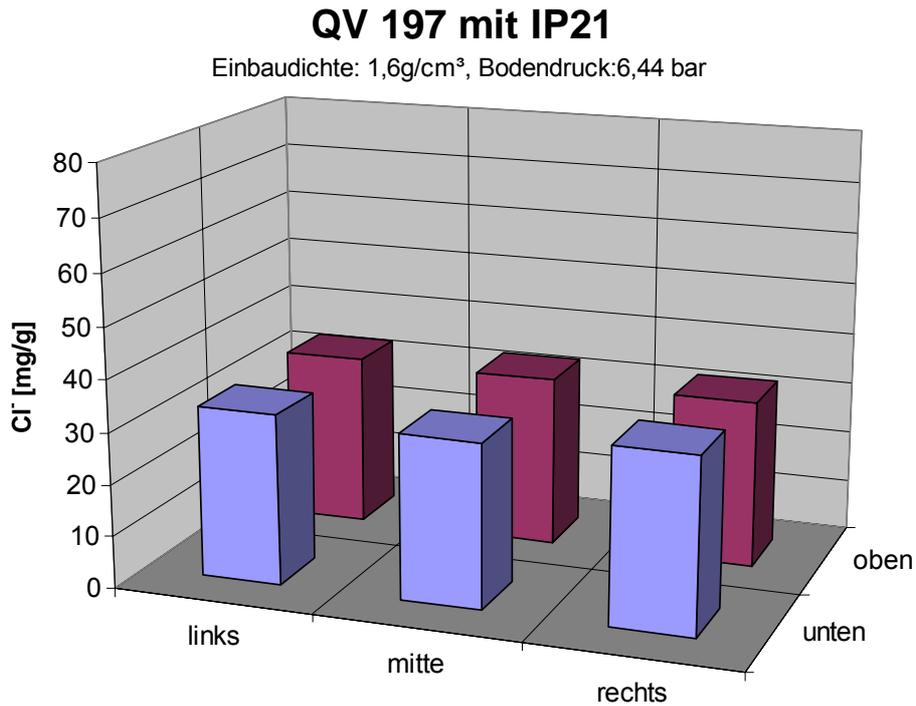


Abb. 7.11 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,6 g/cm³ [QV 197] mit IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

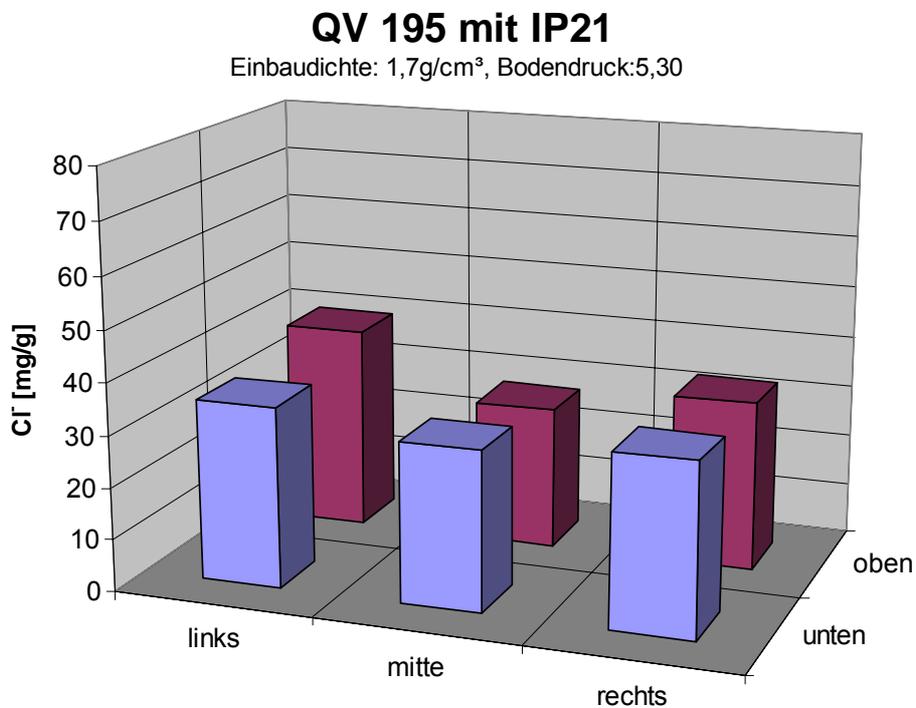


Abb. 7.12 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 195] mit IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

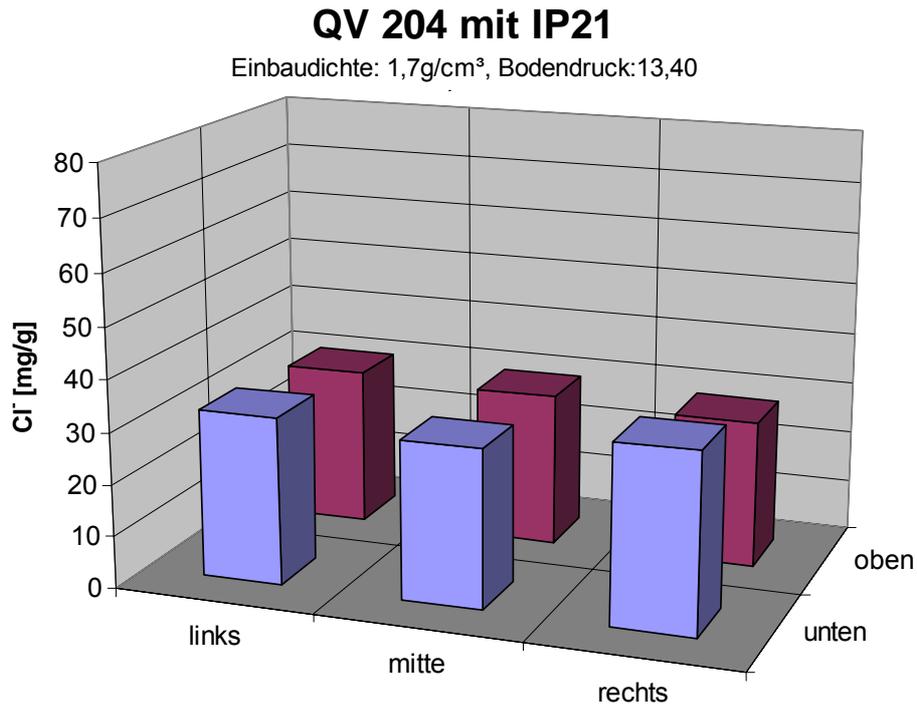


Abb. 7.13 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 204] mit IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

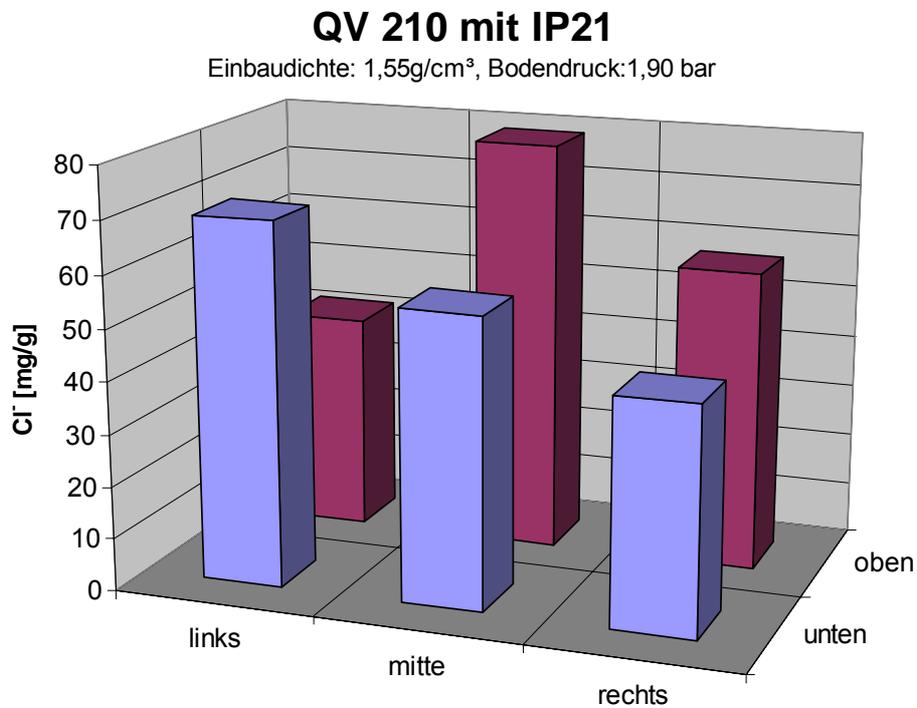


Abb. 7.14 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm³ [QV 210] mit IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

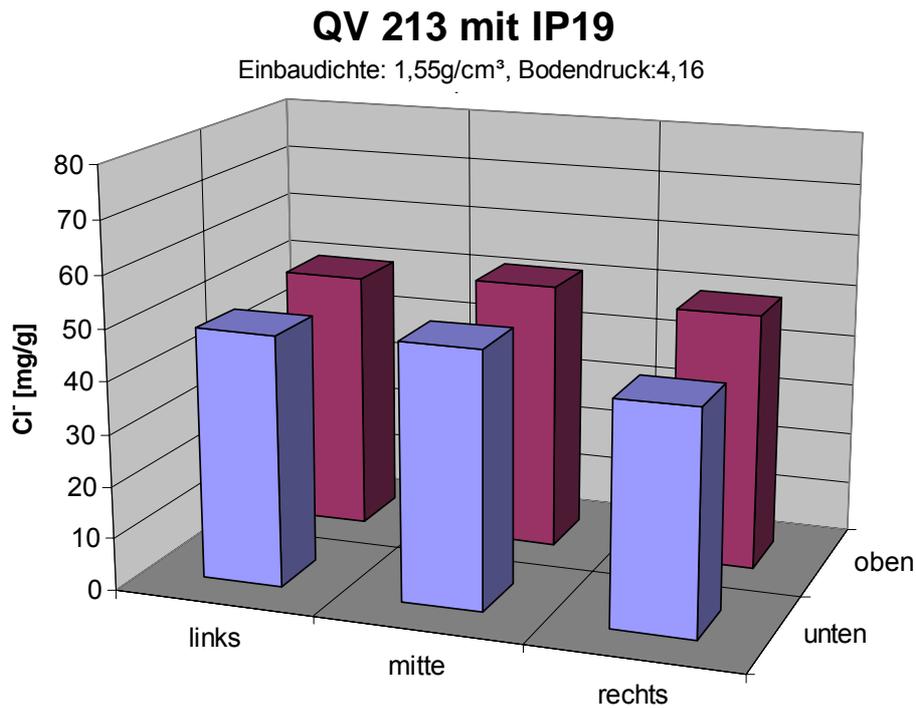


Abb. 7.15 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm³ [QV 213] mit IP19-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

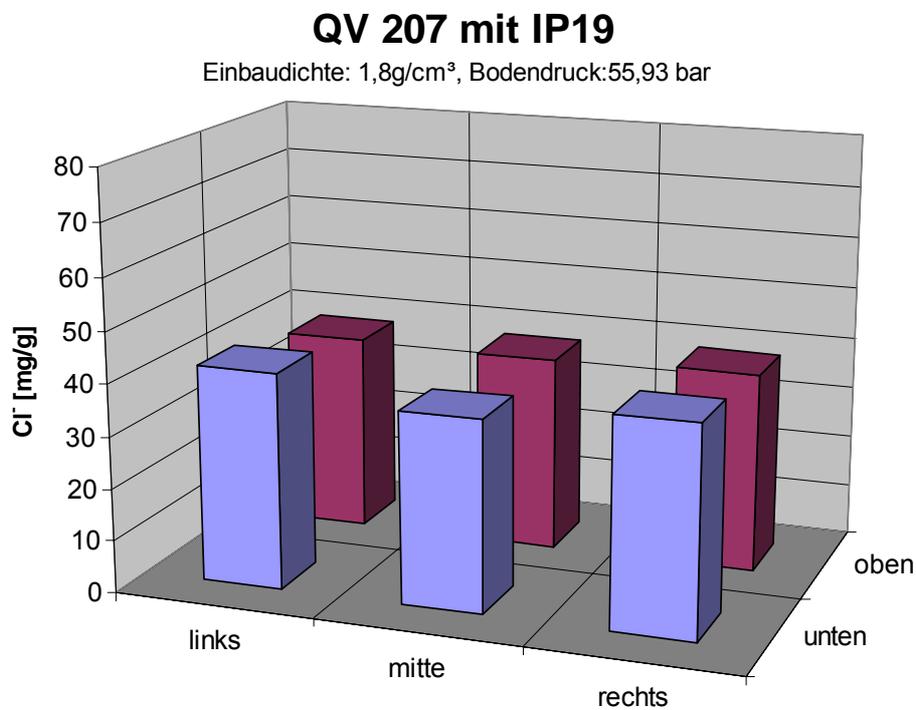


Abb. 7.16 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,8 g/cm³ [QV 207] mit IP19-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

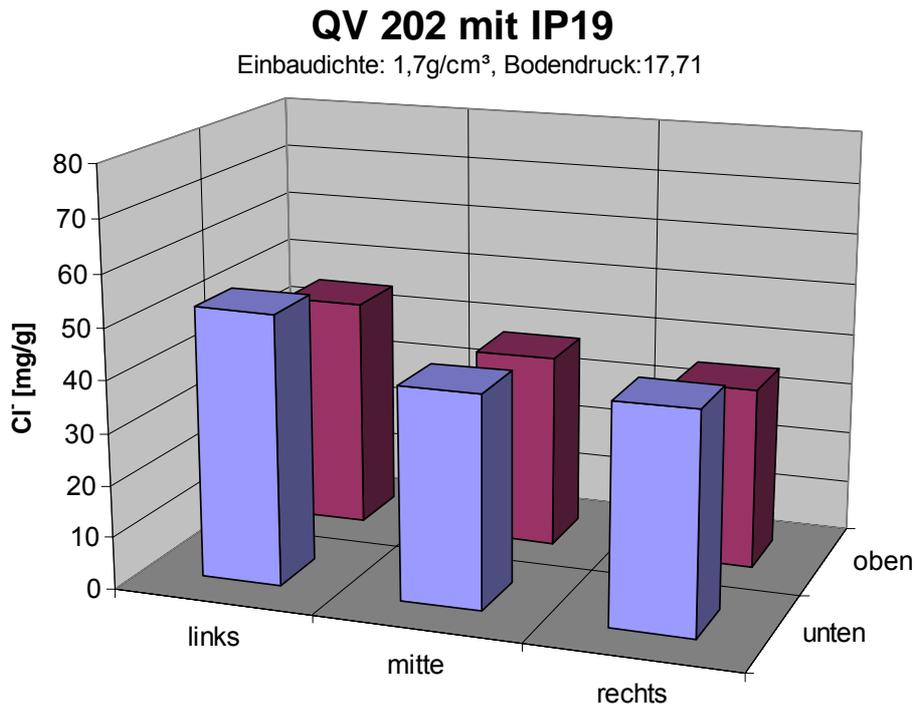


Abb. 7.17 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 202] mit IP19-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

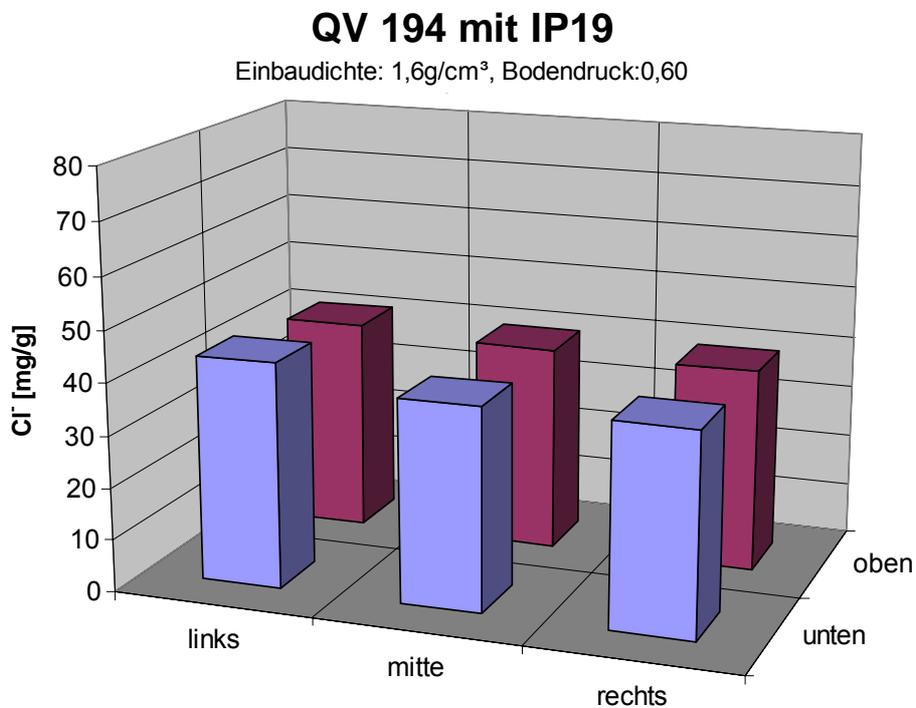


Abb. 7.18 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,6 g/cm³ [QV 194] mit IP19-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

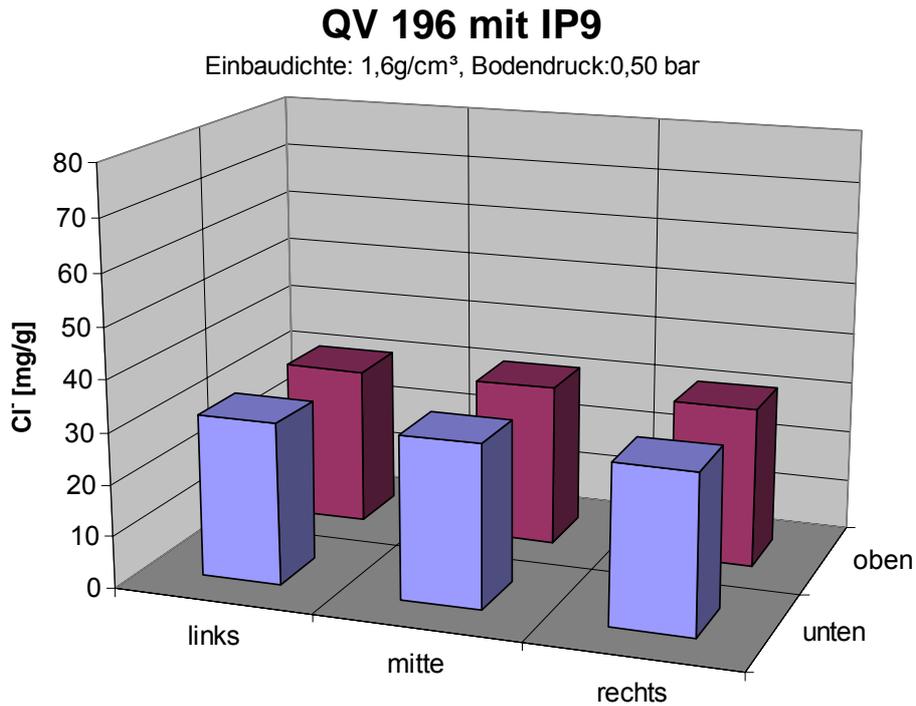


Abb. 7.19 Chloridverteilung in drei MX80 Proben der Rohdichte 1,6 g/cm³ [QV 196] mit IP9-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

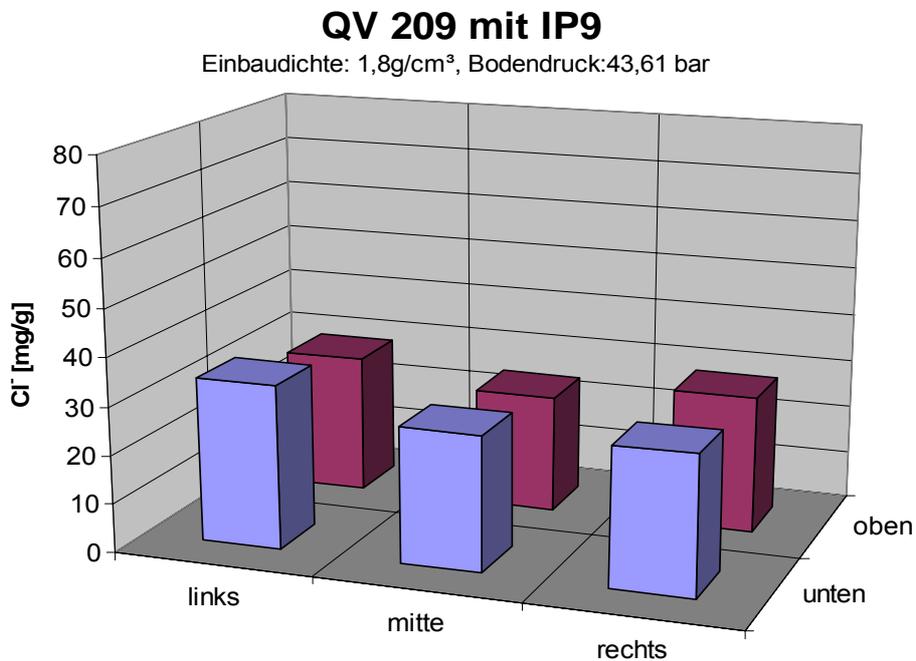


Abb. 7.20 Chloridverteilung in drei MX80 Proben der Rohdichte 1,8 g/cm³ [QV 209] mit IP9-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

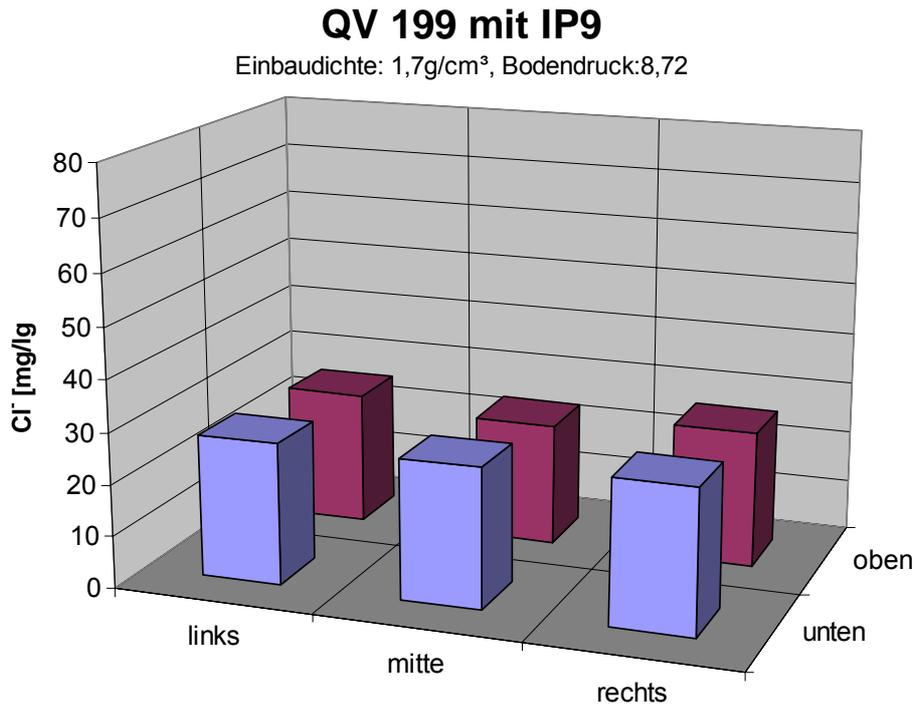


Abb. 7.21 Chloridverteilung in drei MX80 Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 199] mit IP9-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

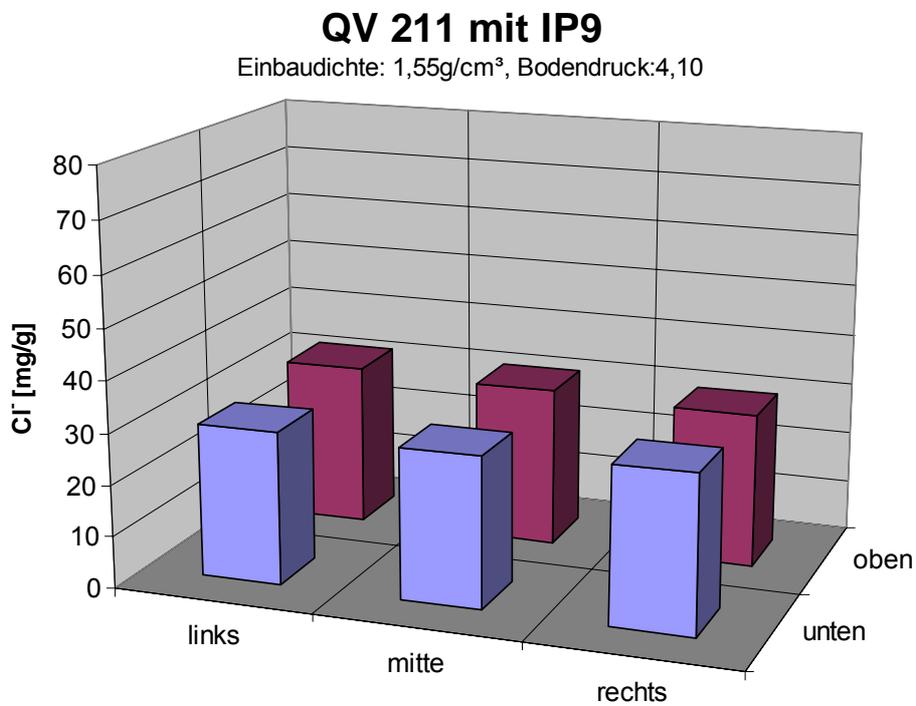


Abb. 7.22 Chloridverteilung in drei MX80 Proben der Rohdichte 1,55 g/cm³ [QV 211] mit IP9-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

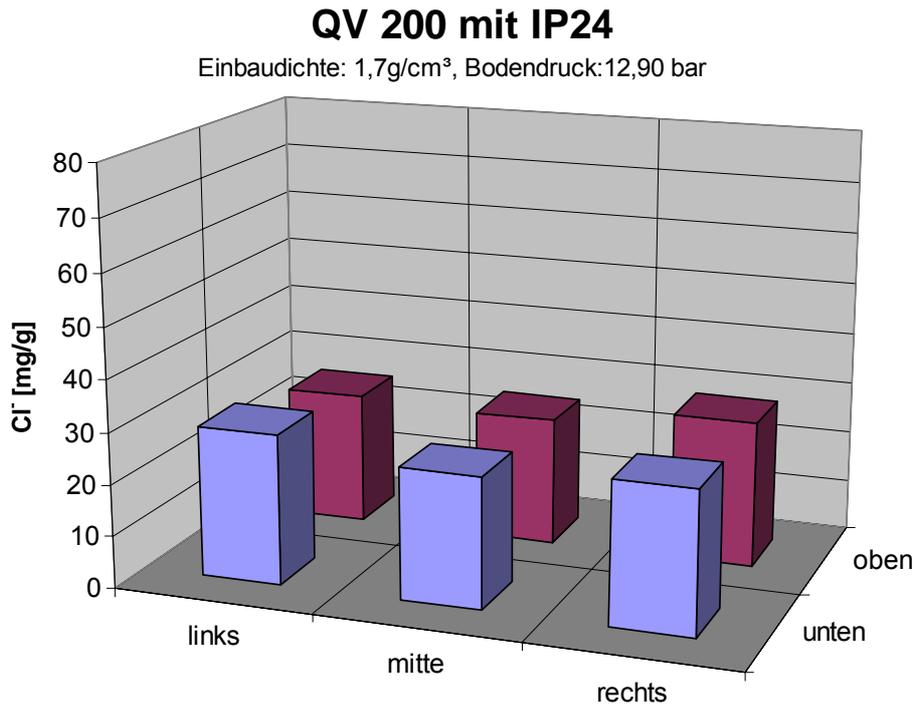


Abb. 7.23 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,7 g/cm³ [QV 200] mit IP24-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

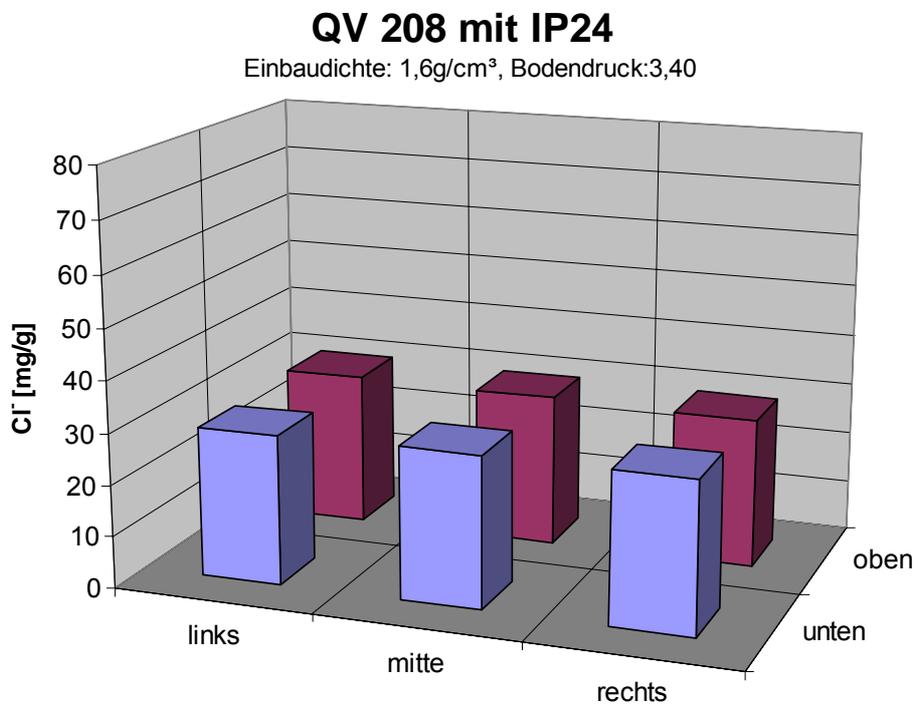


Abb. 7.24 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,6 g/cm³ [QV 208] mit IP24-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

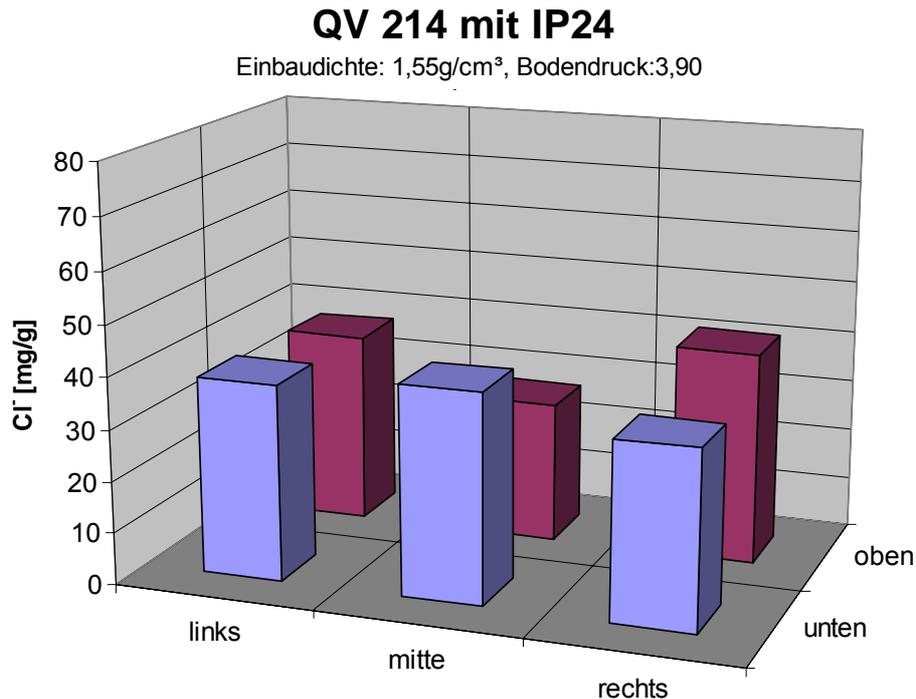


Abb. 7.25 Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm³ [QV 214] mit IP24-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)

7.4 Kontrolle der Zwischenschichtabstände

Zur Kontrolle der vollständigen Quellung wurden nach Beendigung der Versuche auch die Zwischenschichtabstände der Montmorillonite in den gequollenen Proben mittels XRD gemessen. Die Messung erfolgte bei 40 kV und 50 mA im Bereich von 4 ° bis 10 ° 2-θ. Während der Messung wurden die Proben kontinuierlich mit Luft gespült, die durch die gleiche Lösung geleitet wurde und auf dieselbe Gleichgewichtsfeuchte gebracht wurde, die in der Probe während des Versuchs geherrscht hatte. Für jeden Probenkörper wurde der Schichtgitterabstand drei- bis fünfmal gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.11 dargestellt.

Bei vollständig ausreagierten Proben wäre bei einer gegebenen Lösungszusammensetzung unabhängig von der Verdichtung des Bentonits ein konstanter D-Wert zu erwarten gewesen. Auch bei dieser Kontrolle zeigten sich ähnliche Inhomogenitäten wie bei der Kontrolle der gebundenen Lösungsmengen und der Chloridgehalte der Proben.

Lösung	Rohdichte [g/m ³]	D-Wert	Darstellung
NaCl			
	1,55	15,0328	
	1,60	15,3755	
	1,80	15,0962	
IP9			
	1,55	15,3561	
	1,80	14,8091	
IP24			
	1,55	15,2722	
	1,60	14,9116	
IP21			
	1,55	15,9424	
	1,60	15,2279	
	1,80	15,4250	
IP19			
	1,55	15,2396	
	1,80	15,1344	

Abb. 7.26 XRD-Messungen der Zwischenschichtabstände an Montmorilloniten aus MX-80-Bentoniten der Rohdichte 1,6 g/cm³ mit unterschiedlichen Salzlösungen am Ende der Quelldruckmessungen

8 Ergebnisse

Die Ergebnisse aller durchgeführten Quelldruckmessungen sind in Tab. 22 enthalten. Diese umfassende Tabelle enthält alle Messwerte in der Reihenfolge aufsteigender Versuchsnummern (QV-Nr.). In der Tabelle sind für jede Messung folgende erfasste Größen angegeben: Art der verwendeten Lösung, eingesetzter Bentonit, benutzter Zellentyp, Temperatur bei Ablesung des Quelldrucks, Bodendruck, Manteldruck, in die Messzelle eingeleitete Lösungsmenge, ausgetretene Lösungsmenge, in der Probe gebundene Lösungsmenge sowie Informationen über den Versuchsverlauf, darunter Informationen darüber, ob die Probe während der Flutung selbst abgedichtet hat oder zwangsgeflutet wurde, ob die Messung brauchbar war oder nicht, wenn nicht, warum nicht und sonstige für die Auswertung wichtige Beobachtungen. Jede Messung hat eine QV-Nr. (Quelldruckversuchsnummer), unter der sie im Laborinformationssystem mit weiteren Messdaten gespeichert ist. Für jede Messung liegen Datensätze vor, mit den im Minutentakt automatisch registrierten Werten von: Zeitpunkt der Messung, Druck (Gesamtdruck bestehend aus Lösungsdruck, Quelldruck und Kristallisationsdruck), ein- und ausgetretene Lösungsmenge und Temperatur. Aus jedem dieser Datensätze wurden für die weitere Auswertung die am Versuchsende registrierten Werte in die zusammenfassende Tab. 22 übernommen. Für eine bessere Übersicht bei der Auswertung wurden die Detailtabellen 6 bis 21 angelegt.

8.1 Quelldrücke bei Umgebungstemperaturen

8.1.1 Quelldruck parallel und senkrecht zur Einregelung

In der Regel wurde der Quelldruck parallel und senkrecht zur Einregelung gemessen (Bodendruck und Manteldruck). Generell sind die Werte senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) höher als parallel dazu (vgl. Abb. 8.1, 8.2, 8.8 und Abb. 8.9; Tab. 6 bis 20). Dieser Befund entspricht den Erwartungen. Die Quellung der Smektite erfolgt durch Wasseraufnahme in den Zwischenschichten, die Zwischenräume zwischen den TOT (Tetraeder-Oktaeder-Tetraeder)-Schichten werden größer. Bei der Kompaktion des Bentonits kommt es zu einer starken Einregelung der TOT-Schichten parallel zum Boden der Messzelle. Durch die Volumenvergrößerung während des Quelldruckversuchs wird der Druck bevorzugt auf den Bodendrucksensor ausgeübt. Dieser erfasst den Quelldruck senkrecht zur Einregelung. Der senkrecht dazu angebrachte Mantel-

drucksensor in der zylindrischen Messzelle erfasst vornehmlich das Aufquellen der weniger gut eingeregelteten Teilchen und ist entsprechend niedriger.

Für MX-80 mit IP21-Lösung bei der Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ liegen 14 Wiederholungsmessungen vor (Tab. 9). Der Bodendruck liegt im Mittel bei 11,0 bar und der Manteldruck bei 8,6 bar. Damit ist der Bodendruck um 22 % höher als der Manteldruck. Bei statistisch abgesicherten Ergebnissen, wie bei dieser Messreihe, zeigt sich auch, dass Bodendruckmessungen und Manteldruckmessungen mit ähnlichen Unsicherheiten behaftet sind. Bei dieser Messreihe liegt die relative Standardabweichung bei ca. 35 %. Die Messreihe MX-80, Dichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ und NaCl-Lösung ist durch 15 Wiederholungsmessungen belegt. Davon sind drei offensichtliche Ausreißer. Werden diese aus der Mittelwertbildung herausgelassen zeigt sich, dass der Bodendruck mit 10,1 bar um ca. 30 % höher liegt als der Manteldruck mit 7,5 bar. Die Standardabweichung des Bodendrucks liegt bei 29 % und die des Manteldrucks bei 47 %.

8.1.2 Quelldrücke bei unterschiedlichen Rohdichten

Mit steigender Einbaudichte steigt der Quelldruck. Dies gilt allgemein für alle Lösungen (Abb. 8.1 und 8.2, Tab. 6 bis 10). Das Aufweiten der Zwischenschichten der Montmorillonite im Bentonit führt zunächst zum Ausfüllen der Porenräume. Erst wenn die Volumenzunahme durch das Quellen nicht mehr in den Porenraum ausweichen kann, bildet sich bei konstantem Gesamtvolumen bei weiterem Quellen ein Druck aus. Dieser ist umso größer, je geringer der ursprüngliche freie Porenraum war. Der mit steigender Einbaudichte kleiner werdende Porenraum führt allerdings auch zu größeren Schwankungen der Quelldruck-Messwerte. Dies ist eine Folge der inhomogenen und unvollständigen Aufsättigung des Porenraums während des Versuchszeitraums. Mit steigender Rohdichte und gleich bleibenden Versuchszeiten nehmen diese Schwankungen zu.

Die Messungen (Abb. 8.1 und 8.2) zeigen, dass der Anstieg der Quelldrücke im Dichtebereich $1,55$ bis $1,7 \text{ g/cm}^3$ relativ flach verläuft, um dann zwischen $1,7$ und $1,8 \text{ g/cm}^3$ steil anzusteigen.

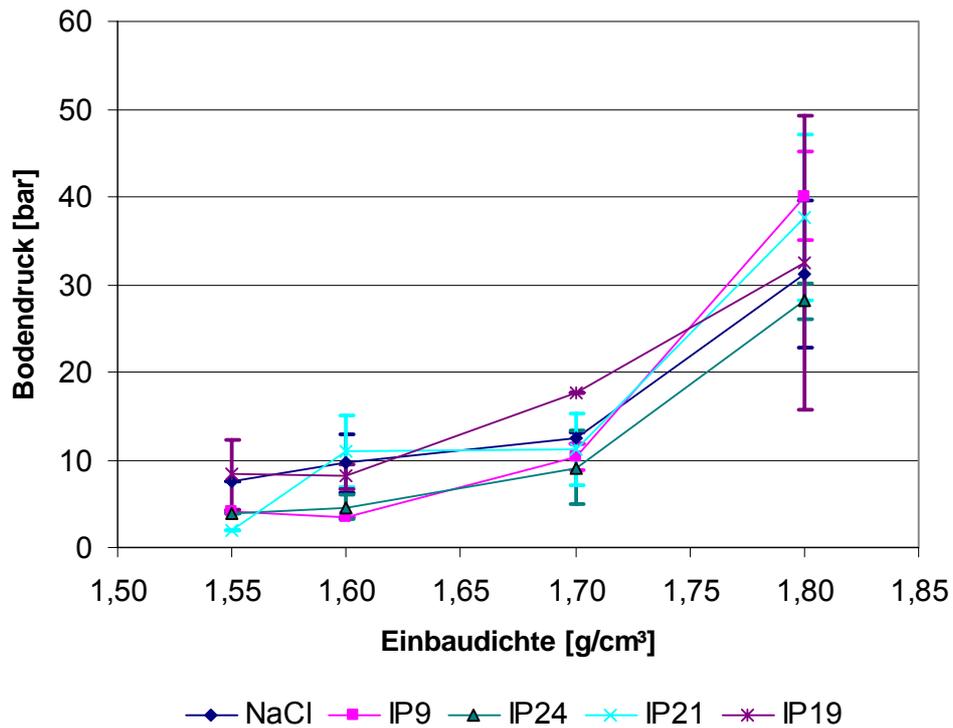


Abb. 8.1 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichten mit verschiedenen Salzlösungen bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Tab. 6 bis 10)

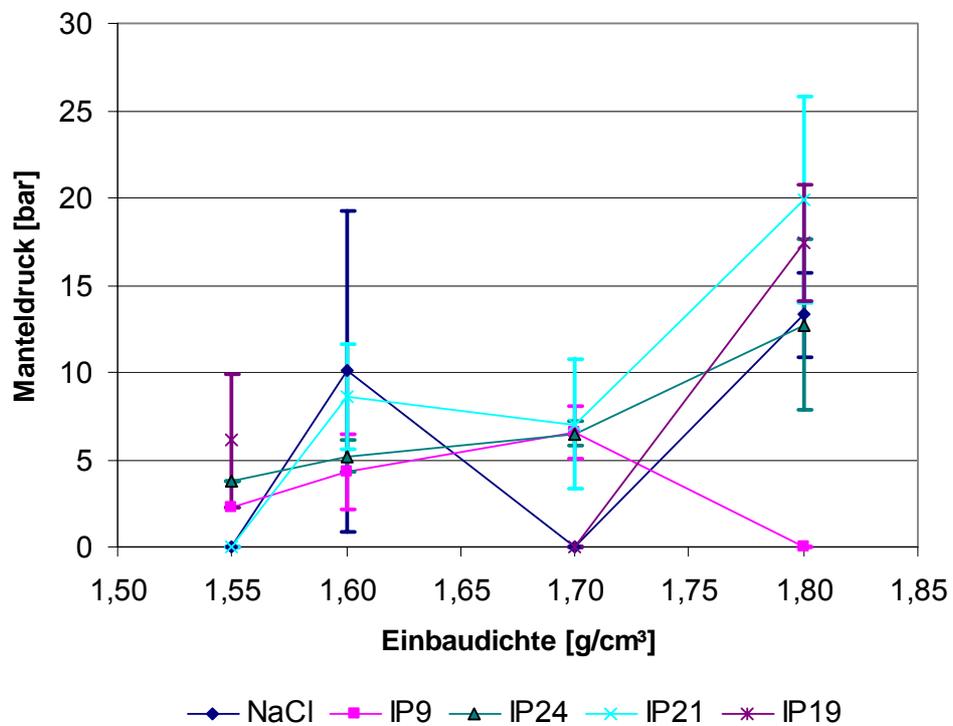


Abb. 8.2 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichten mit verschiedenen Salzlösungen bei Raumtemperatur, parallel zur Einregelung (Manteldruck, Tab. 6 bis 10)

8.1.3 Quelldrücke bei der Rohdichte 1,6 g/cm³

Bei den reinen Salzlösungen (NaCl-, IP9-, IP24-, IP21- und IP19-Lösung) liegt der Quelldruck mit IP21-Lösung mit 11,0 bar am höchsten. Fast gleich hoch ist der Quelldruck mit der chemisch völlig anders zusammengesetzten reinen NaCl-Lösung, nämlich bei 10,1 bar (jeweils Bodendruck, Tab. 9). Mittelt man alle Quelldrücke, die mit den Mg-reichen Lösungen IP21 und IP19 gemessen wurden, ergibt sich eine noch bessere Übereinstimmung mit dem Mittelwert der Messungen mit NaCl-Lösung. Die Erklärung dürfte folgende sein: Zwischen dem Na-Montmorillonit des MX-80 und der reinen NaCl-Lösung gibt es so gut wie keinen Ionenaustausch, da der Montmorillonit in den Zwischenschichten schon Na-belegt ist. Die Quellung geht also nicht auf den Eintrag neuer Ionen (mit ihren Hydrathüllen) in die Zwischenschichten zurück, sondern ist ausschließlich auf die Wasseraufnahme aus der Lösung zurückzuführen. Die IP21- und IP19-Lösungen dagegen sind sehr Mg-reich und führen zu einem intensiven Ionenaustausch mit dem Montmorillonit. Die Na-Ionen werden durch Mg-Ionen ausgetauscht. Mit den Mg-Ionen werden auch deren Hydrathüllen in die Zwischenschichten eingebaut, was zur deren Aufweitung führt. Die Auswertung der Kationenaustauschgleichgewichtsmessungen aus /HER02a/ hat zudem ergeben, dass zwischen Montmorillonit und diesen Lösungen ein nicht-ladungsäquivalenter Austausch erfolgt, was auf die Sorption von einwertigen Mg-Chlorokomplexen mit großem Volumen hinweist.

Dieses Beispiel zeigt, dass unterschiedliche Prozesse, ausgelöst durch unterschiedliche Lösungszusammensetzungen, zu gleichen Quelldrücken führen können.

Dies ist ein praxisrelevantes Ergebnis, weil diese beiden Lösungstypen praktisch die gesamte Spannweite der Na- und Mg-Gehalte natürlich auftretender Salzlösungen abdecken.

Während die Unterschiede zwischen den Quelldrücken mit reiner NaCl-Lösung und den komplex zusammengesetzten Mg-reichen Lösungen des Typs IP21 und IP19 kleiner sind als erwartet, zeigen sich bei den vier untersuchten hexären Salzlösungen die erwarteten Unterschiede in Abhängigkeit vom Chemismus. Die Lösungen IP9, IP24, IP21 und IP19 enthalten unterschiedliche Mengen Na, K, Ca, Mg, Cl und SO₄ (Tab. 4). Die Quelldrücke steigen von IP9 zu IP24, IP19 und IP21 an (Abb. 8.3 und 8.4). Dieser Anstieg ist in erster Linie auf den steigenden Mg-Gehalt zurückzuführen (Abb. 8.5). K setzt die Quellfähigkeit herab (Abb. 8.6). Entsprechend ist der Quelldruck in der K-freien NaCl-Lösung vergleichsweise hoch. Die Lösungen IP9 und IP24 haben niedrige

re Quelldrücke, weil sie hohe K-Gehalte und niedrige Mg-Gehalte haben. Im Allgemeinen gilt: niedrige K/Mg-Verhältnisse führen zu hohen Quelldrücken und umgekehrt (Abb. 8.7). Diesem Umstand sind die ersten drei Terme im von GRS vorgeschlagenen semi-empirischen Modell geschuldet.

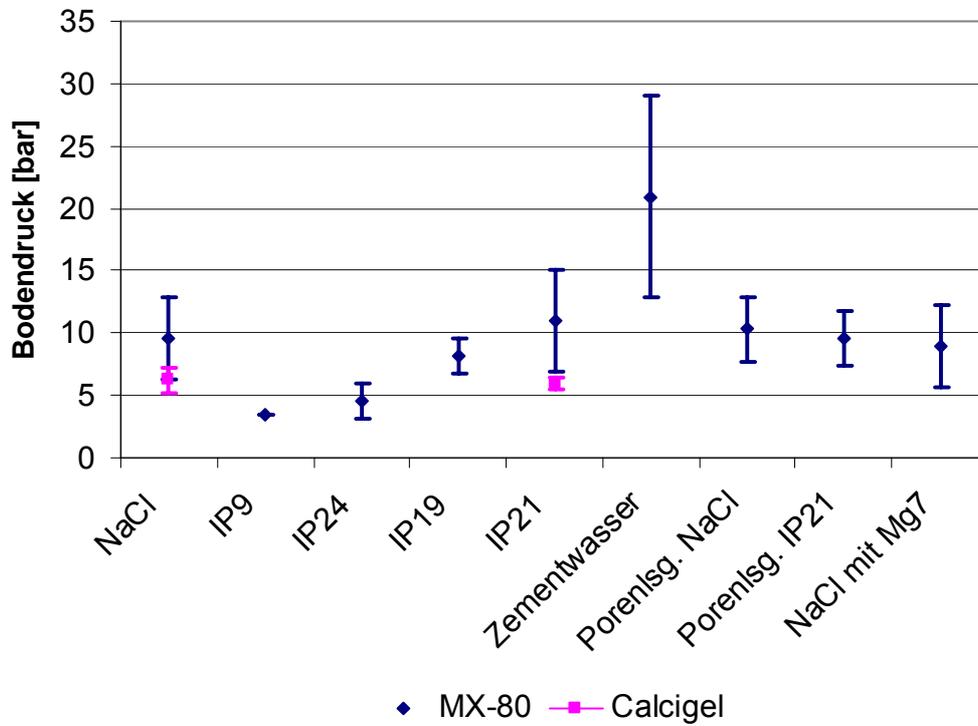


Abb. 8.3 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ für unterschiedliche Lösungszusammensetzungen bei Raumtemperatur (Tab. 6 bis 16) /MEY04/

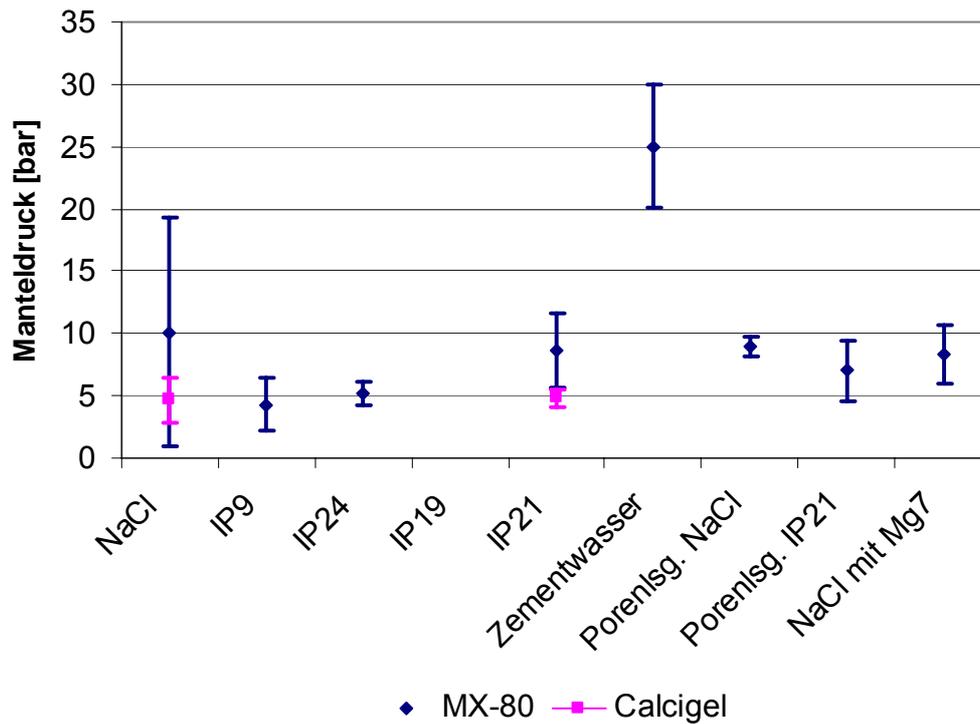


Abb. 8.4 Quelldrücke parallel zur Einregelung (Manteldruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ für unterschiedliche Lösungszusammensetzungen bei Raumtemperatur (Tab. 6 bis 16) /MEY04/

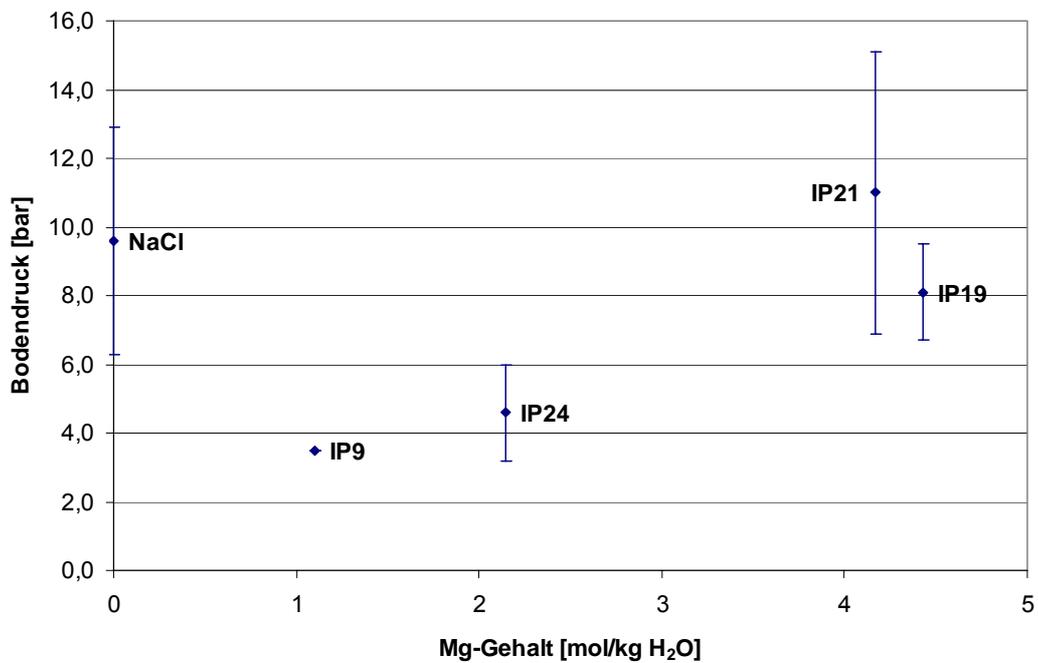


Abb. 8.5 Quelldruck von MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom Mg-Gehalt der Salzlösungen

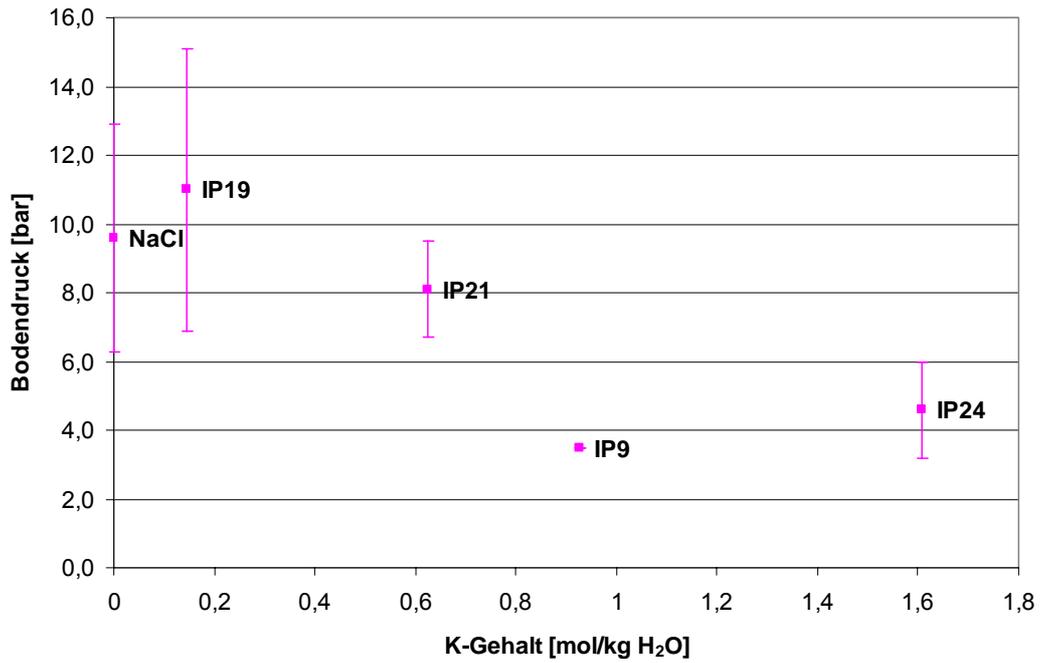


Abb. 8.6 Quelldruck von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ in Abhängigkeit vom K-Gehalt der Salzlösungen

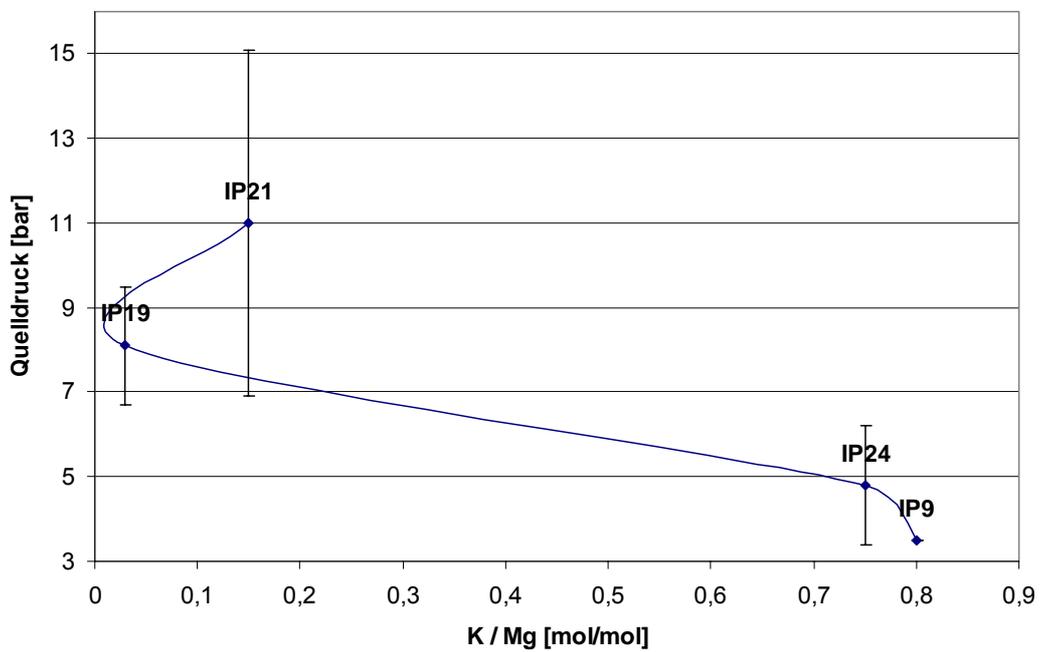


Abb. 8.7 Quelldruck von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ in Abhängigkeit vom K/Mg-Verhältnis der Salzlösung

8.2 Quelldrücke bei höheren pH-Werten

Der Einfluss von Lösungen mit höheren pH-Werten auf das Quellvermögen von Bentoniten wurde in den Projekten 02 C 0659 „Langzeitstabilität von Tondichtungen in Salzformationen“ /HER02b/ und 02 E 9461 ECOCLAY /MEY04/ untersucht. /HER 02b/ hat schnelle und starke mineralogische Veränderungen der Smektite bei längerem Kontakt (580 Tage) mit Zementkorrosionslösungen (IP21 + Salzbeton auf Portlandzementbasis und NaCl-Lösung + Salzbeton auf Portlandzementbasis) festgestellt. Diese Veränderungen führten zu einer starken Reduzierung der Wasseraufnahmekapazität der Bentonite im Vergleich zu den entsprechenden reinen Salzlösungen. Direkte Quelldruckmessungen waren nicht möglich, weil die Materialmengen dafür nicht ausreichten. Quelldruckmessungen haben /MEY03/ mit solchen Lösungen und MX-80 durchgeführt, allerdings nach Kontaktzeiten von nur wenigen Tagen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den Abb. 8.3 und 8.4 im Vergleich zu den Messungen mit reinen Salzlösungen dargestellt. Die verwendeten Lösungen sind in Kapitel 6.2 und Tab. 4 beschrieben. Das Zementwasser hat den höchsten pH-Wert, 13,2. Es ist eine junge Portlandit-gesättigte Porenlösung aus einem Portlandzement. Sie enthält nur Na-, K-, Ca- und OH-Ionen. Die anderen „Zementlösungen“ (Porenlösung NaCl, Porenlösung IP21 und NaCl-Mg7) sind Reaktionslösungen von NaCl- und IP21-Lösung im Kontakt zu Salzbeton und Magnesiabinder. Sie enthalten alle Ionen des hexären Systems und haben erhöhte pH-Werte.

Die Quelldrücke mit Zementwasser liegen bei über 20 bar (Bodendruck) und damit doppelt so hoch wie die Quelldrücke mit Salzbetonkorrosionslösungen. Der Grund für diese vergleichsweise hohen Quelldrücke, die allerdings auch stark schwanken, ist wohl darin zu sehen, dass das Zementwasser nur geringe Mengen von Na und K enthält. Im Kontakt mit dieser Lösung wird aus dem Na-Montmorillonit bei ausreichendem K-Angebot ein K-Montmorillonit. Wenn nur ausgelaugtes K vorlag, war es vermutlich sehr wenig K. In diesem Fall entsteht aber auch kein „K-Bentonit“. Von einem solchen spricht man, wenn alle Ionenaustauschplätze quantitativ mit K und mit nichts anderem belegt sind. Insgesamt ist das Zementwasser ein fast „reines“ Wasser und Wasser führt von allen Lösungen zum höchsten Quelldruck.

Die Quelldrücke mit den Korrosionslösungen liegen unabhängig von ihrem Chemismus nahe zusammen, um 10 bar, und damit in der gleichen Größenordnung wie die Quelldrücke mit reiner NaCl-Lösung und den Mg-reichen Salzlösungen. Bei kurzen Kontaktzeiten wirkt sich der erhöhte pH-Wert also noch nicht negativ auf den Quelldruck aus.

Ob dies auch nach längeren Kontaktzeiten so bleibt, wird z. Z. im EU-Projekt NF-PRO untersucht.

8.3 Quelldrücke bei erhöhten Temperaturen

Bei den Quelldruckversuchen, die bei 70 und 75 °C in einem Wärmeschrank gemessen wurden, traten keine prinzipiellen Probleme auf. Die Handhabung war genauso wie bei den Versuchen bei Raumtemperatur. Es kam aber häufig zu Leitungsverstopfungen, die zum Abbruch der Messungen führten. Messungen waren möglich, aber sehr zeitaufwendig. Darum liegen auch nur wenige verwertbare Ergebnisse vor.

Mit NaCl-Lösung (mit MX-80, Dichte 1,6 g/cm³) liegen bei 70 °C vier Messungen vor. Der Mittelwert liegt bei 13,0 bar und damit deutlich über den 9,6 bar bei Raumtemperatur. Die beschriebenen Probleme mit der Porenraumsättigung verstärken sich bei höheren Temperaturen noch, entsprechend ist auch die Standardabweichung mit 57 % fast doppelt so hoch wie bei den Messungen bei Raumtemperatur. Mit IP21 gibt es nur jeweils einen Messwert bei 70 und 75 °C. Diese liegen sehr nahe beieinander und dürften zuverlässig sein. Mit den anderen Lösungen wurden keine Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.8 und in Tab. 19, 20 und 22 dargestellt. Die Beobachtung, dass der Quelldruck mit Mg-reichen Lösungen (IP21) etwas höher liegt, als mit reiner NaCl-Lösung, bestätigt sich auch bei 70 °C. Bei höheren Temperaturen wird dieser Trend scheinbar noch verstärkt.

Bei 120 °C traten größere Schwierigkeiten auf. Die bei Raumtemperatur verwendeten Peak-Leitungen hielten dem Lösungsdruck von 100 bar unter den erhöhten Temperaturen nicht stand. Zunächst wurden die Peak-Leitungen durch Stahlkapillaren ersetzt. Diese korrodierten jedoch innerhalb von wenigen Tagen durch und platzten. Erst nach dem Einsatz von Titankapillaren konnte der Druck bei 120 °C gehalten werden.

Nach Abschalten des Fluidrucks am Ende der Flutungsphase zeigten die Druckaufnehmer innerhalb kürzester Zeit 0 bar an. Dies ist auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Titan (Reaktionszelle) und Druckaufnehmer (Körper aus Stahl, Membran aus Hastelloy) zurückzuführen. Diese Effekte hatten offenbar einen höheren Einfluss auf den Druckmesser, als Quellung und Kristallisation bei 120 °C.

Damit muss festgestellt werden, dass Quelldruckmessungen mit Salzlösungen bei 120 °C noch nicht möglich sind. GRS arbeitet allerdings weiter an der Lösung des Problems.

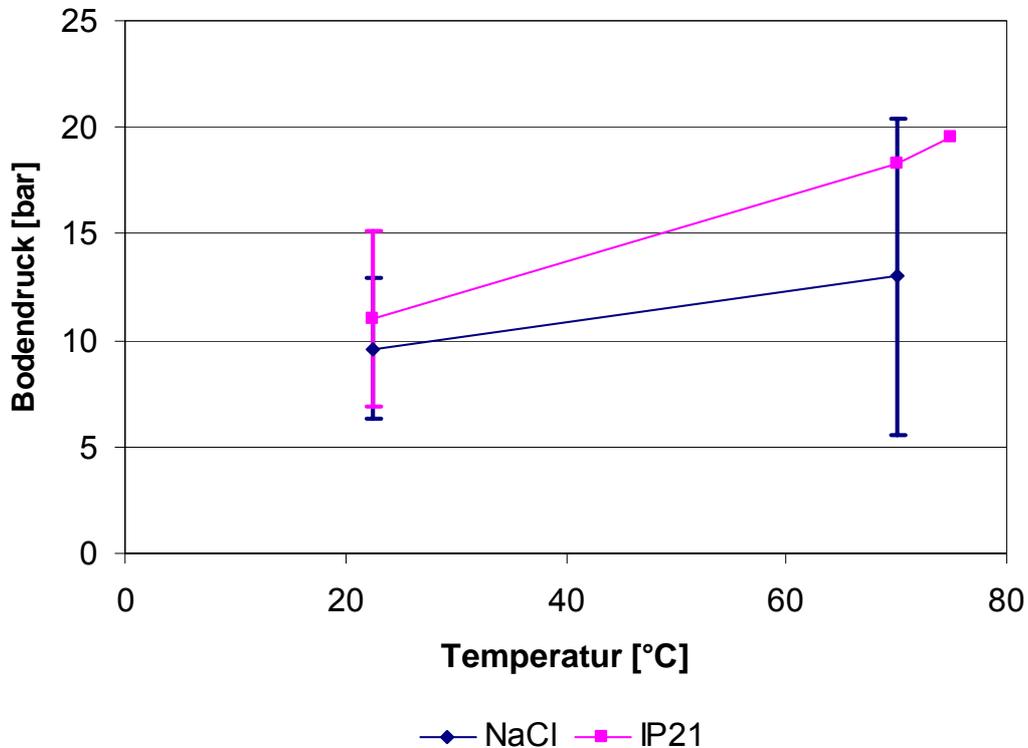


Abb. 8.8 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für NaCl- und IP21-Lösung bei Raumtemperatur und 70 °C (Tab. 18 bis 20)

8.4 Quelldrücke in Abhängigkeit von Probengröße und Probenform

Um den Einfluss von Probengröße und Probengeometrie auf den Quelldruck zu ermitteln, wurden einige Versuche mit einer großen zylindrischen und einer quaderförmigen Zelle mit mehr Probenmaterial, mit NaCl- und IP21-Lösung, unter ansonsten gleichen Randbedingungen wiederholt. Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, wurden in der kleinen Zelle 75 g Bentonit eingesetzt und auf eine Rohdichte von 1,6 g/cm³ verdichtet. In der großen zylindrischen Zelle und in der quaderförmigen Zelle wurden jeweils 3356,2 g Bentonit eingesetzt und auch auf 1,6 g/cm³ verdichtet. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.9 und 8.10 dargestellt.

Auffällig ist, dass die Schwankungsbreiten der Mittelwerte bei Calcigel immer deutlich kleiner sind als bei MX-80. Dies ist ein Hinweis darauf, dass mit Calcigel unter gleichen Randbedingungen der Probenherstellung und Flutung eine gleichförmigere und bessere Aufsättigung erreichbar ist. Auch dies ist ein praxisrelevantes Ergebnis: **Der in Deutschland hergestellte, wesentlich billigere Calcigel ist besser prognostizierbar.**

Die Messwerte zeigen, dass der Quelldruck von Calcigel nicht wesentlich von der Probengeometrie und Probengröße abhängig ist. Die Werte sind innerhalb der Messgenauigkeit praktisch gleich. Auch bei den Messungen mit größeren Proben und anderer Geometrie ist der Bodendruck immer höher, als der Manteldruck.

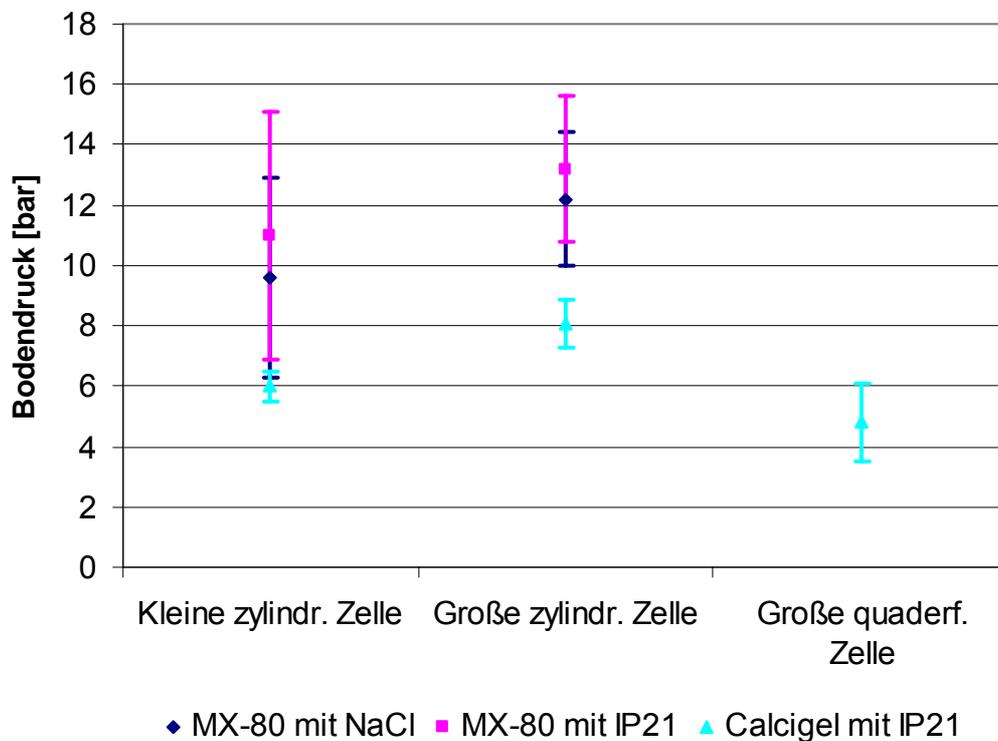


Abb. 8.9 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und/oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Tab. 17 und 18)

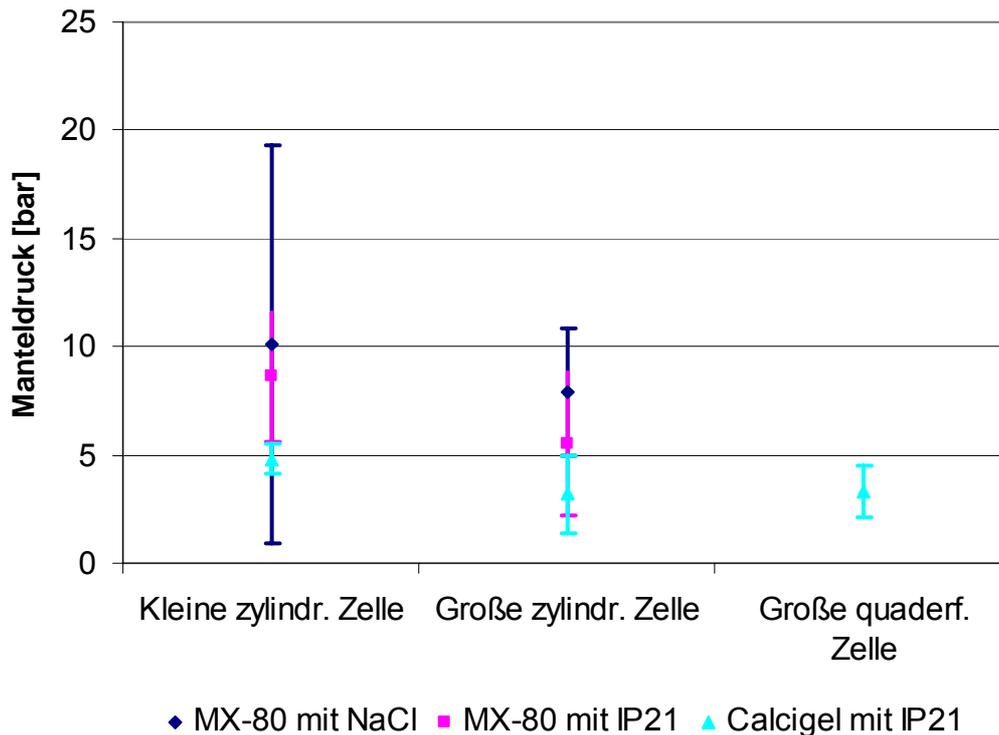


Abb. 8.10 Quelldrücke parallel zur Einregelung (Manteldruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und/oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Tab. 17 und 18).

8.5 Quelldrücke in Abhängigkeit vom Messverfahren

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, unterscheiden sich die Quelldruckmessverfahren hinsichtlich des eingeschlagenen Weges, um zu Quelldruckwerten bei einem Lösungsdruck Null zu gelangen. Einige Verfahren erreichen das Ziel, indem sie die Aufsättigung drucklos durchführen, wie z.B. das UPC-Verfahren bei dem nur die Poren aufgesättigt werden, die sich drucklos aufsättigen lassen. Andere Verfahren, wie das Freiburger und das GRS-Verfahren, sättigen den Porenraum mit Lösungsdruck auf und gelangen durch Extrapolation (Freiberger Verfahren) oder durch Abstellen des Lösungsdrucks (GRS-Verfahren) zu den gewünschten Quelldrücken, die dann miteinander vergleichbar und im Idealfall identisch sein sollten.

Ein direkter Vergleich der Mess-Ergebnisse der drei Verfahren ist nur bedingt möglich. Mit dem GRS-Verfahren liegen weit über 200 Messwerte mit unterschiedlichsten Salzlösungen, einschließlich Wasser, vor. Für jede Lösung wurden mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Streuungen bzw. Standardabweichungen wurden

dokumentiert. Dies ist für keines der andern Verfahren bisher in gleichem Umfang geschehen. Einzelmesswerte mit bestimmten Lösungen mit dem Freiburger Verfahren liegen innerhalb der Streubreite der Messungen mit dem GRS-Verfahren. Mehr Messungen mit dem sehr zeitaufwendigen Freiburger Verfahren waren nicht möglich. Es bot sich allerdings an, einige der GRS-Messungen mit dem UCB-Verfahren zu wiederholen. Es wurden 10 Calcigel-Sand-Gemische mit Wasser in der UPC-Messzelle untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.11 und Tab. 21 dargestellt. Es zeigte sich, dass die Ergebnisse der Uni Weimar mit identischen Proben unter gleichen Randbedingungen gut reproduziert werden konnten. Auch hier gibt es allerdings bei 10 Wiederholungsmessungen Ausreißer, die insgesamt zu einer Standardabweichung führen, die nicht kleiner ist als mit dem GRS-Verfahren. Mit dem UPC-Verfahren wurden auch 5 Messungen mit MX-80 Sandgemischen durchgeführt. Dabei wurden alle Parameter identisch gehalten. Es zeigt sich (Abb. 8.12), dass zwei der fünf Messungen völlig aus dem Rahmen fallen. Eine plausible Ursache dafür konnte bisher nicht gefunden werden. Solche Schwierigkeiten dürften sich noch vergrößern, wenn mit reinem MX-80 (ohne Sandzusatz) und mit Salzlösungen (nicht mit Wasser) gearbeitet wird. Das pauschale Urteil der Arbeitsgruppe um Prof. Schanz aus Weimar, Messungen mit dem UPC-Verfahren seien reproduzierbarer als mit dem GRS-Verfahren, ist also nicht haltbar. Schwankungen von Quelldrücken, die in der GRS gemessen wurden, sind vielmehr vornehmlich auf zwei Gründe zurückzuführen: die Einstellung realistischer Bedingungen (gesättigte Salzlösungen, Flutungsregime) sowie die Tatsache, dass Messwertschwankungen dokumentiert wurden.

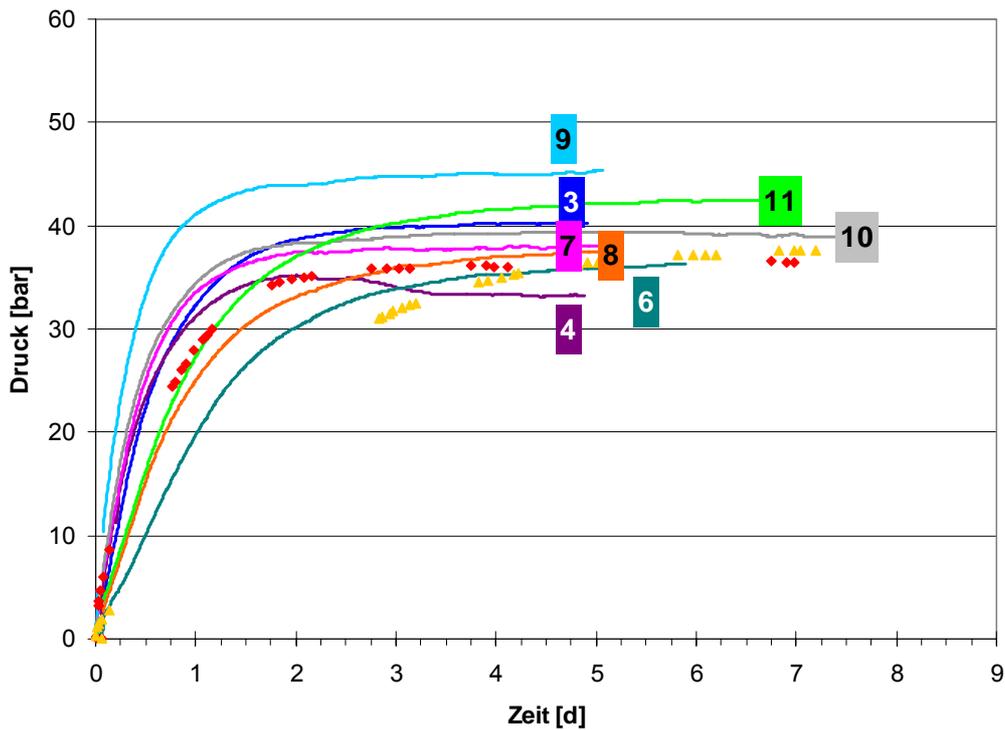


Abb. 8.11 Quelldruckmessungen an Calcigel-Sandgemischen (1:1) mit der UPC-Messzelle bei druckloser Aufsättigung des Porenraums (Tab. 21)

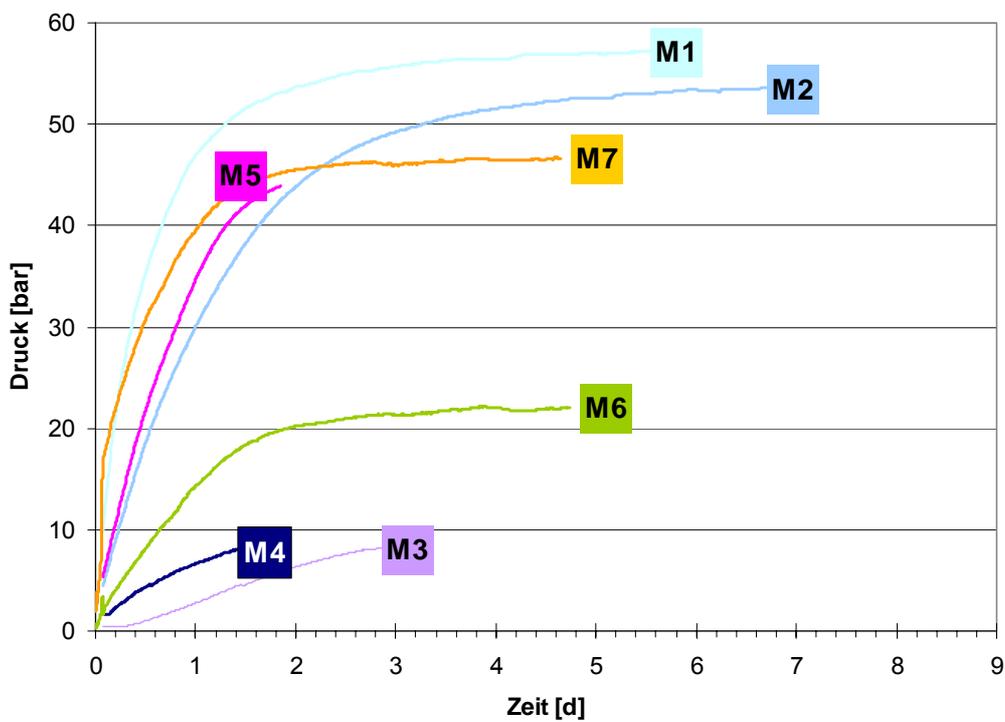


Abb. 8.12 Quelldruckmessungen an MX-80-Sandgemischen (1:1) mit der UPC-Messzelle bei druckloser Sättigung des Porenraums (Tab. 21)

9 Diskussion der Ergebnisse

Vor allem der Umstand, dass manche Proben selbst abgedichtet haben, und manche nicht, führt zu den beobachteten Inhomogenitäten bei der Aufsättigung des Porenraums und macht eine Interpretation schwierig. Denn in den Fällen, in denen Proben nicht abgedichtet haben, wurde mit geschlossenem Ausgangsventil weitere Lösung in den Probekörper gedrückt, bis der voreingestellte Maximaldruck der HPLC-Pumpe erreicht war. Die darauf folgende Wartezeit bis zum Abbruch des Versuches ist willkürlich, während durch die Selbstabdichtung der Probe die Masse an gebundener Lösung versuchsbedingt entsteht. Eine vollständige und homogene Flutung des Porenraums, die allein eine maximale Quellung mit einer vorgegebenen Lösung bei gegebener Rohdichte garantiert, wurde in den seltensten Fällen erreicht. Dies erklärt die Schwankungsbreiten der Messwerte.

Die unbefriedigende Reproduzierbarkeit der Quelldruckversuche soll zum Anlass genommen werden, auf die Unterschiede hinzuweisen, die bei einer Anströmung von Ton mit Wasser oder mit gesättigter Salzlösung auftreten. Der direkte Kontakt mit wässriger salinärer Lösung ist als eigentlicher Störfall zu betrachten, der im Falle eines Lösungszutritts in den Nahbereich eines Endlagers für gefährliche Abfälle zu betrachten ist.

Der auch mit gesättigter Salzlösung beobachteten Quellung eines Tons geht die Aufnahme von Wasser aus der wässrigen Phase voraus. Handelt es sich bei der anstehenden Lösung um eine gesättigte Lösung, folgt unweigerlich die Ausfällung von Salzen. Abb. 9.1 illustriert die Genese fester Phasen, die durch Eindunstung (rechnerisch Entzug von Wasser in jedem Rechenschritt) entstehen.

Herkömmliche THM-Stoffgesetze beziehen sich auf Bentonit-Sandgemische; ein Bentonit-Sand-Gemisch, welches mit IP21-Lösung reagiert hat, wird jedoch in erheblichem Ausmaß durch die Bildung von Halit, Carnallit, und Bischoffit beeinflusst. Die Ausbildung dieser neuen, festen, kristallinen Phasen wirkt sich unmittelbar auf die hydraulischen Eigenschaften des betroffenen Porenraums aus, fügt dem Quelldruck einen Kristallisationsdruck hinzu und ändert auch die mechanischen Eigenschaften des durchströmten Körpers.

Die mangelnde Reproduzierbarkeit der Versuche kann damit zu tun haben, dass die Wasseraufnahme aus der gesättigten Lösung nicht instantan, sondern mit einer vom

lokalen Kompaktionsgrad abhängigen Geschwindigkeit erfolgt. Die Menge an Lösung, die notwendig war, um die Probe abzudichten, wurde damit durch Eigenschaften der Matrix beeinflusst, die einer statistischen Variation unterliegen. Ferner folgt auch die Kristallisation der genannten Mineralphasen (insbesondere Bischoffit und Carnallit) einer jeweils eigenen Kinetik, die mit der lokalen Übersättigung zusammenhängt.

Kein einzelnes Glied dieser Interpretation ist in sich unplausibel: der „trockene“ Bentonit nimmt Wasser auf, der Entzug von Wasser aus einer gesättigten Salzlösung wird zu Ausfällungen führen, und diese Ausfällungen werden hydraulische und mechanische Eigenschaften des Probekörpers beeinflussen. Problematisch ist aber, dass man den „Gleichgewichtsquelldruck“ sucht, die zu diesem Druck führenden Prozesse aber nicht instantan, sondern mit einer durch statistisch variierende Eigenschaften der Matrix beeinflussten Kinetik erfolgen (Transportgeschwindigkeit im sich ändernden Porenraum, Wasseraufnahme, Ausfällungen ...). Ebenso wie bei „einfachen“ Salzlöseprozessen, wie etwa der Bildung des thermodynamisch eigentlich nicht stabilen Pentahydrats bei der Wechselwirkung von selbstverheilendem Versatz mit NaCl-Lösung, beobachtet man bei der Flutung von kompaktiertem Bentonit eine Abfolge von Nicht-Gleichgewichtszuständen. Diese Entwicklung kann, muß aber nicht bis zu einem thermodynamischen Gleichgewicht führen. Sie kommt oft bereits in einem sog. stationären Gleichgewichtszustand zum Stillstand.

Aus den gesammelten Erfahrungen im Umgang mit kompaktierten Bentoniten und Salzlösungen ergibt sich, dass es der sehr genauen Einhaltung von Vorschriften über die Vorbehandlung des Bentonits, seiner Kompaktion, der Trockendichten und der Flutung des Porenraumes mit Lösung bedarf, um prognostizierbare Ergebnisse zu erhalten. Die Variation eines der genannten Versuchsparameter kann bereits zu starken Verfälschungen der Ergebnisse führen. Der quantitative Einfluss, den etwa die Art der Kompaktion des Bentonits über seine Mikrostruktur auf den Quelldruck nimmt, ist nicht bekannt. Insofern ist es nach einem einmaligen Kalibrationsversuch schwer zu sagen, ob eine mangelnde Übereinstimmung der Messdaten mit dem Modell mit einer falschen Annahme im Modell oder einem "fehlerhaften" Experiment zu begründen ist. Ferner muss davon ausgegangen werden, dass die genannten Vorschriften bei der Herstellung eines Probekörpers auch die mechanischen Eigenschaften desselben tangieren werden.

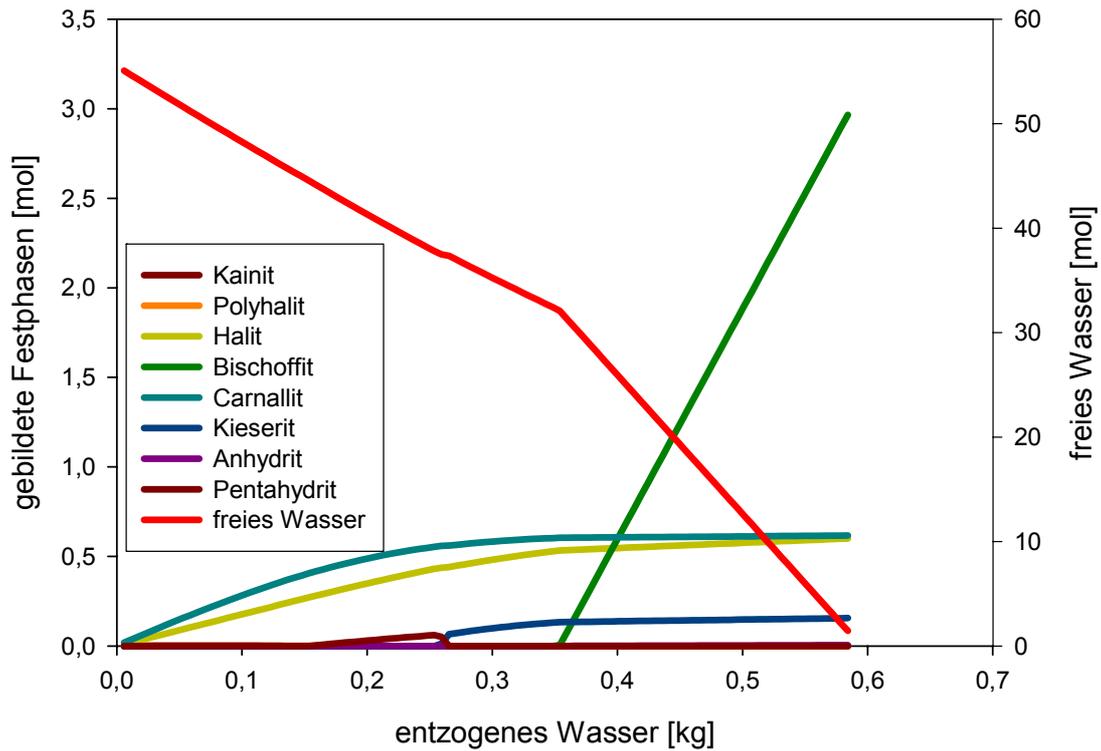


Abb. 9.1 Bildung fester Phasen als Folge des Wasserentzugs und/oder bei der Eindunstung einer IP21-Lösung

Die mangelnde Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gestattet es nicht, das angestrebte Modell zur Berechnung des Quelldrucks in Abhängigkeit von der Lösungszusammensetzung aufzustellen.

Trotzdem hat die Vielzahl der Messungen durchaus verwertbare und praxisrelevante Ergebnisse erbracht:

- Bentonite quellen in einem gewissen Umfang auch mit Salzlösungen
- Unterschiedliche Prozesse, ausgelöst durch unterschiedliche Lösungszusammensetzungen, können zu gleichen Quelldrücken führen.
- Die Unterschiede zwischen den Quelldrücken mit unterschiedlichen salinaren Lösungen sind vernachlässigbar klein
- Die Eigenschaften des in Deutschland hergestellten, wesentlich billigeren Calcigels sind besser prognostizierbar.

Last but not least: zurzeit gibt es keine bessere Quelldruckmessmethode. GRS arbeitet weiter an einer Verbesserung der Methodik. Aus praktischer Sicht liegen die wichtigs-

ten Informationen zum Verhalten von kompaktierten Bentoniten in Salzformationen vor und sind belastbar. In der Praxis können Randbedingungen nicht besser eingehalten werden als im Labor. Die in diesem Vorhaben dokumentierten Mittelwerte und Schwankungen der Quelldrücke sollten für Berechnungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen verwendet werden.

Literatur

- /BUC89/ Bucher, F.; Müller-Vonmoos, M. (1989): Bentonite as a containment barrier for the disposal of highly radioactive wastes, *Appl. Clay Sci.* (4), 157-177
- /CEB81/ Cebula, D. J.; Thomas R. K.; White, J. W. (1981): Diffusion of water in Li-montmorillonite studied by quasielastic neutron scattering, *Clays and Clay Minerals* (29), 241
- /CHA13/ Chapman, D. L. (1913): A contribution to the theory of electrocapillarity. *Philos. Mag.* 25, No. 6, 475-481
- /COL86/ Colten, V. A. (1986): Hydration states of smectite in NaCl brines at elevated pressures and temperatures, *Clays Clay Min.* (34,4), 385-389
- /ELS67/ El-Swaify, S. A.; Henderson, D. W. (1967): Water retention by osmotic swelling of certain colloidal clays with varying ionic composition, *J. Soil Sci.* (18), 223-232
- /GOU10/ Gouy, G. (1910): Electric charge on the surface of an electrolyte. *J. Phys.* 4, No.9, 457
- /GRU05/ Gruner, M.; Sitz, P.; Herbert, H.-J.; Moog, H.; Kolditz, O.; Schanz, T. (2005): Schlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben Experimentelle und numerische Untersuchungen des Langzeitverhaltens von Abschlussbauwerken im Salinar mit Bentonitgemischen als Dichtelement.- Förderkennzeichen 02 C 0881
- /HAW80/ Hawkins, R. K.; Egelstaff, P. A. (1980): Interfacial water structure in montmorillonite from neutron diffraction experiments, *Clays and Clay Minerals* (28), 19
- /HER99/ Herbert, H.-J.; Moog, H. C. (1999): Cation exchange, interlayer spacing and water content of MX-80 bentonite in high molar saline solutions, *Engineering Geology* 54, 55-65

- /MÜL 83/ Müller-Vonmoos, M.; Kahr, G. (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel.- Nagra, NTB 83-12
- /PEZ67/ Pézérat, H; Méring, J. (1967): Recherches sur la position des cations échangeables et de l'eau dans les montmorillonites, Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris) (265), 529
- /PRO75/ Prost, R. (1975): Étude de l'hydratation des argiles: Interactions eau-minérale et mécanisme de la rétention de l'eau. B: d'une smectite (hectorite), Ann. Agron. (26), 463
- /PUS99/ Pusch, R.; Muurinen, A.; Lehtikoinen, J.; Bors, J.; Eriksen, T, et al. (1999): Microstructural and chemical parameters of bentonite as determinants of waste isolation efficiency, Nuclear science and technology EUR 18950 EN, 121S
- /SCH92/ Schmidt, W.; Sitz, P.; Kessler, J. (1992): Physikalische und chemische Eigenschaften von Bentonit als Verfüll- und Versiegelungsmaterial bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, Nagra, Technical Report (93-37)
- /SPO84/ Sposito, G. (1984): The surface chemistry of soils, Oxford University Press, p. 154ff
- /YON90/ Yong, R. N.; Mohamed, A. M. O.; Cheung, S. C. H. (1990): Thermal behaviour of backfill materials for a nuclear fuel waste disposal vault, Mat Res. Symp. Proc. Vol 176, 649 – 656
- /ZHA93/ Zhang, F.; Zhang, Z. Z.; Low, P. F.; Roth, C. B. (1993): The effect of temperature on the swelling of montmorillonite, Clay Min. (28), 25-31

Abbildungsverzeichnis

Abb. 6.1	Quelldruckapparaturen des Institutes für Bergbau der TUBAF. Links die erste Ausführung von 1993, rechts die weiterentwickelte Ausführung von 1995	21
Abb. 6.2	Prinzipskizze der Quelldruckapparatur der TU BAF	21
Abb. 6.3	Aufbau der zylindrischen GRS-Quelldruckmesszelle	23
Abb. 6.4	Prinzipskizze der quaderförmigen GRS-Quelldruckmesszelle	24
Abb. 6.5	Prinzipskizze eines GRS-Quelldruckmessstandes mit einer einzelnen Messzelle	25
Abb. 6.6	GRS-Quelldruckmessstand mit drei Typen von GRS-Messzellen (unten links: quaderförmige Zelle, unten Mitte: große zylindrische Zelle, unten rechts: kleine zylindrische Zelle), Waagen (Mitte) und HPLC-Pumpen (oben)	25
Abb. 6.7	Kleine zylindrische Zelle aus Titan in einem Wärmeschrank zur Messung von Quelldrücken bei erhöhten Temperaturen	26
Abb. 6.8	Beispiel einer Quelldruckmessung mit dem GRS-Verfahren	28
Abb. 6.9	Prinzipskizze und Foto der Messzelle der Universidad Politéchnica de Cataluña, Barcelona (UPC) zur Messung von Quelldrücken mit druckloser Aufsättigung des Porenraums	30
Abb. 6.10	Prinzipskizze des Quelldruckmessstandes mit der UPC-Messzelle	30
Abb. 7.1	Gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben unterschiedlicher Einbau-dichten am Ende der Quelldruckmessungen mit unterschiedlichen Salz-lösungen (Tab. 6 bis 10, 22)	33
Abb. 7.2	Gebundene Lösungsmenge in MX-80 Proben mit verschiedenen Lösungen, sowie von Calcigel Proben mit NaCl- und IP21-Lösung, Rohdichte 1,6 g/cm ³ (Tab. 6 bis 16, 22)	34
Abb. 7.3	Normierte gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben mit NaCl- und IP21-Lösung sowie in Calcigel-Proben mit IP21-Lösung, jeweils Rohdichte 1,6 g/cm ³ , in Abhängigkeit von der Probengröße und Probengeometrie am Ende der Quelldruckmessungen (Tab. 17, 18, 22)	35

Abb. 7.4	Gebundene Lösungsmenge in MX-80-Proben der Dichte 1,6 g/cm ³ mit NaCl- und IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen in Abhängigkeit von der Temperatur (Tab. 19, 20, 22)	36
Abb. 7.5	Entwicklung der aufgenommenen Lösungsmenge während der Quelldruckversuche am Beispiel der Probe QV 098, MX-80, Dichte 1,6 g/cm ³ mit NaCl-Lösung.....	37
Abb. 7.6	Chloridverteilung in MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm ³ [QV 215], 1,60 g/cm ³ [QV 201], 1,7 g/cm ³ [QV 203] und 1,80 g/cm ³ [QV 206, 212] mit NaCl-Lösung am Ende der Quelldruckmessung an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5).....	40
Abb. 7.7	Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm ³ [QV 210], 1,6 g/cm ³ [QV 197] und 1,7 g/cm ³ [QV 195, 204] mit IP21-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)	42
Abb. 7.8	Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm ³ [QV 210], 1,6 g/cm ³ [QV 197], 1,7 g/cm ³ [QV 202] und 1,8 g/cm ³ [QV 207] mit IP19-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5)	44
Abb. 7.9	Chloridverteilung in drei MX80 Proben der Rohdichte 1,55 g/cm ³ [QV 211], 1,6 g/cm ³ [QV 196], 1,7 g/cm ³ [QV 199] und 1,8 g/cm ³ [QV 209] mit IP9-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5).....	46
Abb. 7.10	Chloridverteilung in drei MX-80-Proben der Rohdichte 1,55 g/cm ³ [QV 214], 1,6 g/cm ³ [QV 208] und 1,7 g/cm ³ [QV 200] mit IP24-Lösung am Ende der Quelldruckmessungen an sechs Stellen jeder Probe (Tab. 5).....	48
Abb. 7.11	XRD-Messungen der Zwischenschichtabstände an Montmorilloniten aus MX-80-Bentoniten der Rohdichte 1,6 g/cm ³ mit unterschiedlichen Salzlösungen am Ende der Quelldruckmessungen	49
Abb. 8.1	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichten mit verschiedenen Salzlösungen bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Tab. 6 bis 10).....	53

Abb. 8.2	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichten mit verschiedenen Salzlösungen bei Raumtemperatur, parallel zur Einregelung (Manteldruck, Tab. 6 bis 10).....	53
Abb. 8.3	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ für unterschiedliche Lösungszusammensetzungen bei Raumtemperatur (Tab. 6 bis 16) /MEY04/ ...	55
Abb. 8.4	Quelldrücke parallel zur Einregelung (Manteldruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ für unterschiedliche Lösungszusammensetzungen bei Raumtemperatur (Tab. 6 bis 16) /MEY04/.....	56
Abb. 8.5	Quelldruck von MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom Mg-Gehalt der Salzlösungen.....	56
Abb. 8.6	Quelldruck von MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom K-Gehalt der Salzlösungen	57
Abb. 8.7	Quelldruck von MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom K/Mg-Verhältnis der Salzlösung	57
Abb. 8.8	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ für NaCl- und IP21-Lösung bei Raumtemperatur und $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tab. 18 bis 20)	60
Abb. 8.9	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und/oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Tab. 17 und 18).....	61
Abb. 8.10	Quelldrücke parallel zur Einregelung (Manteldruck) von MX-80 und Calcigel der Rohdichte $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit NaCl- und/oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Tab. 17 und 18).....	62
Abb. 8.11	Quelldruckmessungen an Calcigel-Sandgemischen (1:1) mit der UPC-Messzelle bei druckloser Aufsättigung des Porenraums (Tab. 21)	64
Abb. 8.12	Quelldruckmessungen an MX-80-Sandgemischen (1:1) mit der UPC-Messzelle bei druckloser Sättigung des Porenraums (Tab. 21).....	64

Abb. 9.1 Bildung fester Phasen als Folge des Wasserentzugs und/oder bei der
Eindunstung einer IP21-Lösung 67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Mineralbestand des MX-80 Bentonits	81
Tab. 2	Korngrößenverteilung im Calcigel	81
Tab. 3	Transmissionselektronenmikroskopische Differenzierung der Montmorillonite aus Calcigel	81
Tab. 4	Chemismus der im Versuchsprogramm eingesetzten Salzlösungen	82
Tab. 5	Daten zur Beurteilung der Homogenität der Lösungsverteilung in kompaktierten Bentoniten – Chloridgehalte an 6 Stellen zylindrischer Proben von 50 mm Durchmesser und 24,06 mm Höhe – in Abhängigkeit von der Rohdichte des Bentonits und der Lösungszusammensetzung.....	83
Tab. 6	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit NaCl-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22).....	84
Tab. 7	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP9-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22).....	85
Tab. 8	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP24-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22).....	85
Tab. 9	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP21-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22).....	86
Tab. 10	Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP19-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22).....	87

Tab. 11	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für Zementwasser bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)	88
Tab. 12	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für Porenlösung NaCl bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)	88
Tab. 13	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für Porenlösung IP21 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22).....	89
Tab. 14	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für NaCl mit Mg7 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22).....	89
Tab. 15	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für NaCl bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22).....	90
Tab. 16	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für IP21 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22).....	90
Tab. 17	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm ³ mit IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Abb. 7.3, 8.8, 8.9; Tab. 22).....	91
Tab. 18	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösungen) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ mit NaCl- oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Abb. 7.3, 8.8, 8.9; Tab. 22).....	92
Tab. 19	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für NaCl-Lösung bei Raumtemperatur und 70°C (Abb. 7.4, 8.5, 8.6; Tab. 22).....	93
Tab. 20	Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm ³ für IP21-Lösung bei Raumtemperatur, 70°C und 75°C (Abb. 7.4, 8.5, 8.6; Tab. 22).....	94

Tab. 21	Quelldruckmessungen von MX80- und Calcigel-Sand-Gemischen 1:1 mit Wasser in der UPC-Messzelle mit druckloser Aufsättigung des Porenraumes.....	94
Tab. 22	Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C).....	95

Anhang

Tab. 1 Mineralbestand des MX-80 Bentonits

Fraktion	KG-Anteil	Quarz	Albit	Calcit	Pyrit	Crist	Rest (Montm.+)
Gesamt	1,00	4 %	2 %	1 %	1 %	<2 %	Mo: ~ 85 %
> 63 µm	0,04	9 %	20 %	Ä	1 %	Ä	Mu+Mo: 70 %
20 – 63 µm	0,03	10 %	15 %	Ä	< 1 %	Ä	III+Chl+Mo: 75 %
6,3 – 20 µm	0,05	14 %	7 %	Ä	2 %	Cris+III+Mu: 75 %	
2 – 6,3 µm	0,04	6 %	2 %	1 %	1 %	5 %	III+Mo: 85 %
< 2 µm	0,84	2 %	Ä	< 2 %	Ä	< 2 %	90 %

Tab. 2 Korngrößenverteilung im Calcigel

	> 63 µm	63 - 20 µm	20 - 6,3 µm	6,3 - 2 µm	< 2 µm
In diesem Vorhaben eingesetzter Calcigel	5	8	14,6	16,7	55,5
/MAD98/	1,3	3,9	6,5	3,5	77,6

Tab. 3 Transmissionselektronenmikroskopische Differenzierung der Montmorillonite aus Calcigel

Morphologischer Typ	Xenomorphe Blättchen/Flocken	Matrix
Elektronenbeugung	zumeist schwach kristallin und turbostratisch	zumeist schwach kristallin und turbostratisch
„Phäno“-Montmorillonit (Si-Überschuss)		
„low charge“	XII: $\text{Ca}_{0,078} \text{Na}_{0,085} \text{K}_{0,073}$ VI: $\text{Al}_{1,45} \text{Fe}_{3+0,25} \text{Mg}_{0,32}$	XII: $\text{Ca}_{0,068} \text{Na}_{0,145} \text{K}_{0,16}$ VI: $\text{Al}_{1,39} \text{Fe}_{3+0,24} \text{Mg}_{0,34}$
Montmorillonit		
„low charge“	$(\text{Ca}_{0,063} \text{Na}_{0,11} \text{K}_{0,10}) (\text{Al}_{1,40} \text{Fe}_{3+0,25} \text{Mg}_{0,38}) ((\text{OH})_2 \text{Al}_{0,05} \text{Si}_{3,95} \text{O}_{10})$	

Tab. 4 Chemismus der im Versuchsprogramm eingesetzten Salzlösungen

Lösungstyp	Dichte [g/cm ³]	pH	Wasseraktivität*	Zusammensetzung [mol/kgH ₂ O]					
				Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄
NaCl	1,2002	6,60*	0,7616	5,954	n.e.	n.e.	n.e.	5,954	n.e.
IP9	1,2414	5,58*	0,7207	4,020	0,926	0,006	1,098	6,302	0,441
IP24	1,2850	5,40*	0,6710	2,553	1,608	0,0005	2,144	6,703	0,873
IP19	1,3053	4,74*	0,5050	0,250	0,144	0,0002	4,429	8,843	0,361
IP21	1,2925	4,80*	0,5525	0,449	0,626	0,0006	4,164	8,826	0,276
Zementwasser	1,009*	13,2	0,9916	0,083	0,167	0,0017	n.e.	n.e.	n.e.
Porenlösung NaCl*	1,238*	10,5	0,7414	5,70	0,82	0,03	n.e.	6,55	0,14
Porenlösung IP21	1,295*	6,56	0,5804	0,71	0,78	0,74	2,83	8,75	0,03
NaCl-Mg7	1,234*	8,3	0,7361	4,48	0,44	0,01	0,73	6,4	0,18

n.e. nicht enthalten

* berechnet

Tab. 5 Daten zur Beurteilung der Homogenität der Lösungsverteilung in kompaktierten Bentoniten – Chloridgehalte an 6 Stellen zylindrischer Proben von 50 mm Durchmesser und 24,06 mm Höhe – in Abhängigkeit von der Rohdichte des Bentonits und der Lösungszusammensetzung

Lösung	Versuch	Dichte Bentonit [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	geb. Lösungsmenge [g]	Cl [mg/g Feststoff]							
					unten links	unten Mitte	unten rechts	oben links	oben Mitte	oben rechts	Mittelwert	Standard-abw.
NaCl	QV 215	1,55	7,5	28,4	46,4	27,6	35,9	41,4	22,7	29,7	33,95	8,94
	QV 201	1,60	6,2	21,4	30,3	29,4	30,7	31,5	30,6	30,2	30,45	0,69
	QV 203	1,70	12,1	22,6	35,9	29,5	27,9	27,9	25,4	32,9	29,92	3,83
	QV 206	1,80	30,9	28,5	21,3	20,3	18,1	22,0	21,2	21,7	20,77	1,43
	QV 212	1,80	39,8	24,1	26,0	22,7	32,5	38,2	42,2	26,9	31,42	7,61
IP9	QV 211	1,55	4,1	26,8	29,8	29,4	30,5	31,6	31,0	29,9	30,37	0,83
	QV 196	1,60	0,5	21,8	31,3	31,5	30,8	30,8	31,3	30,9	31,10	0,30
	QV 199	1,70	8,7	27,2	27,4	27,1	27,9	25,8	23,7	26,3	26,37	1,51
	QV 209	1,80	43,6	22,3	33,9	28,0	28,7	28,8	24,4	28,4	28,70	3,04
IP24	QV 214	1,55	3,9	27,9	32,8	40,8	34,5	37,3	27,3	41,2	35,65	5,28
	QV 208	1,60	3,4	29	29,0	29,6	29,6	29,9	29,5	28,9	29,42	0,39
	QV 200	1,70	12,7	27,6	29,1	25,5	27,6	25,6	24,8	28,4	26,83	1,77
IP21	QV 210	1,55	1,9	27,6	69,6	55,6	43,4	41,7	78,9	57,4	57,77	14,53
	QV 197	1,60	6,4	23,6	32,9	31,8	33,9	33,2	33,0	32,3	32,85	0,73
	QV 195	1,70	5,3	n.b.	35,0	30,9	33,3	39,5	27,5	32,8	33,17	4,02
	QV 204	1,70	13,4	29,5	32,4	30,7	34,6	30,4	29,6	28,4	31,02	2,19
IP19	QV 213	1,55	4,2	29,5	48,3	49,4	42,8	50,2	51,6	49,4	48,62	3,05
	QV 194	1,60	0,6	35	43,4	39,2	39,0	40,8	39,5	39,0	40,15	1,73
	QV 202	1,70	17,7	23,7	52,2	41,1	42,2	44,8	37,3	35,0	42,10	6,06
	QV 207	1,80	55,9	25,3	41,7	36,9	40,3	38,2	37,7	38,5	38,88	1,78

Tab. 6 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit NaCl- Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22)

MX-80 NaCl RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 215	1,5500	7,5		28,400
QV 006	1,6000	8,1	8,8	36,361
QV 007	1,6000	10,1	7,7	25,296
QV 008	1,6000	9,5	3,2	31,512
QV 009	1,6000	9,4	3,8	28,010
QV 010	1,6000	8,0	5,9	30,778
QV 012	1,6000	10,2	(39,1)*	28,477
QV 013	1,6000	9,4	9,8	27,004
QV 014	1,6000	7,4	5,3	34,851
QV 088	1,6000	15,6	13,6	26,870
QV 141	1,6000	(3,0)*	(19,8)*	20,512
QV 144	1,6000	11,4	5,2	21,070
QV 145	1,6000	9,8	8,0	19,858
QV 149	1,6000	16,8	10,1	28,292
QV 150	1,6000	9,3	9,1	20,517
QV 201	1,6000	6,2	1,5	21,424
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		10,1 ± 2,9 ± 29 %	7,1 ± 3,3 ± 47 %	26,7 ± 5,3 ± 20 %
QV 154	1,7000	12,9	11,6	17,836
QV 203	1,7000	12,1	0,0	22,631
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		12,5 ± 0,6 ± 4 %	5,8 ± 8,2 ± 141 %	20,2 ± 3,4 ± 17 %
QV 143	1,8000	39,3	15,0	24,543
QV 147	1,8000	21,5	14,3	30,274
QV 152	1,8000	24,6	10,5	16,158
QV 206	1,8000	30,9		28,529
QV 212	1,8000	39,8		24,089
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		31,2 ± 8,4 ± 27 %	13,3 ± 2,4 ± 18 %	24,7 ± 5,5 ± 22 %

* Werte in Klammern sind offensichtlich Ausreißer, die für die Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden.

Tab. 7 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP9-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22)

MX-80 IP9 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 211	1,5500	4,1	2,3	26,800
QV 179	1,6000		4,2	16,091
QV 180	1,6000	3,5	6,5	21,334
QV 196	1,6000		2,3	21,796
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung			4,3 ± 2,1 ± 49 %	19,7 ± 3,2 ± 16 %
QV 181	1,7000	11,8	8,1	23,309
QV 183	1,7000	9,5	5,2	17,074
QV 189	1,7000	11,4	6,6	19,890
QV 199	1,7000	8,7		27,194
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		10,4 ± 1,5 ± 14 %	6,6 ± 1,5 ± 22 %	21,9 ± 4,4 ± 20 %
QV 184	1,8000	36,5	12,8	16,264
QV 209	1,8000	43,6		22,343
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		40,1 ± 5,0 ± 13 %		19,3 ± 4,3 ± 22 %

Tab. 8 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP24-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22)

MX-80 IP24 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 214	1,5500	3,9	3,8	27,900
QV 157	1,6000	4,2	6,1	19,703
QV 159	1,6000	6,2	5,3	17,216
QV 208	1,6000	3,4	4,3	28,994
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		4,6 ± 1,4 ± 31 %	5,2 ± 0,9 ± 17 %	22,0 ± 6,2 ± 28 %
QV 161	1,7001	9,6	5,8	15,270
QV 162	1,7002	3,2	6,5	16,425
QV 163	1,7001	10,7	7,2	18,927
QV 200	1,7000	12,9		27,644
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,7001 ± 0,0 ± 0 %	9,1 ± 4,2 ± 46 %	6,5 ± 0,7 ± 11 %	19,6 ± 5,6 ± 29 %
QV 164	1,8001	26,6	12,5	21,740
QV 165	1,7999	(4,3)*	14,7	17,141
QV 166	1,8000	29,5	17,7	18,154
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		28,1 ± 2,1 ± 7 %	15,0 ± 2,6 ± 17 %	19,0 ± 2,4 ± 13 %

* Werte in Klammern sind offensichtlich Ausreißer, die für die Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden.

Tab. 9 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP21-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22)

MX-80 IP21 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 210	1,5500	1,9		27,600
QV 056	1,6000	8,5	8,6	23,800
QV 057	1,6009	9,4	8,6	38,578
QV 058	1,6000	5,6	4,5	25,554
QV 059	1,5995	14,9	14,3	20,252
QV 060	1,5999	12,2	9,4	29,953
QV 061	1,6002	10,6	9,5	29,484
QV 062	1,6000	9,4	7,6	28,115
QV 063	1,6000	16,1	10,3	21,236
QV 064	1,6000	11,7	8,3	20,843
QV 078	1,6000	9,5	6,9	22,191
QV 080	1,6003	16,4	11,5	17,688
QV 084	1,6005	17,6	12,5	20,068
QV 177	1,6000	5,0	4,4	17,685
QV 197	1,6000	6,4	4,4	23,572
Mittelwerte, Standardabweichung, relative Standardabweichung	1,6001 ± 0,0 ± 0 %	11,0 ± 4,1 ± 37 %	8,6 ± 3,0 ± 35 %	24,2 ± 5,7 ± 24 %
QV 172	1,7000	13,8	7,7	15,374
QV 173	1,7000	12,4	10,4	19,008
QV 174	1,7000	5,1	3,0	25,816
QV 204	1,7000	13,4		29,525
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		11,2 ± 4,1 ± 37 %	7,0 ± 3,7 ± 53 %	22,4 ± 6,4 ± 29 %
QV 169	1,7999	29,9	21,2	15,887
QV 170	1,8000	41,6	15,0	14,837
QV 171	1,8001	21,8	11,5	18,917
QV 186	1,7999	32,0	15,0	12,865
QV 187	1,7998	39,0	24,7	14,686
QV 188	1,8004	44,6	21,6	17,251
QV 190	1,7999	43,9	20,4	18,904
QV 191	1,8001	53,5	29,6	22,433
QV 205	1,8000	32,7		22,355
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		37,7 ± 9,5 ± 25 %	19,9 ± 5,9 ± 29 %	19,6 ± 4,7 ± 24 %

Tab. 10 Quelldrücke von MX-80 unterschiedlicher Einbaudichte mit IP19-Lösung bei Raumtemperatur, senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck und gebundene Lösung; Abb. 7.1, 7.2, 8.1 - 8.4; Tab. 22)

MX-80 IP19 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 213	1,5500	4,2		29,500
QV 110	1,5508	9,4	13,0	26,507
QV 113	1,5499	18,6	11,1	26,452
QV 115	1,5501	8,1	7,6	24,111
QV 116	1,5501	7,3	2,4	26,365
QV 119	1,5501	8,9	5,5	22,275
QV 120	1,5502	4,2	5,3	22,717
QV 122	1,5502	6,5	7,0	25,827
QV 123	1,5501	7,5	4,0	26,602
QV 124	1,5501	8,3	5,5	25,981
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		8,3 ± 4,0 ± 49 %	6,1 ± 3,8 ± 63 %	25,6 ± 2,1 ± 8 %
QV 010	1,6000	9,07**		
QV 011	1,6000	9,76**		
QV 016	1,6000	7,26**		
QV 017	1,6000	9,87**		
QV 018	1,6000	7,61**		
QV 019	1,6000	6,78**		
QV 020	1,6000	8,83**		
QV 021	1,6000	5,78**		
QV 022	1,6000	7,12**		
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		8,0 ± 1,4 ± 18 %		
QV 202	1,7000	17,7		29,200
QV 167	1,7988	32,1	17,9	13,670
QV 168	1,7999	18,0	13,9	20,228
QV 185	1,8004	23,4	20,5	19,403
QV 207	1,8000	55,9		25,251
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		32,4 ± 16,8 ± 52 %	17,4 ± 3,3 ± 19 %	19,6 ± 4,7 ± 24 %

** /HER02a/

Tab. 11 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für Zementwasser bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

MX-80 Zementwasser RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 016	1,5998	11,7	24,1	22,511
QV 017	1,5995	11,4	17,1	26,578
QV 018	1,5997	23,9	25,7	33,317
QV 021	1,5999	28,6	30,6	28,064
QV 022	1,5998	24,5	29,1	26,434
QV 023	1,5993	19,0	21,4	24,279
QV 024	1,5995	33,6	21,6	25,644
QV 025	1,5995	14,8	30,8	22,840
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,5996 ± 0,0 ± 0 %	20,9 ± 8,1 ± 39 %	25,0 ± 4,9 ± 20 %	26,2 ± 3,4 ± 13 %

Tab. 12 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für Porenlösung NaCl bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

MX-80 Porenlösung NaCl RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 046	1,6002	11,1	7,4	20,820
QV 047	1,6001	8,9	8,3	20,999
QV 048	1,6003	4,5	9,5	21,217
QV 049	1,6007	12,6	9,1	20,660
QV 051	1,6000	10,2	8,4	19,575
QV 052	1,5995	11,9	9,6	20,641
QV 053	1,6001	10,7	9,8	21,950
QV 054	1,6001	12,4	8,9	19,358
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,6001 ± 0,0 ± 0 %	10,3 ± 2,6 ± 26 %	8,9 ± 0,8 ± 9 %	20,7 ± 0,8 ± 4 %

Tab. 13 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für Porenlösung IP21 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

MX-80 Porenlösung IP21 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 036	1,6000	11,6	6,1	22,362
QV 037	1,6002	12,1	6,0	24,086
QV 039	1,6020	10,0	6,5	26,559
QV 041	1,5995	9,8	5,2	25,692
QV 042	1,5997	7,8	4,3	23,351
QV 043	1,6000	11,6	8,8	23,809
QV 044	1,5998	7,5	11,1	22,174
QV 045	1,6000	6,1	8,0	26,247
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,6001 ± 0,0 ± 0 %	9,6 ± 2,2 ± 23 %	7,0 ± 2,2 ± 32 %	24,3 ± 1,7 ± 7 %

Tab. 14 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für NaCl mit Mg7 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

MX-80 NaCl mit Mg7 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 099	1,6000	4,3	4,1	25,913
QV 100	1,6001	7,5	7,3	24,397
QV 101	1,6003	7,8	8,6	23,744
QV 102	1,5999	8,8	6,6	23,177
QV 104	1,6002	10,5	8,8	24,913
QV 106	1,6000	12,1	10,7	24,854
QV 107	1,6001	14,5	9,6	22,342
QV 108	1,6001	6,1	11,0	22,713
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,6001 ± 0,0 ± 0 %	9,0 ± 3,3 ± 37 %	8,3 ± 2,3 ± 28 %	24,0 ± 1,2 ± 5 %

Tab. 15 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm³ für NaCl bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

Calcigel NaCl RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 026	1,5989	6,9	4,8	29,353
QV 030	1,5999	5,6	3,7	27,420
QV 031	1,5997	6,9	3,6	25,826
QV 033	1,5995	4,8	1,2	26,538
QV 034	1,6000	7,3	3,5	25,610
QV 126	1,6002	7,1	7,3	19,457
QV 129	1,6000	4,8	5,6	17,957
QV 130	1,6000	6,4	5,8	18,842
QV 131	1,6000	6,3	7,0	16,494
QV 132	1,6000	5,0	3,3	18,665
QV 134	1,6000	7,4	6,2	19,567
QV 140	1,6000	6,1	4,9	21,651
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,5998 ± 0,0 ± 0 %	6,2 ± 1,0 ± 15 %	4,7 ± 1,8 ± 37 %	22,3 ± 4,4 ± 20 %

Tab. 16 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm³ für IP21 bei Raumtemperatur (Abb. 7.2, 8.3, 8.4; Tab. 22)

Calcigel IP21 RT	Einbaudichte [g/cm ³]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 066	1,6000	6,2	5,0	24,001
QV 068	1,6007	5,8	5,6	24,891
QV 070	1,6003	5,4	5,0	24,380
QV 071	1,6001	5,5	3,6	23,594
QV 072	1,6000	6,1	5,2	24,468
QV 073	1,6001	6,8	4,0	22,325
QV 075	1,6002	6,2	5,1	22,360
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung	1,6002 ± 0,0 ± 0 %	6,0 ± 0,5 ± 8 %	4,8 ± 0,7 ± 15 %	23,7 ± 1,0 ± 4 %

Tab. 17 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von Calcigel der Rohdichte 1,6 g/cm³ mit IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Abb. 7.3, 8.8, 8.9; Tab. 22)

Dichte 1,6 g/cm ³	Zelle	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g _{Lösung} / g _{Probe}]	
Calcigel mit IP21	Kleine zylindr. Zelle	QV 066	6,2	5,0	24,0014
		QV 068	5,8	5,6	24,8911
		QV 070	5,4	5,0	24,3799
		QV 071	5,5	3,6	23,5939
		QV 072	6,1	5,2	24,4682
		QV 073	6,8	4,0	22,3254
		QV 075	6,2	5,1	22,3597
		Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		6,0 ± 0,5 ± 8 %	4,8 ± 0,7 ± 15 %
Calcigel mit IP21	Große zylindr. Zelle	QV 112	4,0	2,9	130,0470
		QV 125	4,1	2,4	122,9650
		QV 128	6,8	5,0	102,9733
		QV 138	4,2	2,8	109,7452
		Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		4,8 ± 1,3 ± 28 %	3,3 ± 1,2 ± 36 %
Calcigel mit IP21	Große quaderf. Zelle	QV 121	8,7	2,0	131,2182
		QV 133	7,5	4,5	117,9385
		Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		8,1 ± 0,8 ± 10 %	3,2 ± 1,8 ± 55 %

Tab. 18 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösungen) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ mit NaCl- oder IP21-Lösung bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Probengeometrie und Probengröße (Abb. 7.3, 8.8, 8.9; Tab. 22)

Dichte 1,6 g/cm ³	Zelle	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g _{Lösung} / g _{Probe}]
MX-80 mit NaCl	Kleine zylindr. Zelle			
		8,1	8,8	36,361
		10,1	7,7	25,296
		9,5	3,2	31,512
		9,4	3,8	28,010
		8,0	5,9	30,778
		10,2	(39,1)*	28,477
		9,4	9,8	27,004
		7,4	5,3	34,851
		15,6	13,6	26,870
		(3,0)*	(19,8)*	20,512
		11,4	5,2	21,070
		9,8	8,0	19,858
		16,8	10,1	28,292
		9,3	9,1	20,517
		6,2	1,5	21,424
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		10,1 ± 2,9 ± 29 %	7,1 ± 3,3 ± 47 %	26,7 ± 5,3 ± 20 %
MX-80 mit NaCl	Große zylindr. Zelle			
		10,5	3,1	110,934
		15,3	8,7	96,318
		11,9	9,2	103,090
		10,0	7,8	94,625
		13,3	11,0	98,495
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		12,2 ± 2,2 ± 18 %	7,9 ± 2,9 ± 37 %	100,7 ± 6,5 ± 7 %
MX-80 mit IP21	Kleine zylindr. Zelle			
		8,5	8,6	23,800
		9,4	8,6	38,578
		5,6	4,5	25,554
		14,9	14,3	20,252
		12,2	9,4	29,953
		10,6	9,5	29,484
		9,4	7,6	28,115
		16,1	10,3	21,236
		11,7	8,3	20,843
		9,5	6,9	22,191
		16,4	11,5	17,688
		17,6	12,5	20,068
		5,0	4,4	17,685
		6,4	4,4	23,572
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		11,0 ± 4,1 ± 37 %	8,6 ± 3,0 ± 35 %	24,2 ± 5,7 ± 24 %
MX-80 mit IP21	Große zylindr. Zelle			
		13,8	2,4	115,939
		16,4	5,9	111,375
		10,3	6,3	115,505
		14,2	10,5	117,707
		11,5	2,5	108,701
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		13,2 ± 2,4 ± 18 %	5,5 ± 3,3 ± 60 %	113,8 ± 3,7 ± 3 %

* Werte in Klammern sind offensichtlich Ausreißer, die für die Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden.

Tab. 19 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für NaCl-Lösung bei Raumtemperatur und 70°C (Abb. 7.4, 8.5, 8.6; Tab. 22)

NaCl	Temperatur [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 006	22,5	8,1	8,8	36,361
QV 007		10,1	7,7	25,296
QV 008		9,5	3,2	31,512
QV 009		9,4	3,8	28,010
QV 010		8,0	5,9	30,778
QV 012		10,2	(39,1)*	28,477
QV 013		9,4	9,8	27,004
QV 014		7,4	5,3	34,851
QV 088		15,6	13,6	26,870
QV 141		(3,0)*	(19,8)*	20,512
QV 144		11,4	5,2	21,070
QV 145		9,8	8,0	19,858
QV 149		16,8	10,1	28,292
QV 150		9,3	9,1	20,517
QV 201		6,2	1,5	21,424
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		10,1 ± 2,9 ± 29 %	7,1 ± 3,3 ± 47 %	26,7 ± 5,3 ± 20 %
QV 098	70	6,6	3,1	24,2377
QV 103		11,4	9,9	25,8858
QV 111		21,1	16,8	29,1088
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		13,0 ± 7,4 ± 57 %	9,9 ± 6,9 ± 69 %	26,4 ± 2,5 ± 9 %

* Werte in Klammern sind offensichtlich Ausreißer, die für die Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden.

Tab. 20 Quelldrücke senkrecht zur Einregelung (Bodendruck, Manteldruck, gebundene Lösung) von MX-80 der Rohdichte 1,6 g/cm³ für IP21-Lösung bei Raumtemperatur, 70°C und 75°C (Abb. 7.4, 8.5, 8.6; Tab. 22)

IP21	Temperatur [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Gebundene Lösung [g]
QV 056	22,5	8,5	8,6	23,800
QV 057		9,4	8,6	38,578
QV 058		5,6	4,5	25,554
QV 059		14,9	14,3	20,252
QV 060		12,2	9,4	29,953
QV 061		10,6	9,5	29,484
QV 062		9,4	7,6	28,115
QV 063		16,1	10,3	21,236
QV 064		11,7	8,3	20,843
QV 078		9,5	6,9	22,191
QV 080		16,4	11,5	17,688
QV 084		17,6	12,5	20,068
QV 177		5,0	4,4	17,685
QV 197		6,4	4,4	23,572
Mittelwerte, Standardabweichung relative Standardabweichung		11,0 ± 4,1 ± 37 %	8,6 ± 3,0 ± 35 %	24,2 ± 5,7 ± 24 %
QV 082	70	18,3	11,8	19,691
QV 086	75	19,5	13,7	19,779

Tab. 21 Quelldruckmessungen von MX80- und Calcigel-Sand-Gemischen 1:1 mit Wasser in der UPC-Messzelle mit druckloser Aufsättigung des Porenraumes

Lfd. Nr.	Versuch	Prüfkörper	Messzelle	Max. Druck [bar]
1	QVsp1	PK 05-58	SN 166853	36,57
2	QVsp2	PK 05-59	SN 167012	38,03
3	QVsp3	PK 05-61	SN 167012	40,30
4	QVsp4	PK 05-62	SN 166853	35,20
5	QVsp5	PK 05-64	SN 166853	abgebrochen
6	QVsp6	PK 05-66	SN 167012	36,30
7	QVsp7	PK 05-67	SN 166853	38,10
8	QVsp8	PK 05-68	SN 167012	37,60
9	QVsp9	PK 05-69	SN 166853	45,30
10	QVsp10	PK 05-70	SN 166853	39,40
11	QVsp11	PK 05-71	SN 167012	42,60
M1	QVspM1	PK MX80-05-1	SN 166853	57,22
M2	QVspM2	PK MX80-05-2	SN 167012	53,80
M3	QVspM3	PK MX80-05-3	SN 167012	8,60
M4	QVspM4	PK MX80-05-4	SN 167012	8,80
M5	QVspM5	PK MX80-05-5	SN 167012	43,88

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C)

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurückgefllossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst abgedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsstufung?	Brauchbar	Bemerkungen
5	QV 005	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	0,9	3,4	35,7	0,2	3,6	31,9	Nein	Ja	Nein	Ausreißer bei Boden- und Manteldruck
6	QV 006	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	8,1	8,8	39,6	0,2	3,0	36,4	Nein	Ja	Ja	
7	QV 007	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	10,1	7,7	36,4	7,9	3,3	25,3	Ja	Nein	Ja	
8	QV 008	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	9,5	3,2	37,8	3,3	3,0	31,5	Ja	Nein	Ja	Bei QV 8 fehlt die Spalte für die austretende Lösung. Der Wert mußte so zum Schluß abgelesen werden.
9	QV 009	NaCl	MX-80		kl-zy-Z	RT	9,4	3,8	69,5	37,8	3,7	28,0	Nein	Ja	Ja	
10	QV 010	NaCl	MX-80	1,605	kl-zy-Z	RT	8,0	5,9	108,8	74,3	3,7	30,8	Ja	Nein	Ja	
11	QV 011	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	7,2	3,3	34,2	1,3	2,5	30,4	Nein	Ja	Nein	Bodensensor hatte zeitweilig Aussetzer, daher ist der Enddruck fraglich
12	QV 012	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	10,2	39,1	37,8	7,1	2,3	28,5	Ja	Nein	Ja	
13	QV 013	NaCl	MX-80	1,599	kl-zy-Z	RT	9,4	9,8	45,0	14,3	3,6	27,0	Ja	Nein	Ja	
14	QV 014	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	7,4	5,3	49,0	11,2	3,0	34,9	Nein	Ja	Ja	
15	QV 015	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	9,4	281,7	274,4	5,3	5,3	263,9	Nein	Ja	Nein	Mantelsensor ausgefallen, Eingepresste Lösung offensichtlich falsch
16	QV 016	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	11,7	24,1	22,8	-0,8	1,1	22,5	Ja	Nein	Ja	
17	QV 017	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	11,4	17,1	27,3	0,3	0,5	26,6	Ja	Nein	Ja	
18	QV 018	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	23,9	25,7	34,5	0,0	1,2	33,3	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
19	QV 019	Zementwasser	MX-80	1,597	kl-zy-Z	RT	27,3	16,9	38,9	0,0	1,8	37,1	Ja	Nein	Nein	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet. Kapillare beim Fluten geplatzt. Lösung verloren, keine Bilanz möglich.
20	QV 020	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	15,2	0,0	25,3	0,0	1,0	24,3	Ja	Nein	Nein	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet. Nach dem Verpressen Manteldrucksensor ausgefallen.
21	QV 021	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	28,6	30,6	29,6	0,0	1,5	28,1	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
22	QV 022	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Z	RT	24,5	29,1	27,4	0,0	1,0	26,4	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
23	QV 023	Zementwasser	MX-80	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	19,0	21,4	25,1	0,0	0,8	24,3	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
24	QV 024	Zementwasser	MX-80	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	33,6	21,6	26,1	0,0	0,4	25,6	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
25	QV 025	Zementwasser	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	14,8	30,8	23,5	0,0	0,6	22,8	Ja	Nein	Ja	Es trat keinerlei Lösung aus. Deshalb wurde die zweite Waage nicht mehr aufgezeichnet.
26	QV 026	NaCl	Calcigel	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	6,9	4,8	38,6	7,1	2,1	29,4	Ja	Nein	Ja	

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurückgeflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst abgedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsstufung?	Brauchbar	Bemerkungen
27	QV 027	NaCl	Calcigel	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	6,3	0,0	32,6	0,0	0,8	31,8	Ja	Nein	Nein	Nach dem Verpressen Manteldrucksensor ausgefallen; Ausreißer bei Bodendruck und Gebundener Lösung
28	QV 028	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,4	5,7	71,8	32,5	0,0	39,3	Nein	Ja	Nein	Beim Fluten Kapillare geplatzt. Keine Bilanzierung möglich
29	QV 029	NaCl	Calcigel	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	2,0	0,9	39,9	11,3	0,9	27,7	Ja	Nein	Nein	Ein Teil der Lösung ist über die Kolbenabdichtung in den Stempel gedrückt worden und hatte dadurch wenig Kontakt mit dem Ton.
30	QV 030	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,6	3,7	34,7	5,5	1,9	27,4	Ja	Nein	Ja	
31	QV 031	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,9	3,6	38,7	11,9	1,1	25,8	Ja	Nein	Ja	
32	QV 032	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,0	3,0	60,3	13,1	4,9	42,3	Ja	Nein	Nein	Ausreißer bei Gebundener Lösung
33	QV 033	NaCl	Calcigel	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	4,8	1,2	37,0	9,6	0,9	26,5	Ja	Nein	Ja	
34	QV 034	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,3	3,5	27,0	0,0	1,4	25,6	Ja	Nein	Ja	
35	QV 035	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,1	4,5	63,4	29,1	5,6	28,7	Ja	Nein	Nein	Waage für Eingangslösung mußte mehrmals zurückgestzt werden.
36	QV 036	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,6	6,1	29,8	0,0	7,5	22,4	Nein	Ja	Ja	
37	QV 037	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	12,1	6,0	29,5	0,0	5,4	24,1	Ja	Nein	Ja	Temperaturaufzeichnung fehlt
38	QV 038	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,1	3,2	135,8	115,9	0,0	19,9	Nein	Ja	Nein	Nach eineinhalb Tagen unter vollem Laugendruck Durchbruch der Lauge. Pumpe förderte so lange nach, bis Behälter leer war. Keine Bilanz möglich.
39	QV 039	Porenslg. IP-21	MX-80	1,602	kl-zy-Ti-Z	RT	10,0	6,5	27,4	0,0	0,8	26,6	Ja	Nein	Ja	Schlechte Durchfeuchtung des Probekörpers. Kleiner Teilberich relativ trocken gewesen.
40	QV 040	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	8,7	5,1	43,4	0,9	0,0	42,6	Ja	Nein	Nein	Leckage am Ventil aufgetreten. Keine Bilanz möglich.
41	QV 041	Porenslg. IP-21	MX-80	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	9,8	5,2	27,6	1,0	1,0	25,7	Nein	Ja	Ja	
42	QV 042	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,8	4,3	27,8	0,2	4,3	23,4	Ja	Nein	Ja	
43	QV 043	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,6	8,8	28,3	0,0	4,5	23,8	Ja	Nein	Ja	
44	QV 044	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,5	11,1	27,2	0,0	5,0	22,2	Ja	Nein	Ja	
45	QV 045	Porenslg. IP-21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,1	8,0	33,6	1,8	5,6	26,2	Ja	Nein	Ja	
46	QV 046	Porenslg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,1	7,4	25,3	0,0	4,5	20,8	Ja	Nein	Ja	

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchs- bezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurück- geflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst ab- gedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsrückführung?	Brauchbar	Bemerkungen
47	QV 047	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	8,9	8,3	28,1	1,0	6,1	21,0	Ja	Nein	Ja	
48	QV 048	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	4,5	9,5	27,4	-0,4	6,7	21,2	Ja	Nein	Ja	
49	QV 049	Porenlg. NaCl	MX-80	1,601	kl-zy-Ti-Z	RT	12,6	9,1	25,7	0,0	5,1	20,7	Ja	Nein	Ja	
50	QV 050	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,5	9,2	40,9	12,8	2,8	25,3	Nein	Ja	Nein	Ein wenig Lösung über die Dichtung in den Stempel geflossen.
51	QV 051	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	10,2	8,4	34,6	8,9	6,1	19,6	Ja	Nein	Ja	
52	QV 052	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,9	9,6	27,0	0,3	6,1	20,6	Ja	Nein	Ja	
53	QV 053	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	10,7	9,8	30,3	4,2	4,1	22,0	Nein	Ja	Ja	
54	QV 054	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	12,4	8,9	25,1	-0,3	6,0	19,4	Ja	Nein	Ja	
55	QV 055	Porenlg. NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,5	8,8	34,1	3,6	4,5	25,9	Nein	Ja	Nein	Ein wenig Lösung über die Dichtung in den Stempel geflossen.
56	QV 056	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	8,5	8,6	33,1	5,0	4,3	23,8	Ja	Nein	Ja	
57	QV 057	IP21	MX-80	1,601	kl-zy-Ti-Z	RT	9,4	8,6	38,4	-0,1	0,0	38,6	Ja	Nein	Ja	Beim Fluten Kapillare geplatzt. Keine Bilanz möglich.
58	QV 058	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,6	4,5	32,5	4,3	2,7	25,6	Ja	Nein	Ja	
59	QV 059	IP21	MX-80	1,599	kl-zy-Ti-Z	RT	14,9	14,3	24,9	0,0	4,6	20,3	Ja	Nein	Ja	
60	QV 060	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	12,2	9,4	36,4	0,9	5,6	30,0	Ja	Nein	Ja	
61	QV 061	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	10,6	9,5	35,5	0,0	6,1	29,5	Ja	Nein	Ja	
62	QV 062	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,4	7,6	27,9	-0,2	0,0	28,1	Ja	Nein	Ja	Beim Fluten Kapillare geplatzt. Keine Bilanz möglich. Keine Temperaturaufzeichnung!
63	QV 063	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	16,1	10,3	25,0	0,0	3,7	21,2	Ja	Nein	Ja	
64	QV 064	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,7	8,3	27,2	0,3	6,1	20,8	Ja	Nein	Ja	
65	QV 065	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,0	10,1	60,3	0,1	0,0	60,1	Ja	Nein	Nein	Beim Fluten Kapillare geplatzt. Keine Bilanz möglich. Aufzeichnung Waage Zulauf nach 65 min ausgefallen.
66	QV 066	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,2	5,0	27,2	1,0	2,2	24,0	Ja	Nein	Ja	
67	QV 067	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,7	7,9	35,2	0,0	2,6	32,6	Ja	Nein	Nein	Ausreißer bei Bodendruck und Gebundener Lösung
68	QV 068	IP21	Calcigel	1,601	kl-zy-Ti-Z	RT	5,8	5,6	28,6	-0,3	3,9	24,9	Ja	Nein	Ja	
69	QV 069	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,2	4,2	45,1	0,0	0,0	45,1	Ja	Nein	Nein	Lösung an der Stempeldichtung vorbei in den Innenraum des Stempels gedrückt. Keine Bilanz möglich.
70	QV 070	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,4	5,0	36,5	9,1	3,0	24,4	Nein	Ja	Ja	
71	QV 071	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,5	3,6	26,7	0,0	3,1	23,6	Ja	Nein	Ja	

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurückgeflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst abgedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsrückführung?	Brauchbar	Bemerkungen
72	QV 072	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,1	5,2	28,5	-0,1	4,1	24,5	Ja	Nein	Ja	
73	QV 073	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,8	4,0	33,8	5,7	5,8	22,3	Ja	Nein	Ja	
74	QV 074	IP21	Calcigel	1,600		RT	14,2	7,7	23,7	0,0	3,1	20,6	Ja	Nein	Ja	
75	QV 075	IP21	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,2	5,1	26,4	0,0	4,1	22,4	Ja	Nein	Ja	
76	QV 076	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,2	4,5	38,6	0,0	0,0	38,6	Ja	Nein	Nein	Pumpe konnte den Druck nicht halten, Leckage aufgetreten. Versuch vorzeitig abgebrochen. Keine Bilanz möglich.
77	QV 077	IP21	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	13,8	2,4	140,9	12,3	12,6	115,9	Nein	Ja	Ja	Nach Eintrag von 20g Lösung ein massiver Stopfer aufgetreten. Deswegen wurden Ein- und Ausgang miteinander vertauscht. Eingang wurde Ausgang und umgekehrt.
78	QV 078	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,5	6,9	26,7	-0,2	4,7	22,2	Ja	Nein	Ja	Laugendruck wurde nicht aufgezeichnet.
79	QV 079	IP21	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	16,4	5,9	126,5	4,3	10,8	111,4	Nein	Ja	Ja	
80	QV 080	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	16,4	11,5	24,5	0,0	6,8	17,7	Ja	Nein	Ja	
81	QV 081	IP21	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	10,3	6,3	136,1	5,7	14,8	115,5	Ja	Nein	Ja	
82	QV 082	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	18,3	11,8	25,5	0,0	5,8	19,7	Ja	Nein	Ja	
83	QV 083	IP21	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	14,2	10,5	132,9	3,0	12,2	117,7	Ja	Nein	Ja	
84	QV 084	IP21	MX-80	1,601	kl-zy-Ti-Z	RT	17,6	12,5	24,8	0,0	4,8	20,1	Ja	Nein	Ja	
85	QV 085	IP21	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	11,5	2,5	129,2	4,5	16,0	108,7	Ja	Nein	Ja	
86	QV 086	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	75	19,5	13,7	25,9	0,0	6,2	19,8	Ja	Nein	Ja	Temperaturaufzeichnung fehlt. Versuch wurde bei 75° C durchgeführt
87	QV 087	NaCl	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	10,5	3,1	134,6	15,7	7,9	110,9	Nein	Ja	Ja	
88	QV 088	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	15,6	13,6	29,5	0,0	2,6	26,9	Ja	Nein	Ja	
89	QV 089	NaCl	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	15,3	8,7	119,0	7,4	15,3	96,3	Ja	Nein	Ja	
90	QV 090	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	18,0	11,5	52,4	0,0	0,0	52,4	Ja	Nein	Nein	Kapillare geplatzt. Keine Bilanz möglich.
91	QV 091	NaCl	MX-80	1,601	gr-zy-Z	RT	11,9	9,2	119,6	0,0	16,5	103,1	Ja	Nein	Ja	
92	QV 092	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	17,0	11,8	0,0	0,0	4,9	-4,9	Ja	Nein	Nein	Durch Arbeiten an der M-Platte Daten verloren
93	QV 093	NaCl	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	10,0	7,8	116,5	10,8	11,1	94,6	Nein	Ja	Ja	
94	QV 094	NaCl	MX-80	1,600	gr-zy-Z	RT	13,3	11,0	124,9	10,2	16,2	98,5	Nein	Ja	Ja	
95	QV 095	NaCl	MX-80		kl-zy-Ti-Z	RT							Nein	Ja	Nein	1. Versuch von Heinz, lohnt nicht in die Tabelle einzutragen.
96	QV 096	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,6	7,9	47,3	11,3	0,5	35,6	Nein	Ja	Nein	Ausreißer bei Gebundener Lösung
97	QV 097	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,6	5,3	35,9	0,1	8,0	27,8	Ja	Nein	Nein	Kapillare geplatzt. Ein paar Tropfen Lösung verloren.
98	QV 098	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	6,6	3,1	31,0	0,1	6,6	24,2	Ja	Nein	Ja	
99	QV 099	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	4,3	4,1	33,4	0,0	7,5	25,9	Ja	Nein	Ja	

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchs- bezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurück- geflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst ab- gedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsstufung?	Brauchbar	Bemerkungen
100	QV 100	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,5	7,3	40,8	13,4	3,0	24,4	Nein	Ja	Ja	
101	QV 101	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,8	8,6	26,9	0,1	3,0	23,7	Ja	Nein	Ja	
102	QV 102	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	8,8	6,6	30,0	-0,1	6,9	23,2	Ja	Nein	Ja	Durch Rechnerausfall zwischendurch Daten verloren
103	QV 103	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	11,4	9,9	28,3	0,0	2,4	25,9	Ja	Nein	Ja	Durch Rechnerausfall Daten der Anfangsflutung verloren.
104	QV 104	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	10,5	8,8	30,8	4,6	1,2	24,9	Ja	Nein	Ja	
105	QV 105	NaCl	MX-80	1,601	gr-q-Z	RT	0,0	3,9	245,4	13,7	0,0	231,7	Ja	Nein	Nein	Beim Verpressen Bodensensor ausgefallen. Leckage im Stempel, keine Bilanz möglich.
106	QV 106	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	12,1	10,7	29,6	0,1	4,6	24,9	Ja	Nein	Ja	
107	QV 107	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	14,5	9,6	27,9	0,0	5,6	22,3	Ja	Nein	Ja	
108	QV 108	NaCl mit Mg7	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,1	11,0	29,0	0,0	6,3	22,7	Ja	Nein	Ja	
109	QV 109	IP21	Calcigel	1,600	gr-q-Z	RT	13,6	11,7	152,2	0,0	0,0	152,2	Ja	Nein	Nein	Flasche mit zurückgeflossener Lsg. Zersprungen. Keine Bilanz möglich.
110	QV 110	IP19	MX-80	1,551	kl-zy-Ti-Z	RT	9,4	13,0	29,7	0,0	3,2	26,5	Ja	Nein	Ja	
111	QV 111	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	21,1	16,8	37,6	0,0	8,5	29,1	Ja	Nein	Ja	Zuerst geflutet, dann aufgeheizt
112	QV 112	IP21	Calcigel	1,600	gr-zy-Z	RT	4,0	2,9	152,1	14,3	7,7	130,0	Nein	Ja	Ja	
113	QV 113	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	18,6	11,1	32,9	0,0	6,4	26,5	Ja	Nein	Ja	keine Temperatur
114	QV 114	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	70	6,4	9,7	176,8	0,0	0,0	176,8	Ja	Nein	Nein	Zuerst geflutet, dann aufgeheizt. Hochdruckmembran in der Pumpe geplatzt. Keine Bilanz möglich.
115	QV 115	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	8,1	7,6	30,7	0,1	6,5	24,1	Ja	Nein	Ja	
116	QV 116	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	7,3	2,4	29,1	0,0	2,7	26,4	Ja	Nein	Ja	
117	QV 117	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	1,0	1,9	33,9	0,7	6,2	26,9	Ja	Nein	Nein	Werte warscheinlich falsch. Konnte aber keinen Fehler feststellen.
118	QV 118	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	11,5	9,9	39,6	0,0	0,0	39,6	Ja	Nein	Nein	An der Eingangsverschraubung Leckage aufgetreten. Keine Bilanz möglich.
119	QV 119	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	8,9	5,5	28,4	-0,1	6,2	22,3	Ja	Nein	Ja	Rohdaten nur als .txt bzw .xls-File gefunden (waren nicht in dieser Tabelle eingetragen) (REI)
120	QV 120	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	4,2	5,3	29,8	0,0	7,1	22,7	Ja	Nein	Ja	
121	QV 121	IP21	Calcigel	1,601	gr-q-Z	RT	8,7	2,0	158,9	19,6	8,1	131,2	Nein	Ja	Ja	
122	QV 122	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	6,5	7,0	32,5	-0,2	6,9	25,8	Ja	Nein	Ja	
123	QV 123	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	7,5	4,0	34,5	-0,2	8,0	26,6	Ja	Nein	Ja	

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchs- bezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurück- geflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst ab- gedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangslösung?	Brauchbar	Bemerkungen
124	QV 124	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	8,3	5,5	31,1	0,0	5,1	26,0	Ja	Nein	Ja	Externer Laugensensor ausgefallen. Zeigt konstant 0,3 bar an.
125	QV 125	IP21	Calcigel	1,600	gr-zy-Z	RT	4,1	2,4	149,7	18,3	8,5	123,0	Nein	Ja	Ja	
126	QV 126	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,1	7,3	22,8	0,1	3,3	19,5	Ja	Nein	Ja	2 Tage entspannt. Calcigel über NaCl-Lsg. Gelagert Ab diesem Versuch wurden alle eingebauten Proben vorher über NaCl gelagert !!!
127	QV 127	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	120	8,8	5,6	192,0	0,8	0,0	191,2	Ja	Nein	Nein	Nach drei Tagen Lösung über die nachgebende Stempel-dichtung in die Form gelaufen bis das Vorratsgefäß leer war.
128	QV 128	IP21	Calcigel	1,600	gr-zy-Z	RT	6,8	5,0	158,6	48,0	7,6	103,0	Nein	Ja	Ja	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
129	QV 129	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	4,8	5,6	22,2	0,0	4,2	18,0	Ja	Nein	Ja	2 Tage entspannt. Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
130	QV 130	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,4	5,8	23,0	0,1	4,0	18,8	Ja	Nein	Ja	2 Tage entspannt. Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
131	QV 131	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,3	7,0	20,5	0,0	4,0	16,5	Ja	Nein	Ja	1 Tag entspannt. Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
132	QV 132	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,0	3,3	21,6	0,0	2,9	18,7	Ja	Nein	Ja	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
133	QV 133	IP21	Calcigel	1,600	gr-q-Z	RT	7,5	4,5	128,5	0,1	10,5	117,9	Ja	Nein	Ja	Calcigel nicht über NaCl-Lsg. gelagert
134	QV 134	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	7,4	6,2	22,3	0,1	2,6	19,6	Ja	Nein	Ja	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
135	QV 135	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	2,6	2,5	42,2	6,1	3,4	32,7	Ja	Nein	Nein	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert. Leckage am Ventil auf- getreten, keine Bilanz möglich. Probleme mit der Über- tragung der Waagedaten
136	QV 136	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,8	0,0	30,9	4,4	6,7	19,9	Ja	Nein	Nein	Manteldrucksensor ausgefallen
137	QV 137	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	120	2,1	0,0	35,4	-0,3	0,0	35,7	Ja	Nein	Nein	Stempeldichtung konnte den Druck nicht halten. Probe nur teilweise geflutet.
138	QV 138	IP21	Calcigel	1,600	gr-zy-Z	RT	4,2	2,8	127,9	11,3	6,8	109,7	Nein	Ja	Ja	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
139	QV 139	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,5	7,1	22,3	0,0	3,3	19,0	Ja	Nein	Nein	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert. Bodendruckwert fraglich, beim Entlasten springen die Werte.
140	QV 140	NaCl	Calcigel	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,1	4,9	24,6	0,0	3,0	21,7	Ja	Nein	Ja	Calcigel über NaCl-Lsg. gelagert
141	QV 141	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,0	19,8	25,6	0,0	5,1	20,5	Ja	Nein	Ja	MX-80 lufttrocken
142	QV 142	IP21	Calcigel- Sand- Gemisch	2,250	kl-zy-Ti-Z	RT	3,2	10,7	8,6	0,0	1,5	7,1	Ja	Nein	Ja	Probleme mit der Datenübertragung einer Waage
143	QV 143	NaCl	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	39,3	15,0	31,6	6,3	0,8	24,5	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
144	QV 144	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	11,4	5,2	24,6	0,2	3,4	21,1	Ja	Nein	Ja	MX-80 lufttrocken
145	QV 145	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,8	8,0	25,5	0,0	5,7	19,9	Ja	Nein	Ja	MX-80 lufttrocken
146	QV 146	IP21	Calcigel- Sand- Gemisch	2,250	kl-zy-Ti-Z	RT	8,8	19,6	8,4	0,0	1,7	6,7	Ja	Nein	Ja	
147	QV 147	NaCl	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	21,5	14,3	36,4	5,3	0,9	30,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchsbezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurückgefllossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst abgedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsstufung?	Brauchbar	Bemerkungen
148	QV 148	IP21	Calcigel-Sand-Gemisch	2,250	gr-zy-Z	RT	29,3	12,0	55,1	16,5	4,0	34,5	Nein	Ja	Ja	
149	QV 149	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	16,8	10,1	32,7	0,0	4,4	28,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 lufttrocken. Kapillare beim Fluten geplatzt. Keine Bilanz
150	QV 150	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	9,3	9,1	25,8	0,0	5,2	20,5	Ja	Nein	Ja	MX-80 lufttrocken
151	QV 151	IP21	Calcigel-Sand-Gemisch	2,250	kl-zy-Ti-Z	RT	29,8	5,3	18,1	0,1	0,9	17,0	Ja	Nein	Ja	
152	QV 152	NaCl	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	24,6	10,5	25,5	8,7	0,6	16,2	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
153	QV 153	IP21	Calcigel-Sand-Gemisch	2,250	kl-zy-Ti-Z	RT	11,1	5,7	11,7	0,0	1,7	10,0	Ja	Nein	Ja	
154	QV 154	NaCl	MX-80	1,700	kl-zy-Z	RT	12,9	11,6	18,0	0,0	0,1	17,8	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
155	QV 155	IP21	Calcigel-Sand-Gemisch	2,250	gr-q-Z	RT							Nein	Nein	Nein	Beim Fluten beide Sensoren durch den hohen Anfangsdruck ausgefallen. Daher keine Daten.
156	QV 156	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,4	8,6	63,3	4,2	0,0	59,0	Ja	Nein	Nein	Kapillare beim Fluten geplatzt. Keine Bilanz
157	QV 157	IP24	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	4,2	6,1	23,0	0,9	2,4	19,7	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
158	QV 158	IP24	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,2	4,1	62,7	1,2	0,0	61,5	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Stempeldichtung geplatzt. Keine Bilanz.
159	QV 159	IP24	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,2	5,3	27,2	4,0	6,0	17,2	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
160	QV 160	IP24	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	15,9	8,7	46,6	11,7	1,2	33,8	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Über eine Kerbe im Stempel Lsg. ins Innere gedrungen. Keine Bilanz.
161	QV 161	IP24	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	9,6	5,8	18,9	0,1	3,5	15,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
162	QV 162	IP24	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	3,2	6,5	19,9	0,0	3,5	16,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
163	QV 163	IP24	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	10,7	7,2	24,9	3,1	2,8	18,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Zeitweiliger Datenverlust. SFR hat Platte abgeschaltet.
164	QV 164	IP24	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	26,6	12,5	24,7	1,3	1,6	21,7	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
165	QV 165	IP24	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	4,3	14,7	18,8	0,0	1,7	17,1	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
166	QV 166	IP24	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	29,5	17,7	22,7	3,8	0,7	18,2	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
167	QV 167	IP19	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	32,1	17,9	19,0	3,3	2,0	13,7	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Ein-und Ausgang mußten vertauscht werden, da Probe von unten nicht zu fluten war.
168	QV 168	IP19	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	18,0	13,9	23,8	0,5	3,1	20,2	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
169	QV 169	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	29,9	21,2	21,0	3,4	1,7	15,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
170	QV 170	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	41,6	15,0	17,4	0,7	1,8	14,8	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchs- bezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurück- geflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst ab- gedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsstufung?	Brauchbar	Bemerkungen
171	QV 171	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	21,8	11,5	22,1	0,2	3,0	18,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
172	QV 172	IP21	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	13,8	7,7	23,4	6,2	1,8	15,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
173	QV 173	IP21	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	12,4	10,4	26,1	5,3	1,8	19,0	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
174	QV 174	IP21	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	5,1	3,0	39,9	10,8	3,3	25,8	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
175	QV 175	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	1,1	4,1	38,0	13,6	4,0	20,3	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert; Ausreißer beim Bodendruck
176	QV 176	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	2,7	3,7	31,2	0,2	0,0	31,1	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Leckage am Eingangsventil. Keine Bilanz, keine Temperatur.
177	QV 177	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	5,0	4,4	23,4	2,0	3,7	17,7	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
178	QV 178	IP9	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	1,2	4,3	35,5	1,9	0,0	33,6	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert. Leckage an beiden Ventilen. Keine Bilanz. Externer Drucksensor für Fluiddruck ausgefallen.
179	QV 179	IP9	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	0,6	4,2	33,3	9,1	8,1	16,1	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
180	QV 180	IP9	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,5	6,5	25,3	0,0	4,0	21,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
181	QV 181	IP9	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	11,8	8,1	27,9	2,3	2,3	23,3	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
182	QV 182	IP9	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	120	0,6	1,2	118,1	7,2	0,0	110,9	Ja	Nein	Nein	Nach ca. 2 Tagen hält die Stempeldichtung der Temperatur und dem Druck nicht mehr stand
183	QV 183	IP9	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	9,5	5,2	24,3	6,5	0,7	17,1	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
184	QV 184	IP9	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	36,5	12,8	18,3	1,2	0,8	16,3	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
185	QV 185	IP19	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	23,4	20,5	21,0	0,0	1,6	19,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
186	QV 186	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	32,0	15,0	15,0	0,0	2,2	12,9	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
187	QV 187	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	39,0	24,7	18,8	2,8	1,3	14,7	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
188	QV 188	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	44,6	21,6	20,5	1,2	2,0	17,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
189	QV 189	IP9	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	11,4	6,6	22,5	1,3	1,3	19,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCl-Lsg. gelagert
190	QV 190	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	43,9	20,4	23,7	3,4	1,4	18,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 lufttrocken
191	QV 191	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	53,5	29,6	27,0	3,2	1,3	22,4	Nein	Ja	Ja	MX-80 lufttrocken
194	QV 194	IP19	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	0,6	2,2	38,9	0,0	3,8	35,0	Nein	Ja	Nein	MX-80 lufttrocken; Ausreißer bei Boden- und Manteldruck und Gebundener Lösung
195	QV 195	IP21	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	5,3	0,0	0,0	0,0	33,5	-33,5	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCL-Lsg. Gelagert; Keine Daten?
196	QV 196	IP9	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	0,5	2,3	30,3	1,9	6,6	21,8	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
197	QV 197	IP21	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,4	4,4	30,0	0,2	6,2	23,6	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
199	QV 199	IP9	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	8,7	0,0	34,9	0,0	7,7	27,2	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
200	QV 200	IP24	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	12,9	0,0	33,4	0,0	5,8	27,6	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
201	QV 201	NaCl	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	6,2	1,5	28,2	0,5	6,3	21,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
202	QV 202	IP19	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	17,7	0,0	35,5	0,0	6,3	29,2	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
203	QV 203	NaCl	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	12,1	0,0	31,2	0,0	8,5	22,6	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
204	QV 204	IP21	MX-80	1,700	kl-zy-Ti-Z	RT	13,4	0,0	37,9	0,0	8,4	29,5	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert

Tab. 22 Zusammenstellung aller Quelldruckmessungen und erfasste Daten (RT = Raumtemperatur, 22-25 °C) [Fortsetzung]

Lfd. Nr.	Versuchs- bezeichnung	Lösung	Probenart	Einbaudichte [g/cm ³]	Meßzelle	Temp. [°C]	Bodendruck [bar]	Manteldruck [bar]	Eingepresste Lösung [g]	Ausgetretene Lösung [g]	Zurück- geflossene Lösung [g]	Gebundene Lösung [g]	Selbst ab- gedichtet?	Falls selbst abgedichtet: Zwangsführung?	Brauchbar	Bemerkungen
205	QV 205	IP21	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	32,7	0,0	25,5	0,0	3,2	22,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
206	QV 206	NaCl	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	30,9	0,0	37,8	0,0	9,3	28,5	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
207	QV 207	IP19	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	55,9	0,0	31,9	0,0	6,7	25,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
208	QV 208	IP24	MX-80	1,600	kl-zy-Ti-Z	RT	3,4	4,3	33,9	1,6	3,2	29,0	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
209	QV 209	IP9	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	43,6	0,0	30,6	0,0	8,3	22,3	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
210	QV 210	IP21	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	1,9	0,0	36,0	0,0	8,3	27,6	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
211	QV 211	IP9	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	4,1	2,3	31,3	0,0	4,5	26,8	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
212	QV 212	NaCl	MX-80	1,800	kl-zy-Ti-Z	RT	39,8	0,0	29,4	0,0	5,3	24,1	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
213	QV 213	IP19	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	4,2	0,0	38,8	0,0	9,4	29,5	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
214	QV 214	IP24	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	3,9	3,8	44,3	12,9	3,5	27,9	Nein	Ja	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
215	QV 215	NaCl	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	7,5	0,0	35,7	0,0	7,3	28,4	Ja	Nein	Ja	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert
217	QV 217	IP24	MX-80	1,550	kl-zy-Ti-Z	RT	2,3	0,0	39,5	0,0	3,3	36,3	Nein	Ja	Nein	MX-80 über NaCL-Lsg. gelagert; Ausreißer bei Bodendruck und Gebundener Lösung

**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