

Forschungsvorhaben

**Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-
Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung**

Förderkennzeichen 02C0810

Abschlussbericht Teil II

Projektleiter: Dr.-Ing. Alexander Brandelik

IMK-TRO: Dr.-Ing. Alexander Brandelik
Dr.-Ing. Rainer Schuhmann
Dipl.-Ing. Franz Königer
Alexander Rohleder

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 10. 2003

Institution: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Mitglied der Hermann von
Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (HGF),
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Herrmann-von-Helmholtzplatz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Karlsruhe, 24. 5. 2004

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen
02C0810 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt
bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Vorhabensziele | 3 |
| 2 | Voruntersuchungen zur Entwicklung einer Messmethode..... | 3 |
| 2.1 | einfache Versuche mit Bentonit und Leitungswasser | 3 |
| 2.2 | einfache Versuche mit Bentonit und Salzlösung..... | 3 |
| 2.3 | Optimierung der Sensorkabel..... | 4 |
| 2.4 | Messungen im Frequenzbereich..... | 4 |
| 2.5 | Messungen im Zeitbereich | 5 |
| 2.6 | Konzeption eines Messsystems | 5 |
| 3 | Aufbau der halbtechnischen Versuche BRA1 und BRA2 | 5 |
| 3.1 | Aufbau der Bentonitschichten im Druckbehälter..... | 5 |
| 3.1.1 | Halbtechnischer Versuch BRA1 | 6 |
| 3.1.2 | Halbtechnischer Versuch BRA2..... | 6 |
| 3.2 | Einbau der Sensorkabel | 7 |
| 3.3 | Aufbau der Messeinrichtung und Messmethode..... | 8 |
| 3.4 | Datenaufnahme..... | 8 |
| 4 | Versuchsablauf | 9 |
| 4.1 | Halbtechnischer Versuch BRA1 | 9 |
| 4.2 | Halbtechnischer Versuch BRA2 | 10 |
| 5 | Diskussion der Ergebnisse | 11 |
| 5.1 | Halbtechnischer Versuch BRA1 | 11 |
| 5.1.1 | Feuchtigkeitsverlauf auf den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln..... | 11 |
| 5.1.2 | Feuchtigkeitsverlauf auf Sensorkabel M | 12 |
| 5.1.3 | Vergleich der Feuchtepegel an den Sensorkabeln..... | 12 |
| 5.1.4 | Abbau der Füllung | 13 |
| 5.1.5 | Zusammenfassung des ersten halbtechnischen Versuchs BRA1 | 13 |
| 5.2 | Halbtechnischer Versuch BRA2 | 13 |
| 5.2.1 | Feuchtigkeitsverlauf an den beidseitig angeschlossenen Sensorkabeln..... | 15 |
| 5.2.2 | Feuchtigkeitsverlauf an dem mittleren, einseitig angeschlossenen Sensorkabel | 16 |
| 5.2.3 | Feuchtigkeitsverlauf nach dreimonatiger Ruhezeit | 16 |
| 5.2.4 | Ausbau des Materials aus dem Druckbehälter | 16 |
| 5.3 | Auswertung nach dem Wassergehalt | 17 |
| 5.4 | Bewertung verschiedener Mischungsregeln..... | 18 |
| 5.5 | Vergleich der Feuchteniveaus aus der Laufzeitmessung und aus dem Rückbau..... | 20 |
| 5.6 | Abschätzung der einsetzbaren Sensorlänge | 21 |
| 5.7 | Beständigkeit der Sensorkabel | 21 |
| 6 | Zusammenfassung | 22 |
| 7 | Literatur..... | 24 |
| 8 | Anhang | 25 |

1 Vorhabensziele

Die Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen erfordert die Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien (UTD). Dazu gehört auch die Messung der Feuchteverteilung in Barrieren, die zur Erfassung des statischen Zustandes, zur Überwachung des ungewollten Zutritts von Lösungen von außerhalb und zur Datenerfassung für Langzeitanalysen erforderlich ist.

Als Dichtmaterial in solchen Barrieren werden vorwiegend Tone bzw. Bentonite verwendet, die durch ihr Quellvermögen bei Zutritt von Wasser oder Salzlösung die Abdichtung bewirken. Der Druck des Gebirges kann abhängig von der Teufe des Bauwerkes bis zu 25 Mpa (250 bar) betragen.

Bekanntes Feuchtemessverfahren sind hinsichtlich der Genauigkeit, der Zuverlässigkeit und der Erfassung eines volumenmäßigen Wassergehaltes unter den Bedingungen in einer UTD für einen längerfristigen Einsatz nicht geeignet.

Das Projektziel ist die Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung mittels eines dielektrischen Messverfahrens ([1] bis [3] und [5] bis [11]). Damit sollen Langzeitmessungen zur Feuchteüberwachung und zur Ausbreitung von Feuchtefronten möglich sein, unabhängig von der Art der zu lagernden Abfälle. Die Messungen sollen zerstörungsfrei mit der volumetrischen Erfassung der Feuchte konzipiert werden.

Die Eigenschaften von Bentonit als Dichtungsmittel für Abschlussbauwerke sind zu ermitteln und Modellrechnungen für die Messmethode aufzustellen, um das Verständnis der Vorgänge zu vertiefen und auf eine allgemeine Basis zu stellen. Das Vorhaben wird in Kooperation und in enger Abstimmung mit den Arbeiten der MFPA Weimar im BMBF-geförderten FuE-Vorhaben mit den Förderkennzeichen 02C0800/02C0810 ausgeführt. Das MFPA Weimar übernimmt die Materialuntersuchungen von verschiedenen Bentonitmaterialien unter Laborbedingungen sowie die sehr grundlegenden Modellberechnungen zur Entwicklung einer Messmethode. Außerdem erstellt sie ein Prognosemodell für die Feuchteausbreitung im Dichtelement.

Die Aufgabe des Forschungszentrums Karlsruhe ist es, eine dielektrische Feuchtemessmethode zu entwickeln und auf ihre Eignung bei der Detektion von Feuchtefronten in Bentonitschichten zu überprüfen. Dazu werden die hier entwickelten Sensoren in halbtechnischen, realitätsnahen Versuchen getestet.

2 Voruntersuchungen zur Entwicklung einer Messmethode

2.1 einfache Versuche mit Bentonit und Leitungswasser

Versuche im Labor mit Bentonitpulver und normalem Leitungswasser ohne Druck haben ergeben, dass sich nahezu sofort eine feuchte Zone im Bentonit an der Kontaktstelle ausbildet und der Quellvorgang in Gang gesetzt wird. Diese Dichtungszone ist sehr schmal (ca. 1 cm) und breitet sich im Verlauf von 10 Tagen nur noch unwesentlich über Diffusion aus.

2.2 einfache Versuche mit Bentonit und Salzlösung

Mit Salzwasser (gesättigte Lösung, >300 g/l) weitet sich die Feuchtefront im Bentonitpulver deutlich aus. Das Gemisch Bentonitpulver und Salzlösung bleibt flüssig und es bildet sich keine Dichtungszone aus. Nur in entsprechend hoher Verdichtung des Bentonits von über 1,6 g/cm³,

unter der Verwendung von gepressten Bentonitkissen (Dichte ca. 2 g/cm^3) und Bentonitgranulat, reicht der Quelldruck aus, um eine Dichtwirkung zu erzielen.

2.3 Optimierung der Sensorkabel

Die in das Dichtungsbauwerk eingebrachten Sensoren dürfen kaum Volumenanspruch haben und die natürliche Hydraulik des Materials nicht beeinflussen; demgegenüber steht der Anspruch auf eine feinvolumige Messwertauflösung. Sie dürfen durch die Druckeinwirkung und den Kontakt mit der gesättigten Salzlauge in ihrer Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden sollen ihre Messfähigkeit über lange Zeiträume behalten.

Der eigentliche Sensor wird als passives, feuchteempfindliches Flachbandkabel ausgeführt, mit dem der Dielektrizitätskoeffizient (DK) des Materials gemessen wird, in dem es eingebettet ist. Grundlage zur Entwicklung dieser Sensoren bilden die Patente 19501196 DE, 19755052 DE und 19833331.5 DE vom Forschungszentrum Karlsruhe. Mit solchen Sensoren soll der volumetrische Wassergehalt des Bentonits unabhängig vom Druck durch Frequenz- oder Zeitbereichsmessungen bestimmt werden. Mit der Anwendung von Feldsimulationen für den Einsatz von Feuchtesensoren in stark verlustbehafteten Materialien werden die Sensoreigenschaften optimiert. Laboruntersuchungen in Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Verlusten verifizieren die hohe Sensitivität sowohl im Bereich niedriger dielektrischer Verluste (geringer elektrischer Leitfähigkeit), als auch in einer Umgebung mit hoher elektrischer Leitfähigkeit.

2.4 Messungen im Frequenzbereich

Im Frequenzbereich werden Messungen zur Bestimmung der Feuchte in einem möglichst breiten Frequenzumfang (<100 MHz bis 1000 MHz) zur Erfassung der dielektrischen Eigenschaften des umgebenden Materials durchgeführt. Laboruntersuchungen an Bentonitmaterialien haben ergeben, dass für die Messung in salinärer Umgebung mit ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit, bzw. dielektrischen Verlusten, nur der Frequenzbereich zwischen etwa 500 und 1000 MHz übrig bleibt. Darunter sind die Messergebnisse nur sehr eingeschränkt zu verwenden. Das Wasser setzt aus dem Bentonit gelöste Ionen frei, dadurch erhöhen sich seine elektrische Leitfähigkeit und damit seine dielektrischen Verluste (Imaginärteil des komplexen Dielektrizitätskoeffizienten (DK)) deutlich. Ist die Güte, das ist das Verhältnis des Realteils zum Imaginärteil des DK, kleiner als 1, führen die üblicherweise benutzten Mischungsregeln (Verknüpfung des DK mit dem Wassergehalt) zu unakzeptablen Fehlern. Schon eine Befeuchtung von 25 % mit Leitungswasser ergab eine Güte in dem Frequenzbereich von 0,6, mit einer Salzlösung sinkt der Wert deutlich ab.

Die Ergebnisse der Bentonitsorten Calcigel und MX80 unterscheiden sich nur wenig voneinander, bei Calcigel mit 25 % Leitungswasser betragen die Einschränkungen im Frequenzbereich 100 bis etwa 300 MHz.

Für eine Lokalisierung der Wasserfront durch die Anwendung der Fouriertransformation reicht das nicht aus. Die fehlenden niederfrequenten Komponenten im Messsignal würden die Rekonstruktion der Feuchte entlang des Kabels nur in einem sehr groben Maßstab erlauben. Aus diesem Grund wurde auf die weitere Anwendung der Frequenzbereichsmethode verzichtet und nur die Zeitbereichsmethode weiterverfolgt.

Die Änderung des DK gegenüber Temperaturänderungen ist in dem Frequenzbereich von 300 bis 1000 MHz klein und modellierbar. So ändert sich z.B. bei einem volumetrischen Wassergehalt von 30 % des DK nahezu linear von 30 auf 40, wenn die Temperatur um 40 Kelvin ansteigt.

2.5 Messungen im Zeitbereich

Das TDR-Verfahren (Time Domain Reflectometry) stammt aus dem Bereich der Fehlerortung in Elektrokabeln. Es basiert auf der Messung der Laufzeit und der Amplitude eines in eine Leitung eingespeisten und am Kabelende reflektierten Signals und wird sehr häufig zur Bestimmung der Bodenfeuchte angewendet. Die Laufzeit korreliert dabei mit dem Realteil des Dielektrizitätskoeffizienten des Materials, das die Leitung umgibt, während die Amplitude mit dem Imaginärteil des DK verbunden ist und auf die dielektrischen Verluste im Material reagiert. Entsprechend der Anstiegszeit und der Impulslänge kann mit dem Messsignal ein breites Frequenzspektrum zugeordnet werden.

Das Verfahren kann zusammen mit den im Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Sensorkabeln volumenhaft die dielektrischen Eigenschaften in der Umgebung erfassen. Durch die Laufzeitmessungen sind Fehlereinflüsse aufgrund von Temperatur und Salzgehalt auf das Messsignal gering. Nachteilig ist dabei die Dichteabhängigkeit des Messverfahrens. Die maximale Länge der Sensorkabel ist begrenzt durch die starke Dämpfung der Signale in einem Material mit hoher elektrischer Leitfähigkeit. Die Zeitauflösung der Messung sinkt stark ab, da besonders die höherfrequenten Anteile im Messsignal abgeschwächt werden.

Versuche im Labor zeigen eine gute Auflösung sowohl hinsichtlich der Feuchte im Bentonitmaterial als auch der örtlichen Auflösung.

2.6 Konzeption eines Messsystems

Damit beschränkt sich ein Messsystem zur Feuchtemessung auf ein TDR-Messgerät, die Sensorkabel, eventuell einen Kabelumschalter (Multiplexer) zur Beaufschlagung mehrerer Sensorkabel mit einem Messsignal und die notwendige Ansteuerungssoftware auf einem Messrechner (*Bild 1*). Die Einzelkomponenten dazu wurden beschafft und zu einem Messsystem zusammengeschaltet. Die notwendige Software zur Steuerung des TDR-Messgerätes und zur Übernahme der Messdaten wurde entwickelt und an die Gegebenheiten der Versuchsaufbauten angepasst.

3 Aufbau der halbtechnischen Versuche BRA1 und BRA2

3.1 Aufbau der Bentonitschichten im Druckbehälter

Die praktische Umsetzung der halbtechnischen Versuche nach den Vorgaben des Forschungszentrums Karlsruhe mit dem Einbau der Dicht- und Kontrollschichten und der Messeinrichtung in einen Druckbehälter führte die Bergakademie/TU Freiberg in ihrer Technikumshalle aus (*Bild 2*). Der Druckbehälter hat einen Innendurchmesser von 0,8 m und eine nutzbare Höhe von 1,8 m.

Ein erster, im Januar und Februar 2002 betriebener halbtechnischer Versuch, zeigte die prinzipielle Anwendung der Messtechnik mit dem TAUPE-Feuchtemesssystem. Aus diesen Erfahrungen heraus wurde ein zweiter Versuch aufgebaut und von April bis Dezember 2002 durchgeführt.