

Forschungsvorhaben

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

Förderkennzeichen 02C0800

Abschlussbericht Teil I

Institution: Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar

Projektleiter: Dr.-Ing. Klaus Kupfer

Unterauftragnehmer
IBEWA Freiberg: Dr.-Ing. Th. Wilsnack

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 01. 2004

Förderkennzeichen 02C0810

Abschlussbericht Teil II

Institution: Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Projektleiter: Dr.-Ing. A. Brandelik

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

Forschungsvorhaben

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

Teil I

Förderkennzeichen 02C0800

Abschlussbericht

Projektleiter: Dr.-Ing. Klaus Kupfer

MFPA Weimar: Dr.-Ing. Klaus Kupfer
Dipl.-Ing. E. Trinks
Dipl.-Ing.(FH) Th. Keiner
Dipl.-Geophys. Th. Schäfer

Unterauftragnehmer: Prof. Dr.-Ing. C. Hübner

Unterauftragnehmer
IBEWA Freiberg: Dr.-Ing. Th. Wilsnack
Dipl.-Math. S. Boy

Unterauftragnehmer
TU BA Freiberg: Dr.-Ing. M. Gruner
Dipl.-Ing. W. Gaßner

Laufzeit des Vorhabens: 01. 11. 2000 – 31. 01. 2004

Institution: Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
Amalienstr. 13; 99425 Weimar

Weimar, 29. 7. 2004

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C0800 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Entwicklung einer Messmethode zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinarer Umgebung - Teil I

Kurzfassung

Das vorliegende Vorhaben ist dem FuE-Programm des BMBF „Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ zugeordnet und hat Bezug zu den Themenkreisen B4 Verhalten geotechnischer Barrieren sowie B6 Methodenentwicklung und Rechenprogramme für Sicherheitsbewertungen.

Für die Anwendung dielektrischer Messverfahren zur Feuchtebestimmung sind Untersuchungen der Materialeigenschaften vom Verschlussmaterial in salinarer Umgebung und unter den Einflüssen von Druck und Temperatur notwendig. Das Vorhaben dient der Weiterentwicklung von Konzepten zur Kontrolle von langzeitfunktionsfähigen und langzeitsicheren Streckenverschlussbauwerken.

Die Voraussetzungen für das Vorhaben werden im Kapitel 1 vorgestellt.

Die Messung der Feuchteverteilung in nachsorgefrei konzipierten Bauten ist sowohl für die Bewertung des statischen Zustandes, für die nicht bestimmungsgemäße Entwicklung von Lösungszutritten, aber auch für die Datenerfassung von Langzeitsicherheitsanalysen dringend notwendig, auch bei der Beibehaltung der Aufgabe, ein passives System ohne Kontrolle zu schaffen. Da Langzeiterfahrungen fehlen, ist eine messtechnische Kontrolle unter Einbeziehung von Störgrößen über einen relativ langen Überwachungszeitraum unerlässlich. Diese messtechnische Begleitung ist nicht nur für die Qualitätssicherung bei der Bauabnahme erforderlich, sondern sie wird auch den Zeitpunkt der Entlassung aus der Überwachungsphase bestimmen und diese voraussichtlich wesentlich verkürzen.

Die messtechnisch erfassbaren Parameter quellender Materialien sind zeitlich und örtlich veränderlich. Starre Elektroden kommerziell verfügbarer Messgeräte sind zur Messwerterfassung für die auftretenden Quell- und Schwindbewegungen von Bentonit nicht geeignet. Messtechnische Untersuchungen zeigten, dass Genauigkeit und Zuverlässigkeit bekannter Feuchtemessverfahren für den hier definierten Einsatzfall zu gering sind (Kap. 1.2).

Gegenstand des Vorhabens war die Entwicklung von Messmethoden, die es erlauben, ein dielektrisches Messsystem mit flexiblen Elektroden für die Feuchtemessung am Verschlussmaterial Bentonit in salinarer Umgebung einzusetzen, mit dem die beschriebenen Nachteile umgangen werden können. Der eigentliche Sensor wurde als passives, feuchteempfindliches Flachbandkabel ausgeführt, mit dem über die Impulslaufzeit die Dielektrizitätskonstante (DK) des umhüllenden Materials gemessen wurde. Grundlage zur Entwicklung dieser Sensoren bildeten die Patente 19501196 DE, 19755052 DE und die Anmeldung 19833331.5 DE vom FZ Karlsruhe.

Das Vorhaben wurde im Zeitraum von 12/2000 bis 1/2004 durchgeführt und war in folgende Arbeitspakete gegliedert (Arbeitsplan s. Kap. 1.1):

- AP1. Konzeption der Messsysteme für Zeit- und Frequenzbereich, Versuchsplanung
- AP2. Materialuntersuchungen von verschiedenen Bentonitmaterialien unter Laborbedingungen mit dem NWA

- AP3. Modellberechnungen zur Entwicklung einer Messmethode
- AP4. Entwicklung eines TDR-Messsystems
- AP5. Messungen im Frequenzbereich
- AP6. Detektion von Feuchtefronten
- AP7. Test der Kabelsensoren in halbtechnischen Versuchen unter realitätsnahen Bedingungen
- AP8. Prognosemodell (für Feuchteausbreitung im Dichtelement)

Die Vorhaben 02C0800 / 020810 wurden von der MFPA Weimar, AG Feuchtemessverfahren, im Verbund mit der Arbeitsgruppe Aquametry von Herrn Dr. Brandelik vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Forschungszentrums Karlsruhe durchgeführt. Das Projekt 02C0810 vom Forschungszentrum wurde als eigenständiges Thema realisiert; die Beschreibung befindet sich im Teil II. Die Problemstellungen zum Test der Kabelsensoren unter realitätsnahen Bedingungen AP 7 und Prognosemodelle AP 8 wurden als Unterauftrag von der IBeWa-Ingenieurpartnerschaft und dem Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg bearbeitet. Die Projektleitung wurde von der MFPA Weimar (Dr. Kupfer) übernommen.

Im Kapitel 2 wurden mineralogische Untersuchungen beschrieben, die zur optimalen Anpassung von Sensoren an das Material dienen. Die Bestimmung der mineralogischen Eigenschaften erfolgte mit Differenzthermoanalyse, Röntgendiffraktometrie, Infrarotspektroskopie und Elektronenmikroskopie.

Vom analysierten Probenmaterial wurden folgende Tonmineral/Phyllosilikat-Paragenesen nachgewiesen (Tab. 2.1):

- Calcigel: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer + Kaolinmineral + Chlorit
- MX 80: dioktaedrischer Smektit + Illit/dioktaedrischer Glimmer

Bei der Elektronenmikroskopie konnte festgestellt werden, dass die Blättchenstruktur des Bentonits durch den Einfluss von hochkonzentrierten Salzlösungen verkrustet wird, die Aufnahme von Zwischenschichtwasser wird reduziert (vgl. Bilder 2.9-12 und Bilder 2.17-20)¹.

Die dielektrischen Eigenschaften von Bentoniten wurden durch Verwendung eines Netzwerkanalysators, einer koaxialen Messleitung und einer offenen Koaxialsonde in einem breiten Frequenzbereich charakterisiert (Kapitel 3). Mit diesen Messungen wurde es möglich, äußere Einflüsse (z.B. Temperatur (Bilder 3.11, 3.12)) sowie Einflüsse von Materialeigenschaften (Salzgehalt) auf das Messergebnis zu spezifizieren und Sensoren zu optimieren.

Die Bestimmung der komplexen Dielektrizitätskonstante (DK), wie Realteil der DK und Verlustfaktor sind die Grundlage für die Berechnung von Sensormodellen mit dem Finite Elemente Programm HFSS (Bilder 3.8, 3.10).

¹ Bezeichnete Kapitel, Bilder, Gleichungen und Tabellen beziehen sich auf den Gesamtbericht.

Schnellbestimmungen des Feuchtegehaltes mit Oberflächensensoren (Bild 4.6) an einem Bohrlochschachtverschluss bei Salzdetfurth und an Bentonitproben eines Streckenverschlussbauwerkes Sondershausen werden im Kapitel 4 gezeigt. Referenzmessungen wurden zum Feuchtegehalt und zur Leitfähigkeit durchgeführt. Die Leitfähigkeit von Eluatproben zeigte eine gute Korrelation ($BM = 0,977$) über dem Feuchtegehalt (Bild 4.9). Die Messwerte von Resonanzfrequenz und Bandbreite zeigten beim 150 MHz-Sensor starke Streuungen über dem Feuchtegehalt. Die Messung mit E-Feld- und H-Feld-Sensoren bei 2,45 GHz ergab bei Quotientenbildung von Differenzbandbreite und Differenzresonanzfrequenz recht hohe Bestimmtheitsmaße der Kalibrierkurven ($> 0,83$) (Bild 4.27).

Im Kapitel 5 werden die Grundlagen des TDR-Messverfahrens vorgestellt. Bei der Betrachtung der Leitungsparameter wurde mit Modellrechnungen gezeigt, dass das Kabel weiter optimiert werden sollte. Bei hohen Frequenzen zeigt der Skineneffekt starke Wirkung (Bild 5.9); die Ströme fließen vor allem an den Außenkanten des Leiterquerschnittes. Durch mathematische Ableitungen konnte der Zusammenhang zwischen Leitungsparametern, Dämpfungs- und Phasenmaß sowie Impulslaufzeit und Ionenleitfähigkeit ermittelt werden (Gln. 5.7, 5.11).

Die Impulslaufzeit bei TDR-Sensoren ist abhängig von der DK; je feuchter ein Material, desto größer ist die Impulslaufzeit (Bild 5.12). Bei Erhöhung des Salzgehaltes wird bis zu einem bestimmten Maß der Anstieg der Impulsflanke reduziert (Bild 5.13). Mit steigender Temperatur wird die DK und damit die Laufzeit reduziert (Bild 5.15). Zur genauen Bestimmung der Impulslaufzeit wurde ein Messverfahren entwickelt, das die erste und zweite Ableitung an den Wendepunkten der Kurve nutzt (Bild 5.11).

Anforderungen und Berechnungen stark verlustbehafteter Leitungen mit einem Simulationsprogramm werden im Kapitel 6 durchgeführt.

Anforderungen anwendungsnaher Modellrechnungen:

- Darstellung und Berechnung des Sensors
- Berechnung des Sensors umgeben mit verlustbehafteten Materialien
- Berechnung in einem Frequenzbereich, der einer Impulsbreite von 200 ps entspricht (DC – 12,5 GHz)
- Umwandlung der im Frequenzbereich ermittelten Ergebnisse in den Zeitbereich und Bestimmung der Sprungantwort

Diese Anforderungen werden vom 3D-Finite-Elemente-Programm HFSS (Hochfrequenzstrukturanalysator) der Fa. Ansoft erfüllt.

Kalibrierungen bei der Feuchtemessung sind sehr zeitaufwendig, vor allem dann, wenn bei der Erhöhung der Feuchte beim Bentonit gleich mehrere Materialparameter gleichzeitig geändert werden (Feuchte, Dichte, Ionengehalt). Geringfügige Änderungen des Sensors zur Anpassung an das Material sind bei Kalibrierungen mit aufwendigen Neukonstruktionen und Erprobungen verbunden.

Simulationen haben bei der Feuchtemessung den Vorteil, dass bestimmte Eigenschaften in relativ kurzer Zeit hervorgehoben oder unterdrückt werden können. Mit Hilfe eines EM-Feldsimulators wird es möglich, Spezifika des Sensors oder des Materials aus der Datenvielfalt heraus zu filtern und Sensoren zu optimieren.

Bei der Simulation wurde zunächst der Sensor konstruiert, Materialparameter (Bild 6.7), Grenzen und Lösungsparameter (Tab. 6.1) eingegeben und das Modell schrittweise berechnet. Grenzen bedingt durch unzureichenden RAM-Bereich des Computers entstanden bei hohen Feuchtwerten und bei hohen Frequenzen.