1 Tagungsbeiträge – Fachpublikationen

1.1

H.-J. Engelhardt[1], M. Heidmann-Ruhz[2], L. von Borstel[1], H. Räuschel[1], F. Rempel[2] und A. Carstensen[2]:

Strategie zur Entwicklung von Baustoffen

[1] *BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Deutschland*
[2] *Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), Peine, Deutschland*
Email: Joachim.Engelhardt@bge.de

Zusammenfassung

Für den Einsatz im Salinar werden Spezialbaustoffe benötigt, die für die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Standorts entwickelt werden müssen. Verfüll- und Abdichtmaterialien enthalten Salz, um Schädigungen des Wirtsgesteins durch Lösungen zu vermeiden. Die Entwicklung dieser Baustoffe erfordert die Durchführung eines umfangreichen Arbeitsprogramms, wobei ausgehend von den Anforderungen an den Baustoff Prüfkriterien und Anforderungen an die Ausgangsstoffe hergeleitet werden, wodurch das Baustoffsystem festgelegt ist. Der Umfang des Arbeitsprogramms kann erheblich vereinfacht und verkürzt werden, wenn ein Baustoff mit hinreichend hohem Korrosionswiderstand eingesetzt wird und bekannte Rezepturen als Grundlage genutzt werden. Charakteristisch für das Arbeitsprogramm ist eine Abfolge von klein- zu großmaßstäblichen Versuchen, um eine größere Realitätsnähe zu erzielen und eine Abfolge von kurzfristig durchführbaren zu zeitaufwendigen Untersuchungen, die die in-situ-Bedingungen abbilden.

Einleitung

Die Rahmenbedingungen eines Bergwerks im Salinar und des Endlagerbergbaus erfordert die Entwicklung von Spezialbaustoffen, die als Verfüll- oder Abdichtmaterial Salz enthalten. Im Bereich des klassischen Hoch- und Tiefbaus entwickelte Regelwerke sind zwar für die Entwicklung der Spezialbaustoffe hilfreich, aber nicht uneingeschränkt anwendbar. Demzufolge wurden für die Spezialbaustoffe neue Vorgehensweisen der Baustoffentwicklung bzw. des Mischungsentwurfs hergeleitet. Zwischenzeitlich steht bei der BGE und BGE TECHNOLOGY GmbH für den Endlagerbergbau im Salinar eine breite Palette an Rezepturen zur Verfügung, die als Verfüll- oder Abdichtmaterial eingesetzt

werden kann und es wurden umfangreiche Erfahrungen während ihrer Entwicklung und ihres Routineeinsatzes gewonnen. Hierzu zählen vor allem Salzbetone und Sorelbaustoffe. Ziel der Präsentation ist Grundlagen der Baustoffentwicklung von Verfüll- und Abdichtmaterialien im Salinar zu beschreiben und dabei die Besonderheiten hervorzuheben.

Ziele der Baustoffentwicklung

Eine Baustoffentwicklung oder ein Mischungsentwurf hat zum Ziel eine Baustoffrezeptur zu entwickeln, die spezifizierte Anforderungen erfüllt. Es werden Festlegungen zur Art der Ausgangsstoffe und zur Mischungszusammensetzung (Massenanteile der Komponenten) getroffen. Die Verarbeitung, d.h. das Mischen, Pumpen und Fördern in Rohrleitungen kann Eigenschaften eines Baustoffs beeinflussen. Im Vergleich zu klassischen Normalbetone werden Verfüllmaterialien nach dem Einbringen nicht verdichtet. Demnach sind ggf. auch Vorgaben zur Verarbeitung der Materialien zu treffen. Beim Arbeitsprogramm zur Entwicklung eines Baustoffs werden Materialeigenschaften bestimmt und die Messbefunde mit Anforderungen verglichen. Eine Baustoffentwicklung kann als eine spezielle Art einer Produktentwicklung angesehen werden.

Zudem können Daten zu Eigenschaften gewonnen werden, an die zwar keine Anforderungen bestehen, deren Kenntnis jedoch für weitere Auswertungen erforderlich sind. Aus den Messergebnissen können Abhängigkeiten der Eigenschaften von der Materialzusammensetzung gewonnen und Korrelationen von Eigenschaften hergeleitet werden. Diese Datensätze helfen ein gutes Verständnis des Baustoffverhaltens zu gewinnen und können beim Erstellen von Ausschreibungsunterlagen und für die Planung von Qualitätssicherungsmaßnahmen genutzt werden. Häufig können Anforderungen an einen Baustoff nicht direkt geprüft werden. In diesem Fall sind Prüfmethoden festzulegen oder zu entwickeln und Prüfkriterien (Grenzwerte) herzuleiten, die es erlauben die Konformität mit der Anforderung zu bewerten.

Das Arbeitsprogramm zur Entwicklung eines Baustoffs

Komponenten eines Baustoffs sind ein Bindemittel und eine Anmischlösung sowie bei Mörteln oder Betonen die Gesteinskörnung. Darüber hinaus beeinflussen Zusatzstoffe (inert oder reaktiv) und Zusatzmittel die Eigenschaften eines Baustoffs (vgl. DIN EN 206, VDZ 2014). Zu Beginn des Arbeitsprogramms sind die Ausgangsstoffe des Baustoffs auszuwählen und damit eine Entscheidung über das Baustoffsystem zu treffen. Dabei hat es sich gezeigt, bevorzugt Ausgangsstoffe des Bauwesens zu verwenden, z.B. aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit und der bereits bestehenden Qualitätssicherung.

Ein im Endlager eingebrachter Baustoff kann mit Gasen und Lösungen reagieren, wodurch sich die Eigenschaften des Baustoffs verändern. Bei einer Korrosion ist zu befürchten, dass Anforderungen an den Baukörper und den Baustoff dauerhaft nicht gewährleistet werden können. Demzufolge sollte ein Baustoffsystem genutzt werden, das über die geforderte Zeitdauer seine Funktion erfüllen kann. Diese Auswahl kann auf der Basis von Kenntnissen bekannter Baustoffe erfolgen, zumal jeder Baustofftyp charakteristische Eigenschaften aufweist. Hilfreich ist die Grundlagen des Baustoff-Familienkonzepts zu nutzen.

Grobe Partikel können nicht in kleine Hohlräume eindringen, jedoch erlaubt es grobe Gesteinskörnung bei Gewährleistung der Fließfähigkeit Rezepturen mit reduziertem Bindemittelanteil zu entwickeln und damit relativ geringer Wärmeentwicklung beim Erhärten. Aufgrund dieses Sachverhalts sind Verfüll- und Abdichtmaterialien Betone, wobei sich in den meisten Fällen der Einsatz von gebrochenem Steinsalz anbietet, um eine Halitsättigung der Baustofflösung zu erzielen.

Im nächsten Arbeitsschritt sind ersten Festlegungen zu den Mengenanteilen der Ausgangsstoffe zu treffen. Eine Fließfähigkeit erfordert einen Mindestabstand der Gesteinskörnung, so dass das Volumen der Feinkornsuspension größer sein muss als der Porenraum einer Schüttung der Gesteinskörnung. Die bisherigen Baustoffentwicklungen bieten den großen Vorteil, dass mit den dabei gewonnenen Kenntnissen Eigenschaften zahlreicher Rezepturen gut prognostiziert werden können. Sofern erste Testmischungen festgelegt wurden, können wichtige Eigenschaften wie die Wärme- und Temperaturentwicklung beim Erhärten abgeschätzt und mit den Anforderungen verglichen werden.

Grundlage des Erhärtens von Sorelbaustoffen ist die Reaktion von Magnesiumoxid oder Magnesiumhydroxid mit Magnesiumchloridllösungen. Es wird Wasser und gelöstes Magnesiumchlorid der Anmischlösung gebunden. Demnach ist die Anmischlösung ein Teil des Bindemittelsystems. Das Verhalten der Sorelbaustoffe wird nicht nur durch das Mengenverhältnis von Bindemittel zu Anmischlösung bestimmt, sondern auch von der Zusammensetzung der Anmischlösung. Diese Abhängigkeit kann genutzt werden die Eigenschaften des Baustoffs zu steuern. Dies ist ein charakteristischer Unterschied zu Salzbetonen, bei denen Zement und ggf. reaktive Zusatzstoffe mit einer nahezu reinen Natriumchloridlösung reagieren. Die Kapazität der Hydratationsprodukte Wasser zu binden ist relativ gering, so dass der Wasser-Zement-Wert kaum die Hydratationsprodukte, sondern das Porenvolumen beeinflusst.

Allgemein sind bei Verfüll- und Abdichtmaterialien für die Eigenschaften des Baustoffs relevante Eigenschaften der Ausgangsstoffe zu untersuchen sowie rheologische, thermische und Festmaterialeigenschaften, die in mechanische und hydraulische Eigenschaften gegliedert werden können. Weiterer Untersuchungsbedarf kann aus dem Arbeitsschutz, dem Gewässerschutz und dem Strahlenschutz resultieren. In der Regel beginnen die praktischen Arbeiten mit der Bestimmung rheologischer Parameter, weil Frischmaterialeigenschaften schnell ermittelt werden können.

Eine schnelle Durchführbarkeit ist vor allem gewährleistet, wenn geringe Baustoffmengen geprüft werden. So können im Labor viele Prüfungen bei geringem Kosten- und Zeitaufwand erfolgen. Die Eigenschaften eines Baustoffs wird jedoch durch Maßstabseffekte und Einflussgrößen beim Transport und beim Erhärten beeinflusst. Hierzu zählen beispielsweise ein Nachschereffekt (Nachmischeffekt) bei einem Rohrleitungstransport, ein Verlust von Luftporen oder Baustofflösung (Drainagelösung). Die Temperatur eines Baustoffs beim Erhärten wird vom Volumen und vom Verhältnis des Volumens zur Oberfläche beeinflusst. Um diese Effekte zu berücksichtigen, folgen bei einem Arbeitsprogramm auf den Laborprüfungen, Technikums- und in-situ-Untersuchungen. Diese Abfolge kann mit einer Modifizierung von Prüfverfahren und Anpassungen der Prüfkriterien gekoppelt sein.

Als Anforderung wird im Bereich der Baustofftechnologie ein Grenzwert zu einer Eigenschaft mit der Angabe eines Prüf-/Testverfahrens verstanden, während ein Prüfkriterium eine abgeleitete Größe ist. Eine Anforderung kann zum Beispiel ein Druckverlust beim Rohrleitungstransport sein und die Konformität kann mit Hilfe des Setzfließmaßes und dem Ausbreitmaß als Prüfkriterium bewertet werden. Bei der Baustoffentwicklung wird

nachfolgend für die Gesamtheit der Anforderungen und Prüfkriterien die Konformität bewertet. Diese Vorgehensweise kann graphisch verdeutlicht werden. So zeigt das linke Diagramm der Abb. 1 vereinfacht Konformitätsbereiche von Eigenschaften in Abhängigkeit des Zusatzstoff-Zement-Verhältnisses und dem Wasser-Zement-Wert (vgl. Engelhardt et al. 2015, 2018). Nach dem Eintrag sämtlicher Konformitätsbereiche verbleibt das weiße Feld des rechten Diagramms, in das unter Berücksichtigung von Eigenschaftsschwankungen der Punkt einer Referenzrezeptur eingetragen werden kann.

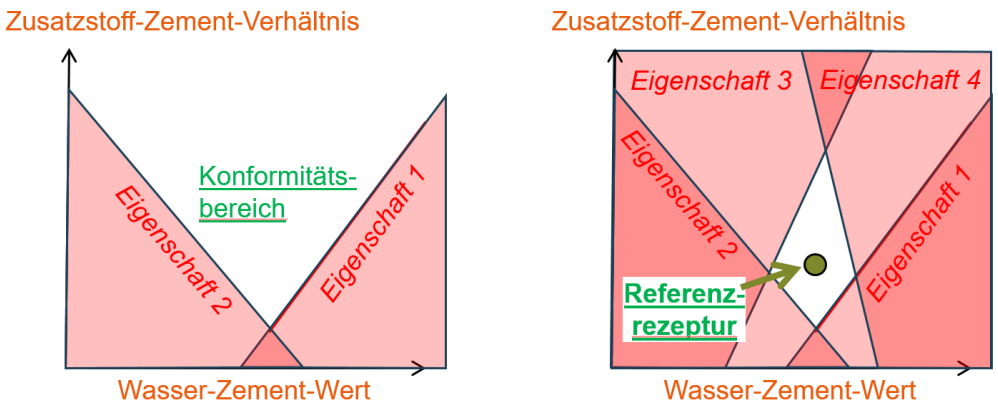

Abb. 1 Entwicklung einer Referenzrezeptur auf der Grundlage von Konformitätsbereichen zu Anforderungen und Prüfkriterien

Weitere Hinweise zum Mischungsentwurf klassischer Baustoffe, die teilweise für die Entwicklung von Verfüll- und Abdichtmaterialien im Salinar genutzt werden können, finden sich bei EFFC/DFI (2018), Huß (2012), IZB (2017), Neville & Brooks (2010), Ozawa et al. (1992), Sedran et al. (1996) und VDZ (2008).

Literatur

DIN EN 206:2021-06. Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021.

Engelhardt, H.-J.; Haverkamp, B.; von Borstel, L.E.; Van Marcke, Ph. & Coppens, E. (2015) Development of a Backfill Material for LILW and HLW Disposal Galleries in the current Belgian Geological Disposal Concept – 15374. Proc. WM2015 Conference, March 15–19, 2015, Phoenix, USA.

Engelhardt, H.-J.; Haverkamp, B. & Raymaekers, D. (2018) Backfilling of Geological Disposal Facilities – Development of Optimized Backfill Material – 18146. Proc. WM2018 Conference, March 18–22, 2018, Phoenix, USA.

EFFC/DFI (2018) Leitfaden Kontraktorbeton für Tiefgründungen. Arbeitsgruppe „Beton“, „European Federation of Foundation Contractors “ (EFFC), Deep Foundation Institute (DFI), 2. Ausgabe, 97 S.

Huß, A. (2012) Mischungsentwurf und Fließeigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) vom Mehlkorntyp unter Berücksichtigung der granulometrichen Eigenschaften der Gesteinskörnung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb), Heft 598, 1. Auflage, Beuth Verlag GmbH.

IZB (2017) Zement-Merkblatt Betontechnik B 20. Zusammensetzung von Normalbeton – Mischungsberechnung. InformationsZentrum Beton GmbH (IZB), 2.2017.

Neville, A.M. & Brooks, J.J. (2010) Concrete Technology. 2nd edition, Pearson Education Ltd., United Kingdom.

Ozawa, K.; Maekawa, K. & Okamura, H. (1992) Development of high performance concrete. Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Japan, Vol. XLI (3): 381–439.

Sedran, T.; de Larrard, F.; Hourst, F. & Contamines, C. (1996) Mix design of self-compacting concrete (SCC). Proc. Int. RILEM workshop Production Methods and Workability of Concrete, Paisley, Scotland. Edited by Bartos & Marrs, E & FN Spon.

VDZ (2014) Zement-Merkblatt Betontechnik B 3. Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2.2014.

VDZ (2008) Zement-Taschenbuch. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ, Hrsg.), 51. Ausgabe, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf.