

TDR-Messverfahren zur Quantifizierung von Feuchte- und Dichteverteilungen für den Einsatz in Verschlussbauwerken

Problemstellung

Nicht verwertbare und überwachungsbedürftige Abfälle werden nach der TA Abfall in der Bundesrepublik Deutschland in Untertagedeponien entsorgt.

Die Deponie-Systeme sollen so konzipiert werden, dass sie nach der Betriebsphase relativ schnell aus einer Überwachungsphase entlassen werden können. Die Langzeitisolation vom äußeren Biozyklus wird durch geotechnische Ton-/Bentonit-Barrieren realisiert.

Der Fall eines angenommenen Flüssigkeitszutritts zu einem Bentonitdichtelement wurde bisher messtechnisch nicht ausreichend untersucht. Unter In-situ-Bedingungen ist im Salinar der Flüssigkeitszutritt der Ausnahmefall und sein Zeitpunkt nicht vorhersehbar.

Gegenstand des Projektes

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. Im Rahmen der Bearbeitung des Projektes „Entwicklung eines Messsystems zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung“ konnte festgestellt werden, dass es mit **TDR-Kabelsensoren** möglich ist, Feuchteprofile kontinuierlich zu erfassen. Es zeigte sich auch, dass für die Quantifizierung der messtechnisch erfassten Kennwerte (Kalibrierung), deren Reproduzierbarkeit sowie für die Erfassung von Störgrößen ein relativ hoher Aufwand erforderlich ist.

Bei der TDR-Messung ist das Messsignal (Impulslaufzeit) von folgenden Größen abhängig:

- Feuchte
- Salzgehalt
- Dichteunterschiede
- Temperatureinflüsse
- Ankopplung des TDR-Sensors an das umgebende Material.

An der glatten Oberfläche des Kabels kann bei nicht sachgemäßem Einbau ein Lösungsfortschritt am Kabel entstehen, der die Dichtheit des Verschlussbauwerkes in Frage stellt. Simulationsrechnungen während des o.g. Projektes ergaben, dass dünne Luft- oder Wasserschichten am Kabel die TDR-Messsignale prägnant verändern können.

Die Anwendungsuntersuchung des TDR-Messsystems und die darauf basierende Weiterentwicklung können in geotechnischen Barrieren zur genaueren Detektion von Feuchte- und Dichteverteilungen, d.h. zur Kennwertermittlung für die Kalibrierung und Validierung von hydraulischen Modellen bzw. für deren Unsicherheitsanalysen genutzt werden. Modelle bilden zur Zeit die einzige Ausgangsbasis für langzeitsichere Verschlussbauwerke.

Die Weiterentwicklung des TDR-Systems auf Grundlage der Erkenntnisse, die im Rahmen der Anwendungsuntersuchung und in halbtechnischen Versuchen gewonnen werden, dienen der Verifizierung des Messsystems für den Einsatz in Versuchsbauwerken. Die Weiterentwicklung des TDR-Messsystems, die in Versuchsbauwerken gewonnenen Parameter und die darauf basierenden Ergebnisse der Modellbildungen sind Voraussetzungen für einen zuverlässigen Einsatz beim Monitoring in Verschlussbauwerken.

Der Einsatz des TDR-Messsystems ist sehr universell möglich und kann in den oben aufgeführten Förderschwerpunkten sowohl in Untertagedeponien, im Endlagerbereich als auch im Wirtsgestein erfolgen.

Bisherige Forschungsergebnisse

In dem vom BMBF geförderten Vorhaben „Entwicklung eines Messsystems zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung“ konnten durch Simulationen und experimentelle Untersuchungen mit dem TDR-Messsystem folgende Nachweise erbracht werden:

- Feuchteverteilung und Dichteunterschiede längs einer Messleitung sind erfassbar; eine genaue Unterscheidung beider Größen sowie Quantifizierung und Ortsauflösung sind Gegenstand des Folgeprojektes
- Ioneneinflüsse beeinflussen das Messsignal, d.h. sie reduzieren den Anstieg der Sprungantwort und könnten auf diese Weise bestimmt werden.
- Kalibrierungen der TDR-Messleitung an Natriumbentonit (MX 80)-Sand-Gemischen und Calciumbentonit (Calcigel)-Sand-Gemischen mit Wasser und Salzlösungen erfolgten experimentell und mit Simulationen.
- Halbtechnische Versuche erfolgten bei Drücken bis 100 bar mit binärem Bentonit-Gemisch und Bentonit-Formsteinen mit Süßwasser (Referenzfall) sowie mit NaCl-Lösung sehr hoher Konzentration (Steinsalzlösung-250g/l).
- In diesen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass bei sorgfältigem Einbau in binäres Bentonitgemisch bei Drücken bis zu 100 bar kein Lösungsfortschritt am Kabel auftritt; bei Verwendung von Bentonit-Formsteinen müssen noch verschiedene Einbaumethoden getestet werden.
- Einflüsse von dünnen Luft- und Wasserschichten am Kabel auf das Messsignal konnten sowohl mit Simulationen als auch messtechnisch bestimmt werden
- Feuchtefronten können in gequollenen Bentonitschichten in verschiedenen Messapparaturen bei Drücken von maximal 40 bar bzw. 100 bar detektiert werden; hier wäre eine Unterscheidung von Feuchte und Dichte sowie eine Rekonstruktion mit Ortsdiskretisierung erforderlich.
- Die Berechnung von Modellen mit dem EM-Feldsimulator HFSS führte zu einem Quantensprung bei der Rekonstruktion der Feldverteilung des Sensors im Bentonit. Das Programm hat den Vorteil, dass die mit dem Netzwerkanalysator ermittelten Materialkennwerte in einem breiten Frequenzbereich von 1 MHz – 12,5 GHz in das Modell eingelesen werden können. Das Modell wird in diesem Frequenzbereich berechnet und mit einer FFT in den Zeitbereich transformiert. Der breite Frequenzbereich ist erforderlich, da der TDR-Signalgenerator Impulsanstiege von 200 ps erzeugt. Da Kalibrierungen in der Praxis sehr zeitaufwendig und störanfällig sind, wurden Simulationen eingesetzt, um bestimmte Eigenschaften in relativ kurzer Zeit spezifisch zu verändern. So war es z.B. sehr gut möglich, den Einfluss eines dünnen Luft- oder Wasserfilms auf dem Kabel zu berechnen.

Gesamtzielstellung

Für die Dimensionierung von Verschlussbauwerken sowie für den Nachweis ihrer Dichtheit ist es erforderlich, die Feuchteausbreitung messtechnisch zu quantifizieren und zu prognostizieren. Dies erfolgt in der Regel durch hydraulische Modellrechnungen, deren Eingangsgrößen meist auf theoretischen Ansätzen und Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab basieren. Die Aussagesicherheit der verwendeten hydraulischen Modelle kann nur durch Kalibrierungen mit den in realitätsnahen Experimenten (halbtechnische und In-situ-Versuche) ermittelten Ergebnissen gewährleistet bzw. der Realität angenähert werden. Eine räumliche und zeitliche Detektion der Flüssigkeitsausbreitung kann mit relativ hoher Genauigkeit auch in Versuchsbauwerken erfolgen. Im Rahmen der Bearbeitung des Projektes „Entwicklung eines Messsystems zur Feuchtemessung in Bentonit-Abschlussbauwerken in salinärer Umgebung“ konnte festgestellt werden, dass der Einsatz eines **TDR-Kabelsensor-Messsystems** erstmals eine technologisch und ökonomisch vorteilhafte Lösung zur ortsdiskreten und kontinuierlichen Feuchtebestimmung für Bentonitverschlussbauwerke auch unter dem Einfluss von Salzlösungen und Drücken bis 100 bar ermöglicht.

Zur weiteren Erhöhung der Genauigkeit bei der Bestimmung der Flüssigkeitsausbreitung in Bentonitdichtelementen soll das TDR-Verfahren mit Kabelsensoren analysiert und weiterentwickelt werden. Umgebungseinflüsse sollen durch Laboruntersuchungen sowie halbtechnische Versuche realisiert werden, die den Einbauzustand unter In-situ-Bedingungen simulieren und eine realitätsnahe Bewertung der verschiedenen Belastungsszenarien ermöglichen.

Um auf Grundlage gestörter Messwerte (u.a. Dichteveränderungen, Sensorverformungen) Modellkalibrierungen durchführen zu können, ist es erforderlich, das Messverfahren unter Einbeziehung einer Vielzahl in der Praxis vorkommender Störgrößen zu analysieren, weiter zu entwickeln und die Messunsicherheit des Verfahrens zu reduzieren.

Ein Ziel des Vorhabens ist es, die Einsatzreife des TDR-Messsystems zur Überwachung von Bentonitversuchsbauwerken zu erhöhen. Es soll prinzipiell für alle geotechnischen Barrieren in Schacht-, Strecken- und Bohrlochverschlüssen sowohl im Hartgestein als auch im Salinar einsetzbar sein. Die über die Kabelsensoren gemessenen Feuchteprofile sollen die Bewertung des Anfangszustandes, das Einsetzen von Lösungsfortschritten sowie das Erkennen und Signalisieren gefährlicher Zustände für das Bauwerk ermöglichen. Für eine zuverlässige Funktionsfähigkeit unter den rauen Umgebungsbedingungen des Bergbaus sind u.a. folgende Voraussetzungen erforderlich:

- Bestimmung der Messunsicherheit bei Veränderung der Materialeigenschaften (Dichteveränderung bei Kompaktion und/oder Auflockerung; Veränderung der Lösungszusammensetzungen; Veränderung der Sättigung; Verformungen des Sensors)
- mechanische Belastbarkeit des Sensors durch Zugkräfte als Folge von Materialveränderungen
- Nachweis der Praxistauglichkeit
- Methode muss bei Drücken bis ca. 10 MPa einsetzbar sein
- Messverfahren muss über Dekaden ausfallfrei arbeiten

Bei ihrem künftigen Einsatz können die Sensoren sowohl in einem für die Standsicherheit maßgebenden Querschnitt, aber auch an den Grenzen des Versuchsbauwerkes eingebaut werden. Im Vordergrund steht dabei die Entwicklung einer auf gemessenen Feuchteverteilungen basierenden Gesamtstrategie zur Modellierung und zur Konzipierung, Dimensionierung sowie Prognose und Bewertung der Funktionssicherheit von Abschlussbauwerken.

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ist eine enge Zusammenarbeit der Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar (Projektleitung) und der TU Bergakademie Freiberg sowie der IbeWa-Ingenieurpartnerschaft Freiberg als Unterauftragnehmer verein-

bart. An der MFPA Weimar sollen die messtechnischen Voraussetzungen geschaffen und weiterentwickelt werden, während die Bergakademie Freiberg die geotechnischen/bergbautechnischen Teilaufgaben bearbeiten soll. Die numerischen Simulationen werden durch die IBeWa-Ingenieurpartnerschaft realisiert.

Die Möglichkeit der Detektion von Feuchte- und Dichteunterschieden im Dichtmaterial sowie deren zeitliche Entwicklung in Abhängigkeit von der Auflast kann als Grundlage für weitere Modellrechnungen dienen, in denen die Veränderungen der Eindringraten und Permeabilitäten aufgrund dieser Dichteunterschiede berücksichtigt werden.

Am Ende des Projektes soll ein kostengünstiges TDR-Messsystem unter Verwendung von Kabelsensoren eine mehrdimensionale Verteilung der Feuchte und Dichte im Verschlussbauwerk aufzeichnen. Mit diesem Gerätesystem soll die Einsatzreife für ein Monitoringssystem weiter erhöht werden. Auf Grundlage gemessener Feuchte- und Dichteverteilungen sollen mit hydraulischen Modellen Bewertungskriterien für Funktionssicherheit und für Dimensionierung von Verschlussbauwerken erarbeitet werden. Ein Prognosemodell soll helfen, Langzeitsicherheitsanalysen zu unterstützen.