

Erfolgskontrollbericht zum Fördervorhaben 02C1214

Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar - Hauptprojekt

1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Der Bund fördert seit über 10 Jahren anwendungsbezogene Grundlagenforschung zu Verschlussmaßnahmen für Untertagedeponien und Endlager. Während mit erfolgreichem Abschluss des FuE-Vorhabens „Schachtverschluss Salzdetfurth II“ in 2002 nach dem Stand von Wissenschaft und Technik ein langzeitsicherer Schachtverschluss vorliegt, besteht für horizontale Streckenverschlussbauwerke noch Forschungsbedarf.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes erfolgte eine Weiterentwicklung eines Magnesiabindersystems, das erfolgreich als Strömungsbarriere (K-UTEC-Rezeptur 29.6 A2) auf dem Forschungsbergwerk Asse eingesetzt wird, hin zu einem Verschlusselement im Salinar mit entsprechenden geomechanischen und hydraulischen Kennwerten.

2 Wissenschaftlich-technischer Erfolg des Vorhabens

Der vorliegende Schlussbericht umfasst folgende Aufgabenschwerpunkte:

- Weiterentwicklung des Strömungsbarrieresystems auf der Basis eines Magnesiabinders zu einem Verschlusssystem
- Untersuchungen zur Beeinflussung des Quellverhaltens und der Möglichkeit der Reduzierung der Abbindetemperatur
- Erprobung optimierter Systeme in einer kleintechnischen Versuchseinrichtung

Wesentliche Forschungsergebnisse der Verbundpartner *Bauhaus-Universität Weimar* und *Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig* wurden in den Schlussbericht mit aufgenommen.

Auf der Grundlage numerischer Modellrechnungen wurden von der Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) die mechanischen Anforderungen und Eigenschaften eines Dichtelements postuliert. Als geomechanische Zielvorgabe galt die Entwicklung eines steifen Materials mit Ersatzkompaktionsmoduln im Bereich von 1 bis 2 GPa. Besondere Anforderungen an die Festigkeit bzw. an das deviatorische Kriechverhalten der Magnesiabindersysteme, die über die bekannten Eigenschaften hinausgehen, waren nicht zu stellen.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse umfangreicher Voruntersuchungen zu MgO-Qualitäten und zur Sorelphasenbildung wurde die Entwicklung der Rezepturen für ein Verschlussbauwerk aufge-

nommen. Zunächst wurden an einer Standardrezeptur (DBM 1) wesentliche geomechanische Kennwerte ermittelt, aus denen ein Ersatzkompaktionsmodul von 1,3 GPa abgeleitet wurde. Das vorgegebene Zielfeld wurde damit erreicht.

Da aufgrund der Maßstabsübertragung (Laborwerte → großtechnische Anwendung) mit geringeren Steifigkeiten gerechnet werden muss, erfolgte ein weiterer Rezepturausbau. Insgesamt wurden 4 Rezepturen entwickelt, die folgenden Grundaufbau haben:

- DBM 1:** Standardrezeptur (Hauptbestandteile Quarzsand, Anhydritmehl)
- DBM 2:** modifizierte Standardrezeptur unter Zusatz von Microsilica mit hoher Steifigkeit
- DBM 3:** Steinsalzdominierte Rezeptur mit hoher Steifigkeit
- DBM 4:** Quarzmehldominierte Rezeptur mit hohem Quellvermögen und geringer Permeabilität

Die umfangreichen Kennwerte der einzelnen Rezepturen sind dem Schlussbericht zu entnehmen.

Unter Berücksichtigung verarbeitungstechnischer Eigenschaften (Verarbeitungszeit, Verpumpbarkeit, Ausbreitverhalten), der Reaktionstemperatur und des Quellverhaltens sowie geomechanischer und hydromechanischer Kennwerte wurden die beiden Dammbaumörtelsysteme DBM 2 und 3 präferiert. Die beiden Baustoffe weisen folgende qualitative Zusammensetzung auf:

| Einsatzstoff | Rezeptur DBM 2 | Rezeptur DBM 3 |
|--------------------|--|--|
| Bindemittel | MgO | MgO |
| Zuschlagstoffe | Quarzsand Anhydritmehl | Steinsalz Anhydritmehl |
| Zusatzstoffe | Microsilica Fließmittel | - Fließmittel |
| Anmischflüssigkeit | MgCl ₂ -Lösung (410 - 430 g MgCl ₂ /l) | MgCl ₂ -Lösung (370 - 390 g MgCl ₂ /l) |

Tabelle 1: Qualitative Zusammensetzung der Rezepturen DBM 2 und 3

Beide Baustoffsysteme sind auf eine Verarbeitungszeit von 2 Stunden ausgelegt. Die Mörtel neigen zur Thixotropie, sie sind verpumpbar mit Druckverlusten von 7 - 11 bar/100 Meter im laminaren Bereich. Die Fließmaße (Fließrinnenmaße) liegen im Bereich von 500 mm ± 20 mm, die Mörtel sind als nahezu selbstnivellierend mit Fließwinkeln von maximal 3° zu betrachten.

An den erhärteten Baustoffsystemen wurden umfangreiche Laboruntersuchungen zur Kennwertbestimmung durchgeführt und im Schlussbericht dokumentiert.

Als anwendungstechnisch bestimmende Kennwerte sollen nur die Werte, die im Rahmen des kleintechnischen Versuches im Kubikmeter-Maßstab als Rückstellproben bzw. aus Bohrkernen

gewonnen wurden, dargestellt werden. Diese Kennwerte sind als konservativ einzustufen, da wie sich nachträglich gezeigt hat, bei den kleintechnischen Versuchen nicht die optimale Mischtechnik zur Verfügung stand und der Materialaufschluss hinter den Laborwerten zurückblieb.

3 Schutzrechtsanmeldungen

Eine Schutzrechtsanmeldung ist übergeordnet für quellfähige Magnesiabindersysteme (Damm-
baumörtel und Injektionssysteme) am 07.03.2008 erfolgt.

4 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projekt- ende

Im Ergebnis dieses Forschungsprojektes steht ein anwendungsreifes Verschlusselement (DBM 2) zur Verfügung, das sowohl als horizontales als auch vertikales Verschlusselement im Salinar genutzt werden kann. Die auslegungsrelevanten Kennwerte und eine weiterentwickelte Nachweis-
methodik für horizontale Streckenverschlussbauwerke liegen vor.

Die vorliegende Entwicklung kann für Verschlussmaßnahmen für Untertagedeponien und Endlager genutzt werden.

Eine mögliche Anwendung als Verschlussbauwerk im Anhydrit wird konzeptionell vorbereitet.

Die mit Spannungsaufnehmern, Temperaturmessgebern, Feuchtesensoren und Stahldehnungs-
messgebern ausgerüstete Versuchseinrichtung wurde zügig verfüllt und die Messwerte kontinuierlich aufgezeichnet. Die Untersuchungen wurden nach einer Standzeit von 188 Tagen für DBM 2 und 218 Tagen für DBM 3 abgebrochen.

Folgende Versuchsergebnisse wurden erreicht:

- 10 - 12 Stunden nach dem Einbringen der Magnesiabindersuspension erfolgte die bekannte exotherme Abbindereaktion unter den besonderen Einbaubedingungen (60 °C-Begleitheizung) auf Temperaturen von 107 °C (DBM 2) bzw. 100 °C (DBM 3). Der reale Temperaturanstieg bezogen auf die Umgebungstemperatur beträgt 45 - 50 K.
- Der Abbindeprozess führte in den Versuchseinrichtungen zu einem Druckanstieg, der in der ersten Phase überwiegend der Thermospannung geschuldet ist. In einem zweiten Versuchsabschnitt (nach Abschalten der Begleitheizung) wurde der Druckanstieg durch die Quellung gesteuert, die sich auf einen konstanten Endbereich von 5 - 23 bar einpegelte. Die Druckeinspannung in radialer Richtung ist größer als in vertikaler Richtung. Die Druckverläufe sind in beiden untersuchten Dammbausystemen unterschiedlich.
- Die in den kleintechnischen Versuchen gefundenen Quelldrücke stimmen in Größenordnung mit den Laborwerten der Bauhaus-Universität Weimar überein.

- Als wesentliche Ursache für die Quellung wurde die Umwandlung der Sorelphase 5:1:8 ($5 \text{ Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$) in die thermodynamisch stabile 3:1:8-Phase ($3 \text{ Mg(OH)}_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{ H}_2\text{O}$) durch ESEM- und XRD-Untersuchungen nachgewiesen.

In Auswertung der Rückstellproben und der Bohrkerne wurden folgende wichtige geomechanische Kennwerte ermittelt:

| Probebezeichnung | Elastische Konstanten | | Scherfestigkeiten | | | Ersatzkompaktionsmodul [GPa] |
|-----------------------|-----------------------|------------------|---------------------------------|--------------------|----------------|------------------------------|
| | E-Modul [GPa] | Querdehnzahl [-] | einaxiale Druckfestigkeit [MPa] | Reibungswinkel [-] | Kohäsion [MPa] | |
| DBM 2 Rückstellproben | 20,6 | 0,21 | 56,8 (66,9*) | 29** | 17,5** | 1,4 - 1,8 |
| DBM 2 Bohrkerne | 21,7 | 0,17 | 61,8 | | | 0,8 - 1,4 |
| DBM 3 Rückstellproben | 12,6 | 0,22 | 29,7 (48,1*) | 29** | 8,9** | < 1 |
| DBM 3 Bohrkerne | 17,5 | 0,27 | 30,5 | | | |

* Messwerte K-UTEK, 28 d-Wert

** Mittelwerte

Tabelle 2: Geomechanische Kennwerte der kleintechnischen Versuche

Weitere abgeleitete Kennwerte aus Laborversuchen für die Modellrechnungen (Scher- und Zugfestigkeit im Kontaktbereich Dammbaumörtel - Salinar, Porosität, Laugensättigung u. a.) sind im Teilbericht des IfG dargestellt.

Die Untersuchungen zu den fluidmechanischen Eigenschaften führten zu folgenden Ergebnissen:

| Probebezeichnung | Gaspermeabilität [m ²] | Lösungspemeabilität [m ²] |
|------------------|------------------------------------|---|
| DBM 2 | $< 2,5 \cdot 10^{-19}$ | $2 \cdot 10^{-18}$ bis $< 1 \cdot 10^{-20}$ * |
| DBM 3 | $< 4,5 \cdot 10^{-18}$ | $9,0 \cdot 10^{-19}$ |

* zeitabhängige Reduzierung der Permeabilität durch Sekundärreaktionen

Tabelle 3: Fluidmechanische Eigenschaften

Zusammenfassend wird eingeschätzt, dass die geomechanische Zielstellung, einen Baustoff mit hoher Steifigkeit im Bereich $K_{\text{Ersatz}} = 1$ bis 2 GPa und guten Verbundeigenschaften zum Salinar zu entwickeln, mit der Rezeptur DBM 2 erreicht wurde. Darüber hinaus weist dieser Baustoff geringe

Lösungspermeabilitäten von $< 10^{-19} \text{ m}^2$ auf.

Im Rahmen des Forschungsverbundes wurden neue Erkenntnisse zu den Abbindemechanismen und zur Quellung der Magnesiabindersysteme gefunden, die weiterentwickelt werden sollten und zu einem besseren Verständnis dieser Spezialbaustoffe führen.

Mit der Durchführung und Auswertung der kleintechnischen Versuche und der Schaffung einer Datenbasis für weitergehende Modellrechnungen wurde der Grundstein für ein anwendungsfähiges Verschlusselement im Salinar gelegt.

5 Einhaltung des Finanzierungs- und Zeitplanes

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens erfolgt mit einer Verlängerung der Laufzeit um 6 Monate im Zeitraum vom 01.01.2005 bis 31.07.2007. Die Gesamtkosten der Vorkalkulation wurden eingehalten.