

Gunnar Wenzel

**Röntgencomputertomographische
Untersuchungen zum Einfluß von
salzreichen Lösungen und Trockenphasen
auf die Aggregat- und Makroporenstruktur
verschiedener Bentonite**

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2000 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783832447847

Gunnar Wenzel

**Röntgencomputertomographische Untersuchungen zum
Einfluß von salzreichen Lösungen und Trockenphasen
auf die Aggregat- und Makroporenstruktur verschiede-
ner Bentonite**

Gunnar Wenzel

Röntgencomputertomographische Untersuchungen zum Einfluß von salzreichen Lösungen und Trockenphasen auf die Aggregat- und Makroporenstruktur verschiedener Bentonite

**Diplomarbeit
an der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen
Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie
Dezember 2000 Abgabe**



Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

ID 4784

Wenzel, Gunnar: Röntgencomputertomographische Untersuchungen zum Einfluß von salzreichen Lösungen und Trockenphasen auf die Aggregat- und Makroporenstruktur verschiedener Bentonite / Gunnar Wenzel - Hamburg: Diplomica GmbH, 2001
Zugl.: Aachen, Technische Universität, Diplom, 2000

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Diplomica GmbH
<http://www.diplom.de>, Hamburg 2001
Printed in Germany



Wissensquellen gewinnbringend nutzen

Qualität, Praxisrelevanz und Aktualität zeichnen unsere Studien aus. Wir bieten Ihnen im Auftrag unserer Autorinnen und Autoren Wirtschaftsstudien und wissenschaftliche Abschlussarbeiten – Dissertationen, Diplomarbeiten, Magisterarbeiten, Staatsexamensarbeiten und Studienarbeiten zum Kauf. Sie wurden an deutschen Universitäten, Fachhochschulen, Akademien oder vergleichbaren Institutionen der Europäischen Union geschrieben. Der Notendurchschnitt liegt bei 1,5.

Wettbewerbsvorteile verschaffen – Vergleichen Sie den Preis unserer Studien mit den Honoraren externer Berater. Um dieses Wissen selbst zusammenzutragen, müssten Sie viel Zeit und Geld aufbringen.

<http://www.diplom.de> bietet Ihnen unser vollständiges Lieferprogramm mit mehreren tausend Studien im Internet. Neben dem Online-Katalog und der Online-Suchmaschine für Ihre Recherche steht Ihnen auch eine Online-Bestellfunktion zur Verfügung. Inhaltliche Zusammenfassungen und Inhaltsverzeichnisse zu jeder Studie sind im Internet einsehbar.

Individueller Service – Gerne senden wir Ihnen auch unseren Papierkatalog zu. Bitte fordern Sie Ihr individuelles Exemplar bei uns an. Für Fragen, Anregungen und individuelle Anfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Wir freuen uns auf eine gute Zusammenarbeit.

Ihr Team der Diplomarbeiten Agentur

Diplomica GmbH _____
Hermannstal 119k _____
22119 Hamburg _____

Fon: 040 / 655 99 20 _____
Fax: 040 / 655 99 222 _____

agentur@diplom.de _____
www.diplom.de _____

Zusammenfassung

Bentonite werden aufgrund ihrer Fähigkeit, Wasser in die Zwischenschichten einzubauen und des damit verbundenen großen Quellvermögens häufig als Abdichtungsmaterial eingesetzt.

Diese Arbeit sollte die Risiken untersuchen, die durch Volumenverluste bei Austrocknung oder durch Einflüsse elektrolytreicher Lösungen für die Dichtwirkung der Bentonite entstehen können. Erstmals wurde dabei die Technik der Röntgen-Computertomographie (CT) zur zerstörungsfreien Erfassung der inneren Probenstrukturen angewendet.

Eine für diese Arbeit konstruierte neuartige Probenzelle erlaubte den zyklischen Wechsel von Aufsättigungs- und Austrocknungsphasen und die Erfassung der damit verbundenen Volumenänderungen unter einer in allen Versuchsphasen konstanten Auflast. Durch die CT-Tauglichkeit der Zelle konnten die zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Probenstrukturen im Verlauf der Zyklen visualisiert werden, ohne diese Veränderungen zu beeinflussen.

Die einzelnen Versuchsphasen gliederten sich in:

- Aufsättigung mit demineralisiertem Wasser
- Austrocknung bei 35°C
- Wiederaufsättigung mit demineralisiertem Wasser / mit 0,1 molarer Calciumchloridlösung
- Wiederaustrocknung bei 35°C

Als Probenmaterial wurde ein natürlicher Natrium-Bentonit, ein natürlicher Calcium-Bentonit und ein sodaaktivierter Calcium-Bentonit eingesetzt.

Alle Bentonite erreichten in der **Aufsättigungsphase** eine volle Dichtwirkung, eine Durchströmung der Proben trat nicht ein. Der Natrium-Bentonit erreichte die erwarteten hohen Quelldehnungs- und Wasseraufnahmewerte, gefolgt vom sodaaktivierten Bentonit und vom Calcium-Bentonit.

Durch die CT-Untersuchungen war es möglich, die während der **Austrocknungsphase** auftretende radiale Schrumpfung der Proben zu erfassen und zu quantifizieren. Alle Proben zeigten dabei eine anfängliche Reduzierung des Durchmessers, bevor es beim sodaaktivierten Bentonit zum Aufreißen eines durchgehenden Zentralrisses kam. Auch der Natrium-Bentonit zeigte diesen Zentralriß sowie ein bis drei kleinere Nebenrisse.

Während der **Wiederaufsättigungsphase** wurde ein Teil der Proben mit demineralisiertem Wasser, ein anderer Teil der Proben mit 0,1 molarer Calciumchloridlösung aufgesättigt. Bei allen Proben konnte mit Hilfe der CT-Untersuchungen die anfängliche Bildung eines engständigen durchgehenden Scherbruchgefüges aufgrund ungleichmäßiger Durchfeuchtung und Quellung. Bei der Aufsättigung mit Wasser konnte sowohl dieses sekundäre Scherbruch- als auch das primäre Trockenrißsystem durch Quellung innerhalb von 24 Stunden wiederverschlossen werden. Die

Wiederaufsättigung mit Calciumchlorid zeigte jedoch eine starke Einschränkung des Quellvermögens aller Bentonite durch Reduzierung der intrakristallinen und der osmotischen Quellung. Dieses reduzierte Quellvermögen reichte nicht aus, die primären Trockenrisse zu schließen, so daß eine konstante Durchströmung der Proben eintrat.

Ziel der **Wiederaustrocknung** war die Beantwortung der Frage, ob während der ersten Phasen aufgetretene Strukturen Schwächezonen im Probengefüge hinterlassen, an denen bei erneuter Austrocknung bevorzugt Risse entstehen können. Der Natrium- und er sodaaktivierte Bentonit zeigten dabei nur die Konservierung der primären Trockenrißstrukturen, der Calcium-Bentonit bildete mehrere kleinere Risse aus, die sehr gut mit dem Scherbengefüge der sekundären Scherbrüche korrelierten.

Ein für die Bewertung der Langzeitbeständigkeit von Bentonitabdichtungen wichtiges Ergebnis war die deutliche Volumenverringerung aller Bentonite im Verlauf der Aufsättigungs-Austrocknungs-Zyklen. Während der Aufsättigungsphase kommt es zu einer Mobilisierung der Tonmineralpartikel, die sich bei Austrocknung unter der Auflast und durch die vorhandene Wasserspannung deutlich besser einregeln. Sie erreichen somit eine höhere Lagerungsdichte und ein geringeres Volumen.

Die CT-Technologie hat sich im Verlauf dieser Arbeit als ein wertvolles Werkzeug für geotechnische Untersuchungen erwiesen. Nur durch ihren Einsatz war es möglich, sowohl die räumlichen als auch die zeitlichen Veränderungen der Probenstrukturen zu erfassen, ohne die randlichen Versuchsbedingungen verändern zu müssen, wie es bei herkömmlichen Strukturanalysen der Fall ist.

INHALTSVERZEICHNIS

<u>1.EINLEITUNG.....</u>	<u>1</u>
<u>2. BENTONITE.....</u>	<u>2</u>
2.1 Allgemeines	2
2.2 Bentonite als Abdichtungsmaterial	3
2.3 Smectite	5
2.3.1 Genese von Bentoniten	5
2.3.2 Struktur der Smectite.....	5
2.3.3 Entstehung der Schichtladung.....	7
2.3.4 Morphologie der Smectite	9
2.4 Quellverhalten der Smectite.....	10
2.4.1 Aufnahme freien Wassers in Mikroporen.....	10
2.4.2 Innerkristalline Quellung.....	10
2.4.3 Osmotische Quellung.....	12
2.5 Sodaaktivierung von Bentoniten	16
<u>3.RÖNTGENCOMPUTERTOMOGRAPHIE.....</u>	<u>18</u>
3.1 Allgemeines	18
3.2 Spektrum der Röntgenstrahlung	20
3.2.1 Bremsstrahlung.....	20
3.2.2 Charakteristische Strahlung	20
3.2.3 Wärmestrahlung.....	21
3.3 Durchstrahlung von Materie.....	22
3.3.1 Adsorption	23
3.3.2 Streuung	23
3.4 Röntgencomputertomographie.....	26
3.4.1 Verfahrensweise.....	26
3.4.2 Röntgen-Computertomograph des Lehrstuhls für Ingenieur- und Hydrogeologie	30
3.4.3 Entstehungsschritte eines Tomogramms	34

3.5 Röntgencomputertomographie in den Geowissenschaften	42
3.5.1 Ermittlung der Dichte und des Wassergehalts von Böden	43
3.5.2 Beschreibung der Fluidbewegung in Böden.....	43
3.5.3 Erfassung von Porenräumen und –strukturen in Böden.....	44
3.5.4 Erfassung von Struktur und Textur magmatischer Gesteine.....	45
3.5.5 Untersuchung interner Versagensfälle in Böden	47
3.5.6 Erfassung von Diffusionskoeffizienten schwerer Ionen in wassergesättigten porösen Medien	48
3.5.7 Untersuchungen zur Porosität kristalliner Gesteine	50
3.5.8 Untersuchungen am Lehrstuhl für Ingenieur- und Hydrogeologie der RWTH Aachen..	50
<u>4. KONSTRUKTION EINER CT- MEßZELLE ZUR UNTERSUCHUNGVON VOLUMENÄNDERUNGEN</u>	52
4.1 Handhabung der Probenzelle.....	57
4.1.1 Kontrolle der Probenzelle.....	57
4.1.2 Probeneinbau	57
4.1.3 Trockenscan	57
4.1.4 Aufsättigung	58
4.1.5 Austrocknung.....	59
4.1.6 Wiederaufsättigung.....	62
<u>5. VERSUCHSABLAUF</u>	63
5.1 Probenmaterial	63
5.2 Untersuchungsablauf	67
5.2.1 Serie 1.....	67
5.2.2 Serie 2.....	67
5.2.3 Serie 3.....	68
<u>6. DARSTELLUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE</u>	69
6.1 Aufsättigung mit demineralisiertem Wasser	69
6.1.1 Wasseraufnahme	69
6.1.2 Quelldehnung	71
6.1.3 CT-Untersuchungen.....	72

6.2 Austrocknung	74
6.2.1 Wasserabgabe	74
6.2.2 Volumenverlust	75
6.2.3 CT-Untersuchungen.....	78
6.3 Wiederaufsättigung mit demineralisiertem Wasser	80
6.3.1 Wasseraufnahme	80
6.3.2 Quelldehnung	81
6.3.3 CT-Untersuchungen.....	82
6.4 Wiederaufsättigung mit 0,1 molarer CaCl₂-Lösung.....	84
6.4.1 Wasseraufnahme	84
6.4.2 Quelldehnung	86
6.4.3 CT-Untersuchungen.....	88
6.5 Wiederaustrocknung.....	89
6.5.1 Wasserabgabe.....	89
6.5.2 Volumenverlust	90
6.5.3 CT-Untersuchungen.....	91
6.6 Langzeitaufsättigung	92
6.6.1 Wasseraufnahme	92
6.6.2 Quelldehnung	93
6.6.3 CT-Untersuchungen.....	93
<u>7. ZUSAMMENFASSENDER DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....</u>	<u>94</u>
<u>8. LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	<u>99</u>

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1: Anwendungsmöglichkeiten von Bentoniten.....	3
Abb. 2: Räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Dreischichtminerale	5
Abb. 3: Tetraeder- (a) und Oktaederschichten (b) in den Silikatschichten.....	6
Abb. 4: Einteilung der 2:1-Schichtsilikate und deren Schichtladung	8
Abb. 5: Zwischenschichtabstand von Smectiten bei innerkristalliner Quellung.....	11
Abb. 6: Modell der Ton-Wasser-Grenzfläche (nach: GÜVEN, 1992).....	13
Abb. 7: Wirksame Kräfte nach DLVO-Theorie	14
Abb. 8: Kompression der diffusen Ionenschichten bei Salzzusatz.....	15
Abb. 9: Das elektromagnetische Spektrum (HERING et al., 1992)	18
Abb. 10: Schema einer Röntgenröhre	19
Abb. 11: Spektrum der Röntgenstrahlung (HERING et al., 1992)	22
Abb. 12 a: Abhängigkeit der Absorptions- und Streuungseffekte von Photonenenergie und Ordnungszahl (FH AACHEN, 1995)	24
Abb. 12 b: Schematische Darstellung des Photo-, Compton- und Paarbildungseffektes (FH AACHEN, 1995)	25
Abb. 13: Definition des Schwächungskoeffizienten (ZONNEFELD)	27
Abb. 14 a: Erster Scan und resultierendes Schwächungsprofil	27
Abb. 14 b: Zweiter, um 90° versetzter Scan und resultierendes Schwächungsprofil	28
Abb. 14 c: Aufsummierung der Einzelprofile und resultierendes Gesamtprofil	28
Abb. 15: Prinzip der Röntgencomputertomographie (MENDE, 1996).....	30
Abb. 16: Komponenten der Anlage (IBS VON SEHT, 1996).....	31
Abb. 17: Komponenten des eigentlichen Tomographen (IBS VON SEHT, 1996).....	32
Abb. 18: Komplette Anordnung der Anlage	32
Abb. 19: Die einzelnen Komponenten im Vollschutzgehäuse.....	33
Abb. 20: Aufbau des Detektors im Tomographen des LIH (IBEX- RADIOGRAPHIESYSTEME)	34
Abb. 21: Beispiel eines Sinogramms	35
Abb. 22: Entstehung eines Sinogramms: Durchstrahlung einer Probe in fünf verschiedenen Winkelstellungen und graphische Darstellung der sinusförmigen Spur eines Fremdkörpers	36
Abb. 23: Objekt-, Speicher- und Bildmatrix (nach SCHULZ, 1984).....	37
Abb. 24: Prinzip der computertomographischen Rekonstruktion (HERING et al., 1992).....	37
Abb. 25: Rekonstruktion mit einem, zwei, vier und 48 Profilen (RIDDER, 1987)	39
Abb. 26: Rekonstruktion mit einem, zwei, vier und 48 gefalteten Profilen (RIDDER, 1987).....	40
Abb. 27: Grid-File als Darstellung einer Probenschicht mit Zellrand und Umgebung	41
Abb. 28: a) Blank-File b) Blank-File mit markiertem Flächenanteil „Luft“	41