

Das Clausthaler Gesteinstomographielabor

Von Günter Pusch und Rüdiger Meyn

Mit den tomographischen Visualisierungsverfahren, wie der Röntgentomographie oder der Kernspinresonanztomographie, können Objekte unter ihren natürlichen Einsatzbedingungen untersucht werden. Beide Methoden ergänzen einander, da die raumauflösende Röntgenstrahlabsorptionsmethode eine der Abschwächung proportionale Dichteverteilung mit einer hohen Genauigkeit und Ortsauflösung unterhalb des Millimeterbereiches zeigt. Mit der Methode können daher z. B. Hohlraumstrukturen in einer Gesteinsmatrix abgebildet werden. Die Kernspinresonanztomographie (NMR) zielt dagegen darauf ab, die Konzentration und Beweglichkeit der Wasserstoffatome (Kernspin) in einer Hohlraumausbildung konformen Signalcharakteristik zu bestimmen. Daraus können Fluidsättigungen und Durchlässigkeiten des porösen Gesteins abgeleitet werden.

Gesteinsphysik an der Technischen Universität Clausthal

Ein besonderer Schwerpunkt im Bereich der gesteinsphysikalischen Forschung an der Technischen Universität Clausthal sind die hydraulischen Eigenschaften poröser Medien. Der unmittelbare Bezug zu diesem Forschungsthema ist sowohl in den angewandten Geowissenschaften, im Bergbau und hier insbesondere im Bereich des Fluidbergbaus und in der Strömungsmechanik zu finden. Dazu zählen insbesondere die Arbeiten von Schopper und Mitarbeitern zur Korrelation von Porosität und Permeabilität poröser Medien. Ausgehend von der Archie-Gleichung, in der ein elektrisches Analogon zu den hydraulischen Fließprozessen gefunden wurde, sind die von Riepe, Pape und Schopper erweiterten Beziehungen zwischen inneren Gesteinsoberflächen und Porenvolumen auf ein für die Permeabilitätsbestimmung relevantes Stoffmodell (Paris-Gleichung) übertragen worden. In späteren Arbeiten von Jonas wurde die Selbstähnlichkeit der mikroskopischen Porenräume mit den makroskopischen Wegsamkeiten im Gestein durch sogenannte fraktale Ansätze beschrieben. Aber auch mit fraktalen Dimensionen ist es nicht möglich, eine generelle Lösung für diese Problemstellung zu finden. Weller und Debschütz haben die Meßmethoden für raumauflösende, elektrische Leitfähigkeitsuntersuchungen und für die spektral induzierte Polarisierung weiterentwickelt.

Mit den elektrischen Leitfähigkeitsmessungen können Widerstandsanomalien als richtungsab-

hängige Wegsamkeiten erkannt werden. Mit der spektral induzierten Polarisierung besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Unterschiede zwischen der Oberflächenleitfähigkeit – korrelierbar zum Anteil des immobilen Wassers und der Volumensleitfähigkeit – d.h. das freibewegliche Wasser zu identifizieren. Interpretationsmodelle zur Quantifizierung der Effekte sind jedoch erst in Entwicklung.

In den sedimentologischen und petrophysikalischen Arbeiten in der Erdölgeologie wurde von den Professoren Beckmann, Müller, Kulke und ihren Doktoranden Wittenhagen u.a. die geologisch-petrophysikalische Charakterisierung der in vielen Flutexperimenten verwendeten Modellsandsteine wie des Bentheimer Sandsteins aus dem Valendis und Obernkirchner Sandstein geleistet.

Am Institut für Erdöl- und Erdgasforschung wurde in der Abteilung für Erdöl/Erdgas von Meyn und Winter die methodische Weiterentwicklung von Kapillardruck-Bestimmungsmethoden nach dem dynamischen Verfahren betrieben und als kernschonendes Extraktionsverfahren für das Schichtwasser, die sogenannte ‚Critical Point Drying Method‘ zur Präparation illithaltiger Rotliegendesandsteinkerne entwickelt. Nur mit diesem Verfahren ist es möglich, Kernmessungen auf einer verlässlichen Basis für die Übertragung auf in-situ-Bedingungen zu nutzen. In den Arbeitsgruppen am ITE wurden von den Doktoranden Weber, Borgmeier und später Alkan und Cinar die hydromechanische Kopplung der Permeabilitätsmessungen mit dem Spannungseinfluß unterschiedlicher Stoffgruppen von Kristallgestein über Salzstein bis hin zu den geringpermeablen Sandsteinen untersucht. Für die Permeabilitätsdilatanz konnten empirische Korrelationen zwischen Permeabilitätsveränderung und Spannungszustand erarbeitet werden. Von der Arbeitsgruppe Reitenbach und Cinar wurden die Endwerte der Zweiphasenflußpermeabilitäten von geringpermeablen Gesteinen bestimmt und mit

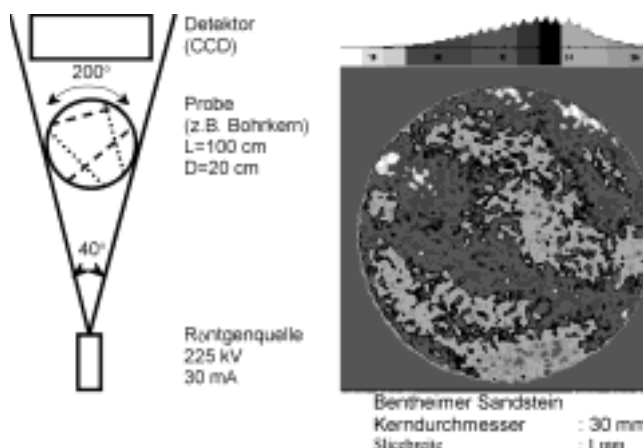


Bild 1: Prinzipdarstellung – Röntgenabsorptionstomographie (CT)

den Kapillardruckeigenschaften korreliert. Die dabei untersuchten Stoffklassen reichen von Rotliegend Sandstein, Oberkarbonsandstein bis hin zu den Barrierematerialien wie Steinsalz und Granit. Die Spannungseinflußuntersuchungen wurden in enger Zusammenarbeit mit der gesteinsmechanischen Arbeitsgruppe Lux, Hou und Düsterloh in einem gemeinsamen Projekt bearbeitet.

Trotz der weitgestreuten Beiträge zum Kenntnisstand über hydraulische Eigenschaften für spezielle Stoffklassen poröser Medien von Speicher- bis zu Barrieresteinen bleiben diese indirekt bestimmten Fluidtransportparameter als integrale Kennwerte für unterschiedlich große Gesteinsproben skalenabhängige Größen. Eine direkte Visualisierung und Interpretation von Fließprozessen in den mikroskopischen Hohlräumen kann mit diesen Methoden meist nicht erreicht werden. Zur Visualisierung von Porenraumstrukturen und Fließprozessen sind daher moderne, raumauflösende, zerstörungsfreie Prüfverfahren erforderlich, wie sie in der Röntgen- und NMR-Tomographie (NMR = nuclear magnetic resonance) verwendet werden.

Meßmethoden in der Gesteinstomographie

Eine raumauflösende – tomographische – Datenbestimmung existiert in einem weiten Bereich der geophysikalischen Meßmethoden wie z.B. in der Gruppe der elektrischen Potentialmeßver- ▶

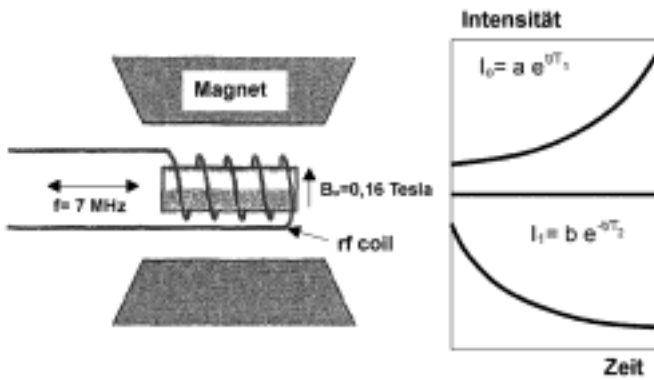


Bild 2: Prinzipdarstellung – Kernspinresonanzmessung

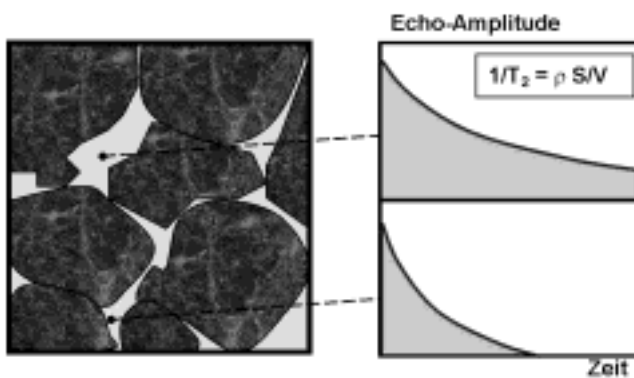


Bild 3: NMR-Relaxometrie

fahren, der akustischen Meßverfahren, der elektrisch induzierten Polarisation, der Röntgenstrahlenabsorption, der Kernspinresonanz oder der Radarverfahren. Die für die Messung an Bohrkernen und deren Inhaltsstoffen ausgewählten Meßverfahren sind die Röntgenabsorptionstomographie und die Kernspinresonanztomographie sowie die Kernspinrelaxometrie. Während die erste Verfahrensgruppe im wesentlichen die Gesteinsdichten und damit den Hohlraumanteil und dessen Verteilung im Gestein erfaßt, dienen die beiden letzten Verfahren zur Bestimmung der Poreninhalte. Somit sind beide tomographischen Verfahrensgruppen so aufeinander abgestimmt, daß Wegsamkeiten und Fluidbewegungen in Gesteinen untersucht werden können.

MESSPRINZIP DER RÖNTGENTOMOGRAPHIE

Bild 1 zeigt das Meßprinzip der Röntgentomographie. Eine Röntgenquelle mit einer Leistung von 225 kV und einer Stromstärke von 30 mA sendet einen fokussierten Röntgenstrahl im Winkel von ca. 40° auf einen diametral gegenüberliegenden Detektor. Im Strahlungsfeld der Röntgenröhre ist in horizontaler Anordnung die Probe platziert, die einen

Längsschnitt des Kernes ermöglichen. Mit entsprechend leistungsfähigen Rechenprogrammen können nach genauer Dichteeichung zwei- bzw. dreidimensionale Dichte-Images und daraus die Porositätsverteilungen gemessen werden. Das in Bild 1 dargestellte Beispiel eines Scans zeigt die Porositätsverteilung des Bentheimer Sandsteins, der wegen seiner Gleichmäßigkeit von Porosität und Permeabilität weltweit als Modellsandstein für Flutversuche verwendet wurde. Auch hier kann man sehen, daß Homogenität nur eine Frage des Maßstabes ist. Die Anwendung unterschiedlicher Energieniveaus des Röntgenstrahls in Verbindung mit Subtraktionsverfahren erlaubt auch mit der Röntgenadsorptionsmethode weitergehende Untersuchungen über Porenfluidverteilungen und Fluidbewegungen.

Durchmesser von bis zu 20 cm und eine Länge von rd. einem Meter aufweisen kann. Der Röntgendetektor registriert die Intensitätsabnahme der Röntgenstrahlung nach Sorption durch die durchstrahlte Materie. Eine statische Aufnahme würde aber nur ein integrales Bild der Gesteinsdichte liefern. Durch die Drehung des Gesteinskörpers in beide Richtungen um ca. 200° werden ca. 1000 Images der unter unterschiedlichem Winkel bestrahlten Gesteinspartikel übereinander gestapelt, so daß eine Identifizierung bzw. flächenhafte Darstellung der Dichteverteilung über den Querschnitt möglich wird. Wenn der Bohrkern abschnittsweise entlang seiner Längsachse verschoben wird, können auf diese Weise zahlreiche Querschnitte gesammelt werden, die als Aufeinanderfolge von sogenannten „Slices“ eine räumliche Zuordnung entlang der

KERNSPINRESONANZ-RELAXOMETRIE/TOMOGRAPHIE

In Bild 2 ist das Meßprinzip der NMR-Relaxometrie dargestellt. In einem permanenten Magnetfeld mit der Magnetstärke von 0,16 Tesla werden die Protonen des Wasserstoffs von Wassermolekülen, Methan bzw. Ölmolekülen polarisiert. Die Zeitkonstante für die Ausbildung dieser Polarisation T_1 , die longitudinale Relaxationszeitkonstante, kann gemessen werden und ebenso die gesamte Feldstärke des polarisierten Wasserstoffprotonensignals. Daraus kann der Gesamtwasseranteil und damit die Porosität bestimmt werden. Für die Relaxometrie ist ein 2. Schritt erforderlich, nämlich die Einstrahlung eines Radiofrequenzmagnetfeldes von 7 MHz, welches impulsartig zur Auslenkung der polarisierten Protonen führt. Nach dem Abschalten des Impulses relaxieren die Protonen in die ursprüngliche Ausgangslage zurück. Das Abklingen dieses Signals liefert, wie Bild 2 zeigt, eine zweite Zeitkonstante T_2 , die transversale Relaxationszeit. Da der Abklingeffekt im wesentlichen von der Beweglichkeit der Protonen im Porenraum abhängig ist, können mehrere Informationen aus der Abklingkurve abgeleitet werden:

Die reziproke Abklingzeitkonstante T_2 ist direkt proportional der Oberflächenbindung der Protonen an der Gesteinsoberfläche und dem Verhältnis von spezifischer Gesteinsoberfläche zum Gesteinsporenvolumen. Da jeder Frequenzbereich des RF-Feldes die Protonen unterschiedlich auslenkt, werden Spin-Echos mit unterschiedlicher Energie emittiert und registriert. Ihre Zeitkonstanten der transversalen Relaxation ergeben daher eine Spin-Echoenergieverteilung zugehörig zu den jeweiligen Relaxationszeiten, die eine Differenzierung zwischen freibeweglichen und gebundenen Protonen

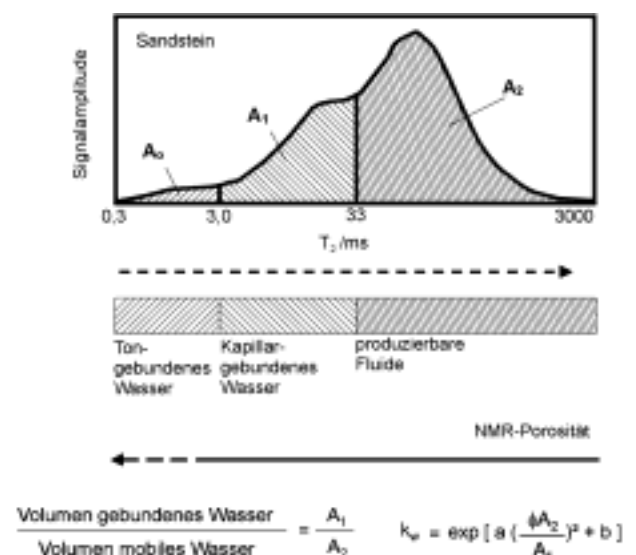


Bild 4: Auswertverfahren für Sandsteine

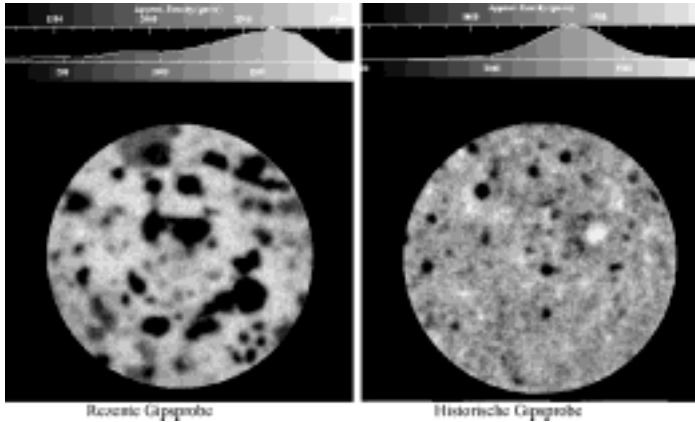


Bild 5: Röntgenabsorptionsanalyse von zwei Gipsproben

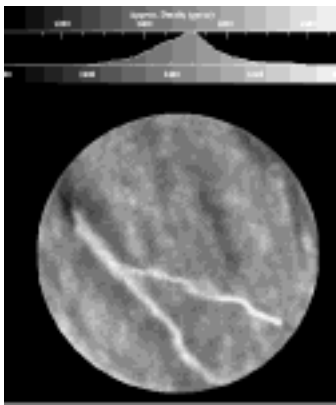


Bild 6: Klufterkennung in Kristalline Gesteinsproben

erlaubt. Natürlich müssen für die Auswertung der Relaxometrie gesteinsabhängige Standards bestimmt werden, die wie in **Bild 3** dargestellt, die Grenzen zwischen freibeweglichem, kapillargebundenem und physikalisch gebundenem Wasser aufzeigen. Für Sandsteine liegen diese Grenzen beispielsweise bei 33 ms bzw. 3 ms, wie **Bild 4** zeigt. Für andere Gesteinsklassen wie Sande, Siltstein, Tonstein oder Karbonate müssen diese Standards jeweils separat bestimmt werden. Da das Verhältnis aus innerer Gesteinsoberfläche und Porenvolumen eine maßgebliche Korrelationsgröße für die Wegsamkeit innerhalb eines Gesteins darstellen (vgl. Kozeny-Karman) kann aus den Teilflächen A1 und A2 für das gebundene und freie Wasser die Wasserpermeabilität abgeleitet werden, wie es in **Bild 4** dargestellt ist.

Einsatzmöglichkeiten der Gesteinstomographie

Von der Probengröße her und dem Auflösungsvermögen dient die Röntgenabsorptionsmeßmethode in erster Linie zur Untersuchung der porösen Matrixstruktur – d.h. der Feststellung von Porositätsverteilung und von Klüften. Von besonderem Vorteil ist dabei die Aufrechterhaltung des intakten Gesteinskörpers.

Beispiel 1: Untersuchungen zur Struktur von erhärteten Gipsmassen

Gips als Baustoff und als Werkstoff ist bereits seit dem frühen Mittelalter bekannt. Er wurde wegen seiner leichten Handhabbarkeit auch in der bildenden Kunst eingesetzt. Die Haltbarkeit und Formbeständigkeit des Gipses hängt von seiner inneren Struktur ab. Es ist bekannt, daß für die Herstellung von Gipskörpern Rezepturen aus Rohgips + Zuschlägen + Wasser verwendet wurden, um eine besonders hohe und ausgeglichene Dichte des Gipskörpers zu erzielen. Erstaunlicherweise war die Qualität der ausgehärteten Gipsmassen historischer Gipsproben oft deutlich höher als bei rezent hergestellte Gipsproben, wie es **Bild 5** aus einem Untersuchungsbericht des Instituts für Mineralogie, Prof. Follner, zeigt.

Beispiel 2: Kluftvisualisierung in Kristalline Gesteinsproben

Für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten für radioaktive Abfallstoffe in Kristalline Gestein sind Störungen und Kluftzonen von großer Bedeutung. Während Makrokluftbeispielweise durch seismische Reflexionsmessungen erkannt werden können, sind Mikrokluft im Zentimeter- bis Dezimeterbereich nur schwer durch seismische Methoden zur erkennen. Eine Lösungsmöglichkeit bilden hier die geoelektrischen Meßverfahren und die Röntgentomographie. Da Mikrorisse bzw. Makrorisse im Zentimeterbereich mit Kluftweiten von 1 bis 10 µm unterhalb der Auflösungsgrenze der Röntgentomographie liegen, wurde eine Kluftimpregnation mittels Injektion einer Kalium-Jodidlösung vorgenommen, die durch ihre hohe Absorptivität für Röntgenstrahlung auch feine Rißstrukturen im Mikrometerbereich durch eine diffuse Grenzschicht zur Gesteinmatrix sichtbar macht. In **Bild 6** sind Makrokluft einer Granitprobe aus dem Feldlabor in Asbö in Schweden aus einem Forschungsprojekt des Instituts

für Mineralogie, Abt. Anorganische Geochemie, von Prof. Mengel dargestellt.

Beispiel 3: NMR-Relaxometrie zur Charakterisierung von Modellgesteinen

Modellgesteine werden deshalb so bezeichnet, weil sie reproduzierbare Eigenschaften innerhalb einer bestimmten Porositäts-/Permeabilitätsklasse aufweisen und in Folge ihrer einheitlichen Zusammensetzung für Flutexperimente im Porenraum dieser Gesteine von vielen Arbeitsgruppen aus Vergleichsgründen herangezogen werden. Zwei dieser Modellgesteine sind der Bentheimer Sandstein, der für die hochporösen, permeablen Sandsteintypen (Permeabilität 1 bis 2 Darcy (D), Porosität ca. 24%) mit einer fast 98%igen Zusammensetzung aus Quarz und weniger als 2% Tonanteilen als Prototyp dient, sowie der Obernkirchner Sandstein, dessen kleinere Porenradienverteilung bei ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung zu einer deutlich kleineren Permeabilität von rd. 10 mD und einer Porosität von 17% führt. Diesen beiden Modellsandsteinen sind in **Bild 7** ein Siltstein und ein sehr dichter Tonstein gegenübergestellt. Unter der vereinfachenden Annahme, daß die Relaxationszeitgrenze von rd. 33 ms sowohl für die Sandsteine als auch für den Siltstein gilt, können aus den unterschiedlichen Spektren die Anteile des gebundenen und des freien Wassers sowie die daraus abzuleitenden Permeabilitäten beurteilt werden. Aus dem Flächenverhältnis der beiden Peaks des Bentheimer Sandsteins folgt eine rechnerische Aufteilung von rd. 90% beweglichem und 10% kapillargebundenem Wasser. Dies entspricht auch ziemlich genau den aus hydraulischen Messungen bestimmten nichtreduzierbaren Wassersättigungsanteilen von rd. 10%. Für den Obernkirchner Sandstein folgt hingegen aus der Flächendarstellung ein kapillargebundener Wasseranteil von rd. 25%, während 75% des Wassers mobil sind. Ein sehr kleiner Anteil des Wassers scheint hier auch an Tone gebunden zu sein. ▶

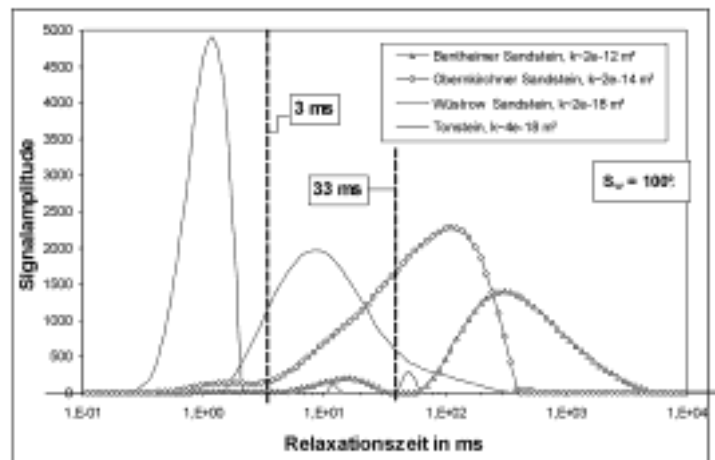


Bild 7: Modellgesteinscharakterisierung mittels NMR-Relaxometrie

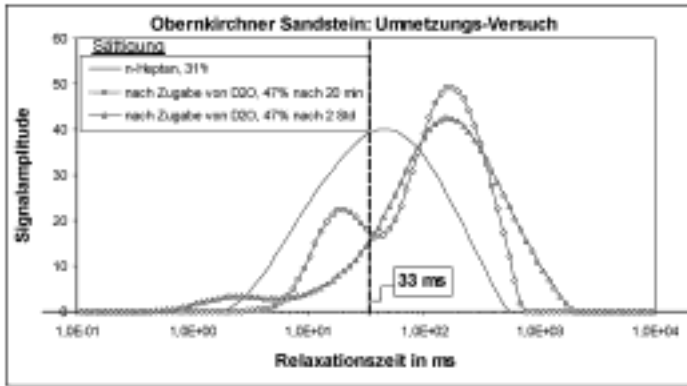


Bild 8: Fluidverteilung von benetzenden und nicht-benetzenden Phasen an einem Modellgestein

Für den Tonstein mit einer um 4 bis 6 Zehnerpotenzen kleineren Permeabilität als der Obernkirchner bzw. Bentheimer Sandstein liegt das Relaxationszentrum links von der Tongrenze; d.h. mehr als 90% des Wassers sind an Ton gebunden, während nur zwei kleine Peaks im Bereich des kapillargebundenen und freien Wassers erkennbar werden. Der freie Wasseranteil dürfte daher nur wenige Prozente betragen und erklärt damit auch die sehr kleine Wasserpermeabilität von 4 μD . Der Siltstein mit der gleichen Permeabilitätsklasse weist hingegen einen sehr hohen Anteil von kapillargebundenem Wasser von rd. 80% und weniger als 20% freiem Wasser auf. Diese Meßergebnisse sind einerseits für die quantitative Auswertung der Permeabilitäten geeignet, stellen darüber hinaus aber einen sehr wichtigen Interpretationsfaktor für die gemessenen hydraulischen Permeabilitätskennwerte dar, deren Plausibilität auf der Basis dieser NMR-Relaxometrie und der Mineralanalysen bestätigt werden kann.

Beispiel 4:

Fluidverteilung von benetzender und nichtbenetzender Phase an einem Modellgestein

Bild 8 zeigt ein Experiment, bei dem ein Obernkirchner Sandsteinkern zunächst mit Heptan als Modellkohlenwasserstoff in einem gasgefüllten Porenraum bis zu einem Wert von 31% gesättigt wurde. Das Spektrum in Bild 8 zeigt, daß etwa die Hälfte des Heptanvolumens in die feinen Poren eindringt und die andere Hälfte in den größeren Poren als bewegliche Phase vorhanden bleibt. In der nächsten Stufe des Experiments wurden 47% des Porenvolumens zusätzlich mit D₂O, das einerseits in seinen physikochemischen Eigenschaften dem normalen Wasser sehr ähnlich ist, aber andererseits nicht NMR-aktiv ist, aufgesättigt, so daß der Sättigungszustand der flüssigen Phasen bei 78% lag. Im Abstand von 20 Minuten und von 2 Stunden wurden NMR-Relaxationsmessungen durchgeführt.

Die erste Messung zeigt bereits, daß nach kurzer Zeit ein Teil des in den feinen Poren vertretenen Heptans durch das Wasser ersetzt wird, da die Saugspannung für das benetzende Medium einen Austauschprozeß auslöst. Nach 2 Stunden scheint dieser Austauschprozeß fast vollendet zu sein, da nun mehr als 80% des Heptans in die großen Poren

abgewandert ist und das Wasser seine Position in den feinen Poren einnimmt. Solche Benetzungs- und Umnetzungsexperimente bilden eine gute Möglichkeit, um die für den Fließprozeß enorm wichtigen Benetzungseigenschaften an ungestörten Gesteinsproben messen zu können.

Erfahrungen im Betrieb der Anlage und Ausblick

Obwohl die Zeitdauer für den Betrieb der Anlage in Clausthal mit rd. 1 1/2 Jahren noch zu kurz ist, um über umfangreiche methodische und Stoffkompetenzen zu verfügen, wurden die ersten Grundlagen für Forschungsarbeiten in der Gesteinstomographie im Rahmen von zwei DFG-Projekten und in einem Promotionsvorhaben, das von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gesponsert wird, gelegt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt hier auf dem Gebiet der Kernspin-Relaxometrie, mit der das Wasserbindungsvermögen von Tonen in Tonstein bzw. in vulkanischen Metapeliten untersucht und mit den durch Zentrifugmessungen einstellbaren, nicht-reduzierbaren Wassersättigungen korreliert wurde. Die Meßergebnisse stützen die nach hydraulischen Methoden ermittelten Kenngrößen der abgeleiteten Permeabilitäten. Weitere Erfahrungen konnten hinsichtlich der Bindung von Salzlagern in Steinsalzproben und in diesem Zusammenhang mit der Frage der Verdrängbarkeit von Wasser entlang von Gefügegrenzen von Salzkristallen gewonnen werden.

Wichtige Beiträge wird die Kernspin-Relaxometrie aber auch im Bereich der Erdgashydratforschung liefern können. Nur mit dieser Methode wird es möglich sein, exakt kinetische Kenngrößen der Hydratdissoziation zu Methan und Wasser unter in-situ-Bedingungen zu gewinnen. Ebenfalls in einem vom BMBF geförderten Vorhaben wird die Salzausscheidung in Geothermie-Prozessen und damit die Reduzierung der Permeabilität untersucht. Auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen, aber mit der gleichen Auswirkung verbunden, ist die Ausfällung von Steinsalzkristallen (Halitscale) in der Umgebung von Erdgasspeicherbohrungen bzw. Erdgasproduktionsbohrungen. Auch hier wird erwartet, daß die NMR- und die Röntgentomographie gleichermaßen Beiträge leisten können. In der Röntgentomographie bestehen neben den reinen Dichtebestimmungen (Hohlraumanteil) die erweiterten Möglichkeiten auf der Basis von sogenannten Dual-Energy-Meßverfahren mit unterschiedlichen Anregungsenergien, Unterschiede zwischen Porenraumsättigungen und der Gesteinsmatrix zu identifizieren.

Dienstleistungen für die Industrie können insbesondere auf dem Gebiet der Datenerfassung und Datenvalidierung für Speichergesteine in sogenannten Gesteinskatalogen („Rock-Katalog“) erwartet werden, wo die NMR-Relaxometrie ein sehr erfolgreiches Hilfsmittel zur Diagnose bzw. Identifizierung von Fehlmessungen von Permeabilitäten sowie der kritischen Restphasensättigungen und Endwerte und der relativen Permeabilitäten darstellt. Hier wird eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie angestrebt.

LITERATUR

G. Pusch, V. Reitenbach, Y. Cinar
Bestimmung der Mobilität und Sättigungsverteilung von wässrigen Fluiden durch „Low Frequency“ Kernspinresonanzmessungen (NMR) und hydraulische Messungen in mikroporösen Gesteinen der kontinentalen Kruste (DFG 59-11), 2000

B. J. Stambaugh
NMR Tools Afford New Logging Choices, Oil&Gas Journal, Apr.17, 2000, pp. 45-52.

G. Pusch, V. Reitenbach, J. R. Weber et al.
The Formation and Migration of Thermogenic Gases and Condensates in Carrier/Reservoir Systems. JOULE II Programm der EU, Contract JOU 2-CT93-0341, Final Report, 1996

Y. Cinar
Experimental Investigation on the Pore Structure and Fluid Flow in Artificially-Compacted Salt Granulates. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 2000

G. Pusch, G. Reik, R. Meyn
Einfluß der Klüftung auf Stofftransport und Retentionsprozesse in diagenetisch verfestigten Tonsteinen (DFG 59-10-2), 2000

S. Wittenhagen
Sedimentologisch-petrographische Untersuchung des Bentheimer Sandsteins im Erdölfeld Bramberge/Emsland. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1980

M. Jonas
Überlegungen graphentheoretisch-kombinatorischer Natur zur Berechnung mittlerer wahrscheinlicher Kapillardruckkurven von Netzwerkmodellen und die Lösung des radiellen Inversionsproblems. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1988

H. Pape, L. Riepe, J. R. Schopper
Conversion between Specific Surface Measurements of Different Resolution Power with the Aid of Pigeon-Hole Model Theory. Veröffentlicht: J. M. Haynes, P. Rossi-Doria (eds) Principles and Applications of Pore Structural Characterization.

J. R. Schopper

Theoretische Untersuchung elektrischer, hydraulischer und anderer physikalischer Eigenschaften poröser Gesteine mit Hilfe statistischer Netzwerkmodelle. Habilitation, Clausthal-Zellerfeld 1972.

M. Borgmeier

Untersuchungen des belastungsabhängigen Durchlässigkeitsverhaltens von Salzgestein für Gase unter besonderer Berücksichtigung der Porenraumbelastung. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1993

J. Weber

Untersuchungen zur Permeabilitätsdilatanz kristalliner Gesteine unter deviatorischer Belastung. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, 1994

I. Winter, V. Meyn

Die simultane Bestimmung von kapillaren und

elektrischen Speichergesteinseigenschaften mit der Continuous Injection Methode, DGMK-Forschungsbericht 494-2, 1997

K.-H. Lux, Z. Hou, U. Düsterloh

Neue Aspekte zum Tragverhalten von Salzkavernen und zu ihrem geotechnischen Sicherheitsnachweis, Teil 1: Theoretische Ansätze. Erdöl Erdgas Kohle, Heft 3, 1999

F. Börner, J. R. Schopper, A. Weller

Evaluation of Transport and Storage Properties in the Soil and Groundwater Zone from Induced Polarization Measurements. Geophysical Prospecting 44, 1996

A. Weller, M. Seichter, A. Kampke

Induced-Polarization Modelling Using Complex Electrical Conductivities. Geophysical Journal

International 127, 1996

W. Debschütz

Hydraulische Untersuchungen an Sediment- und Kristallingesteinen unter variablen hydro- und lithostatischen Druckbedingungen: Trennung strömungscharakterisierender Kenngrößen und Korrelation mit anderen petrophysikalischen Größen. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld 1995

Prof. Dr.-Ing. Günter Pusch

Dr.-Ing. Rüdiger Meyn

Institut für Erdöl- und Erdgastechnik

Agricolastraße 10

38678 Clausthal-Zellerfeld

Tel.: 053 23/72-26 18 (Pusch)

053 23/72-26 15 (Meyn)

Fax: 053 23/72-31 46

