



# Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke

Julius Bauermeister<sup>1</sup>, Oliver Langefeld<sup>1</sup>, Thomas Wilsnack<sup>2</sup>, Uwe Glaubach<sup>2</sup> und Nina Müller-Hoeppe<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

<sup>2</sup>IBeWa, Freiberg, Deutschland

<sup>3</sup>BGE Tec, Peine, Deutschland

Eingegangen 19. August 2022; angenommen 12. September 2022; online publiziert 7. Oktober 2022

**Zusammenfassung:** Die Errichtung von strömungstechnisch abdichtenden Streckenverschlussbauwerken ist im Salzbergbau eine wichtige Voraussetzung für die Absicherung der Produktion, die Minimierung von Auswirkungen auf die Umwelt und die Nutzung der vorhandenen Grubenräume für die Einlagerung von umweltgefährdenden Stoffen/radioaktiven Stoffen. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis der Dichtfunktion der Streckenverschlussbauwerke eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb und/oder die Nutzung des untertägigen Hohlraumes. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, welches den Nachweis der Dichtfunktion erbringt ohne den Kontaktbereich zu beschädigen.

**Schlüsselwörter:** Verschlussbauwerk, Permeabilität, Kontaktbereich, Salz, Sorelbeton, Anbindung

## Fluidic Functional Verification for Sealing Structures

**Abstract:** In salt mining, the construction of fluidically sealed dam structures is an important prerequisite for safeguarding production, minimizing impacts on the environment, and using the existing mine workings for the disposal of environmentally hazardous substances/nuclear waste material. In this context, proof of the sealing function of the dam structures is an essential requirement for the operation and/or use of the underground cavity. In this contribution, a concept is presented which provides proof of the sealing function without damaging the contact area.

**Keywords:** Sealing structure, Permeability, Contact area, Salt, Sorel concrete, Attachment

J. Bauermeister (✉)  
 TU Clausthal,  
 Erzstraße 20,  
 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland  
[julius.bauermeister@tu-clausthal.de](mailto:julius.bauermeister@tu-clausthal.de)

## 1. Einleitung

Die herkömmlichen Konzepte für den Funktionsnachweis von errichteten Streckenverschlussbauwerken beruhen auf:

1. In situ-Permeabilitätsuntersuchungen zur:
  - Charakterisierung des Gebirges im Einbaubereich des Dichtsegmentes für die Standortauswahl und die Festlegung des erforderlichen Gebirgsschnittes
  - Ermittlung der Permeabilität des verbleibenden Gebirgsmassives als Grundlage der Materialauswahl und Dimensionierung sowie der modellgestützten Prognose von Strömungsprozessen durch das Bauwerk (Funktionsnachweis)
2. Labortechnische Ermittlung der strömungstechnischen Eigenschaften der verwendeten Bau- und Dichtmaterialien
3. Lokale Testung des eingebauten Bauwerkes über Erkundungsbohrungen oder strömungstechnische Testung durch Druckkammern.

Die unter Punkt 1 und 2 genannten Untersuchungen sind immer erforderlich.

Die Beurteilung der Funktionalität über einzelne Erkundungsbohrungen, die das Bauwerk schneiden (Punkt 3), ergeben punktuelle Aussagen zur strömungstechnischen Situation an den Durchstoßpunkten der Bohrungen durch das Bauwerk bzw. entlang der Bohrungen im Bauwerk. Um die Anzahl an Bohrungen in einem Dichtbauwerk zu minimieren, wird der Untersuchungsumfang auf wenige lokale Punkte im Bauwerk begrenzt. Die punktuelle Erkundung über Bohrungen kann nur als eingeschränkt aussagekräftig für die Beurteilung der integralen Wirkung der Streckenverschlussbauwerke angesehen werden.

Die integrale Testung der Bauwerke über vorinstallierte Druckkammern in Streckenstummeln war in der Vergangenheit immer an Forschungsvorhaben gebunden. Die Beschränkung dieses Testkonzeptes auf Streckenstummel

und der große bergtechnische Aufwand schlossen die Anwendung dieses Konzeptes für den gegenständlichen strömungstechnischen Funktionsnachweis von sicherheitsrelevanten installierten Streckenverschlussbauwerken aus.

Darüber hinaus wurden Materialien und Methoden für die ggf. erforderliche Vergütung und Abdichtung ausgewählt, parametrisiert und in situ getestet.

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes bildet die spezifische strömungstechnische Situation für Dichtsegmente aus kohäsivem Material (Zemente, Mörtel, Betone) im Kontakt zum Salinargebirge. Eine besondere Situation für die Abdichtung besteht im Kontakt des Baustoffes zum Gebirge. Mit Ausnahme von MgO-basierten Baustoffen ist für zementbasierte Dichtmaterialien nicht von einer aktiven Dichtung durch Volumenzunahme, wie dies beim Einsatz von Bentonit als Dichtmaterial gezielt genutzt wird, auszugehen. Vielfach kommt es im Kontakt zum Gebirge zur Ausbildung eines Kontaktbereiches mit erhöhter Permeabilität, wie in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Ursachen für eine höhere Permeabilität sind vielfältig und überlagern sich. Diese sind unter anderem:

- Auffahrungsbedingt durch Meißeleinwirkung
- Thermische Expansion und Kontraktion von Gebirge und Baustoff im Verlauf des Temperaturregimes der Errichtung des Bauwerkes
- Schwinden des Baustoffes im Verlauf der Abbindeaktion
- Wechselwirkungen von Baukörper und Gebirgskontur (Zwangsbeanspruchungen)

Dies kann, räumlich begrenzt auf den Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge, lokal und über die Bauwerkslänge zu höheren permeablen Wegsamkeiten führen, die die integrale Permeabilität des Gesamtbauwerkes bestimmen. Darüber hinaus sind diese Wegsamkeiten bestimm-

mend für den Stofftransport und die Zeitdauer bis zum Durchtritt von gelösten Komponenten durch das Bauwerk.

Das Forschungsvorhaben „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ (FKZ: 02 E11748A, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) hat ein Konzept für die integrale Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Beurteilung und gegebenenfalls den Nachweis der strömungstechnisch dichtenden Wirkung entwickelt und dieses in einem Dammbauwerk in der Grube Teutschenthal installiert sowie erfolgreich getestet. Mit diesem Testkonzept wird der genehmigungsrechtlich begründeten Notwendigkeit und Forderung nach einem gegenständlichen Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes entsprochen [2].

Folgende Themenbereiche werden in diesem Beitrag fokussiert:

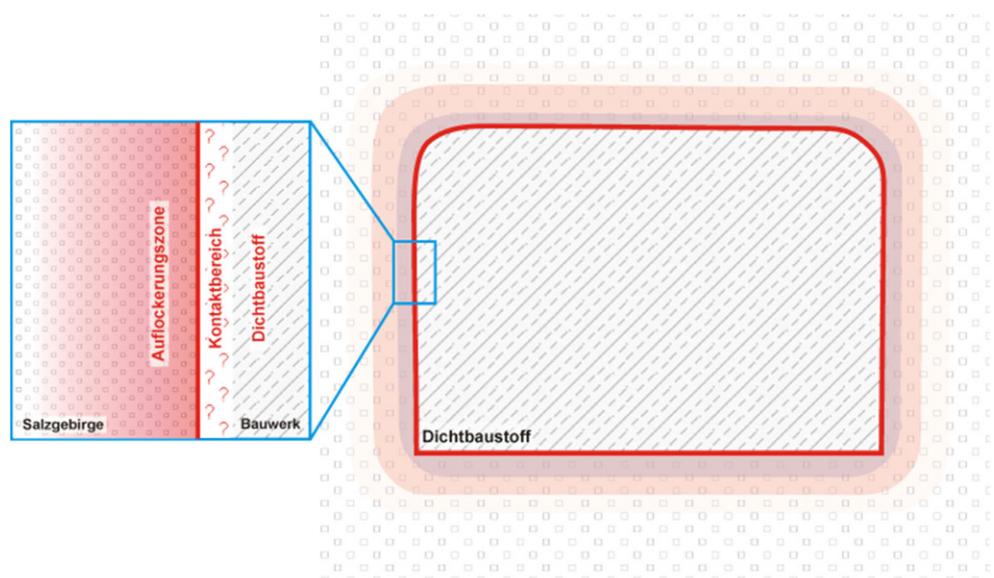
1. Strömungsprozesse und Einflüsse bei der in situ-Testung
2. Versuchsaufbau
3. Versuche am Streckenverschlussbauwerk
4. Baustoffqualität
5. Resümee und Ausblick

Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

## 2. Strömungsprozesse und Einflüsse bei der in situ-Testung

Für den Strömungsprozess in einem Bauwerk ergeben sich nach Weber [1], unabhängig vom Strömungsfluid, folgende Prozesse und Einflussgrößen:

Abb. 1: Schematische Darstellung Vertikalschnitt durch Dichtsegment mit Details zum Kontakt Baustoff/Gebirge [1]



- die Geometrie des Strömungsraumes und die Kenntnisse zur Ausdehnung der in einem Bauwerk vorhandenen Strömungsräume mit unterschiedlichen strömungstechnischen Eigenschaften (z.B. Auflockerungszone Gebirge, Kontaktbereich zwischen Dichtelement und Gebirge sowie Dichtelement aus Baustoff),
- die strömungstechnischen Eigenschaften der im vorhergehenden Punkt genannten Strömungsräume im Bauwerk und ggf. ihre räumliche und zeitabhängige Veränderung,
- die Anfangsdruck- und Temperaturverteilung im Bauwerk und im Gebirge und seine zeitliche Änderung,
- Druck- und Temperaturverlauf während der Testung.

Zusätzlich zu diesen Sachverhalten ergeben sich nach Weber [1] unterschiedliche Einflüsse für die Gas- und Flüssigkeitsströmung:

- Beeinflussung der effektiven Phasenpermeabilität (auch effektive Permeabilität) der einzelnen Strömungsräume durch die räumlich und zeitlich veränderliche Flüssigkeitsättigung im Porenraum – Zweiphasenströmung (z.B. Veränderung durch Aufsättigung bei Flüssigkeitsströmung oder Trocknung bei Gasströmung),
- Sekundärreaktionen in einzelnen Strömungsräumen des Bauwerkes im Kontakt mit dem strömenden Fluid, die Einflüsse auf Permeabilität, Porosität und Porenraumsättigung nehmen (z.B. durch die Abbindereaktionen des Baustoffes, das Quellen oder Schwinden des Baustoffes und/oder des Gebirges).

Die genannten Einflüsse werden im labortechnischen Maßstab und in großtechnischen Bauwerken wirksam. Sie variieren über die Bauwerkslänge und den Querschnitt und verändern sich zeitabhängig in Abhängigkeit von den Durchströmungsprozessen.

Trotz oder gerade aufgrund dieser sich wechselseitig überlagernden Einflussprozesse bietet sich der Funktionsnachweis eines Verschlussbauwerkes über die großtechnische strömungstechnische in situ-Testung an. Voraussetzung für die Auswertung und Aussagekraft der in situ-Bauwerkstests ist es, soweit möglich, die oben genannten Eigenschaften und Prozesse, die im Labor und am Standort über in situ-Untersuchungen ermittelbar sind, ausreichend genau, ggf. mit möglichen Schwankungsbereichen, zu bestimmen. Dies gilt zum Beispiel für die Permeabilitäts- und Porositätsverteilung in der Auflockerungszone des Gebirges und im unverritzten Gebirge sowie für die Permeabilität und die Porosität des Dichtbaustoffes.

Die Verwendung der voran genannten Parameter, Funktionen und Informationen dient als Vorabinformation für die Parametrisierung der unterschiedlichen Strömungsräume in dem numerischen Standortmodell für die Auswertung der in situ-Tests und ermöglicht so die Identifikation der Permeabilität im Kontaktbereich zwischen dem Dichtsegment und dem Gebirge. Auf Grund der geringen Permeabilität des Dichtelementes und dem in der Regel ebenfalls geringen Permeabilitätsniveau der Auflockerungszone im Gebirge kommt vielfach dem Kontaktbereich zwischen Dichtelement und Gebirge die entscheidende strömungs-

technische Bedeutung für das Gesamtsystem zu. Eine mögliche Anordnung des Testsystems wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 3. Versuchsaufbau

Unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen für die strömungstechnische Charakterisierung eines Bauwerkes über Bohrungen und Druckkammern in Streckenstummeln wurde ein Konzept für die integrale strömungstechnische Testung von errichteten Dichtsegmenten entwickelt und großtechnisch erfolgreich umgesetzt.

Das Grundkonzept der strömungstechnischen Testung eines betonierten Dichtsegmentes beruht auf der Installation von mindestens drei radial umlaufenden, über die Bauwerkslänge verteilten Druckkammern im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt. Diese Ringkammern (RK) werden als flexible Schlauchleitungen in engem Kontakt zur Streckenkontur installiert. Durch das Aufpumpen der Schlauchleitungen mit Druckluft wird der formschlüssige Kontakt der Ringkammern zum Gebirge für den Zeitraum der Betonage hergestellt. Nach dem Abbinden des Baustoffes wird der Gasdruck aus den Schlauchleitungen entlastet. Die entstehenden Hohlräume der entlasteten Schlauchleitungen bilden die Ringkammern für die Fluiddruckbeaufschlagung. Die Umsetzung wird in Abb. 3 gezeigt.

Auf diese Weise kann die sich z. B. durch das aufkriechende Gebirge ändernde Permeabilität der Kontaktzone über einen längeren Zeitraum beobachtet werden.

Erfolgt eine Vergütung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge durch Injektion, so kann durch erneutes Aufpumpen der Schlauchleitungen der Zufluss von Injektionsbaustoff in die Ringkammern verhindert werden. Nach der Injektion stehen die Ringkammern dann weiterhin für die Druckbeaufschlagung und Testung des Bauwerkes zur Verfügung.

Jede Ringkammer wird durch mindestens drei Leitungen angeschlossen. Eine Druckleitung gewährleistet das Aufpumpen und die Druckentlastung der Schlauchleitung (Abb. 2). Zwei weitere Leitungen ermöglichen die Druckbeaufschlagung und -entlastung der Ringkammern.

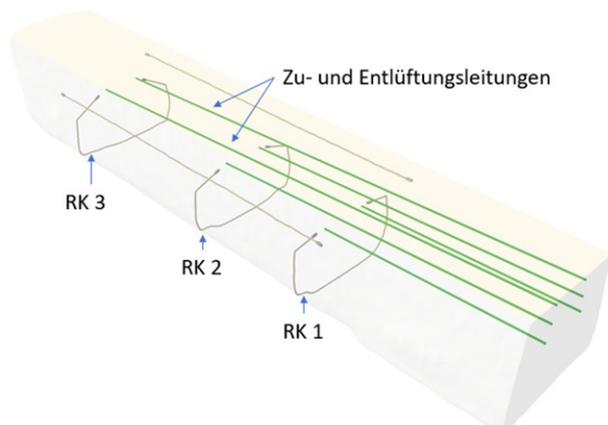


Abb. 2: Darstellung der Ringkammern mit Zu- und Entlüftungsleitungen

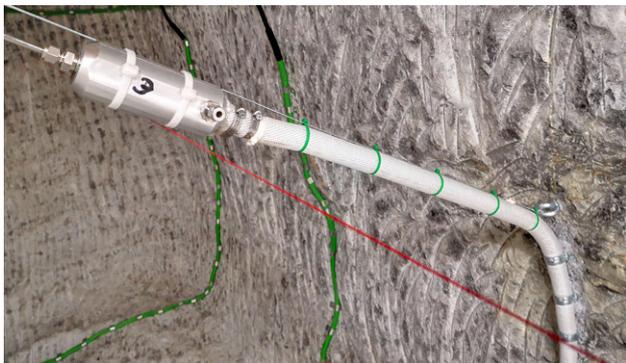


Abb. 3: Installierte Ringkammer

Über die Ringkammern ist eine Druckbeaufschlagung/strömungstechnische Testung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge mit Gas und Flüssigkeit möglich. Die Testung ist über einen Druckimpuls mit einem konstanten Volumenstrom oder einem konstanten Fluiddruck möglich.

Im Grundkonzept wird die mittlere Ringkammer mit einem Fluiddruck beaufschlagt und die Druckreaktion in der umliegenden Ringkammern gemessen. Auf der Basis der Geometrie des Bauwerkes, der installierten Volumen der Kammern und Leitungen sowie der Strömungslängen wird ein numerisches Modell des Dammbauwerkes erstellt. Über numerische Parameteridentifikation wird der in situ gemessene Prozess im Modell nachgerechnet und die wirksame Permeabilität in den Bauwerksabschnitten zwischen den Ringkammern über Parametervariation identifiziert. Die modellgestützte Auswertung der Druckreaktionen in den drei Ringkammern ermöglicht die Ermittlung der integralen Permeabilität des Bauwerkes im Kontakt Baustoff/Gebirge im Bauwerksabschnitt zwischen den getesteten Ringkammern.

Nach Abschluss der Versuche besteht die Möglichkeit, die Ringkammern mit Baustoff zu verfüllen, was aber aufgrund ihrer Anordnung senkrecht zur Strömungsrichtung nicht zwingend notwendig ist. Die Kunststoffrohre der Zuleitungen zu den Ringkammern werden durch Aufbohren auf der gesamten Zuleitungslänge zurückgewonnen. Danach erfolgt für diese einfallend verlaufenden Leitungen eine qualitätsgerechte Verfüllung, z. B. mit dem Dichtbaustoff des Bauwerkes, um die technisch bedingten Wegsamkeiten abzudichten. Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse an dem Halbdamm dargestellt.

#### 4. Versuche am Streckenverschlussbauwerk

Im Rahmen des Projektes STROEFUN ist in der 3. Projektphase das dargestellte Testkonzept für den gegenständlichen in situ-Funktionsnachweis in einem großtechnisch errichteten Dammbauwerk in der Grube Teutschenthal realisiert worden. In einer Strecke im Steinsalz, mit ca. 4,5 m Firsthöhe, wird ein 15 m langer, 2,5 bis 3,1 m breiter und ca. 2,4 m hoher Halbdamm errichtet (Abb. 4). Zuvor waren in diesem Abschnitt die Installation der erforderlichen Ringkammern sowie von Injektionsleitungen (Abb. 5) zur Vergü-

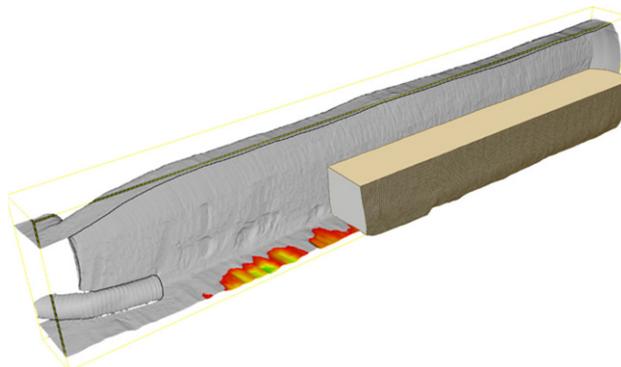


Abb. 4: Schnittdarstellung Standortmodell mit dem Dammbauwerk

tung des Kontaktbereiches zwischen Baustoff und Gebirge eingebaut worden. In Gasdrucktests über die installierten drei Ringkammern wird abschnittsweise die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes beurteilt.

Die Testergebnisse weisen eine erhöhte Permeabilität des Kontaktbereiches zwischen dem Dichtbaustoff und dem Gebirge nach. In Abb. 6 sind beispielhaft die Druckganglinien für einen Impulstest dargestellt.

In der Auswertung der in situ-Testung des Bauwerkes kann eine Reduzierung der Permeabilität für den Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge festgestellt werden (Tab. 1).

Durch die Tests wurde nachgewiesen, dass es im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge höhere permeable Wegsamkeiten gibt. Über die integrale Ringfläche der Kammern ergeben diese die oben genannten Permeabilitäten. Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass der getestete Halbdamm nicht vollständig in die Gebirgskontur eingespannt ist.

#### 5. Baustoffqualität

Für die mögliche Errichtung eines Dammbauwerkes zur Abschirmung von hochradioaktiven Abfällen im Salinar soll in Deutschland eine Sorelzementmischung verwendet wer-

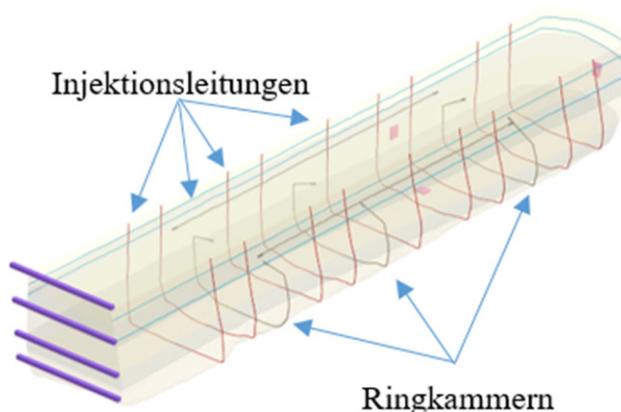


Abb. 5: Übersicht der installierten Mess-, Test- und Injektionsinfrastruktur

Abb. 6: Druck- und Volumenstromganglinien des Impulstests am 13.06.2022 – Messwerte und Modellanpassung

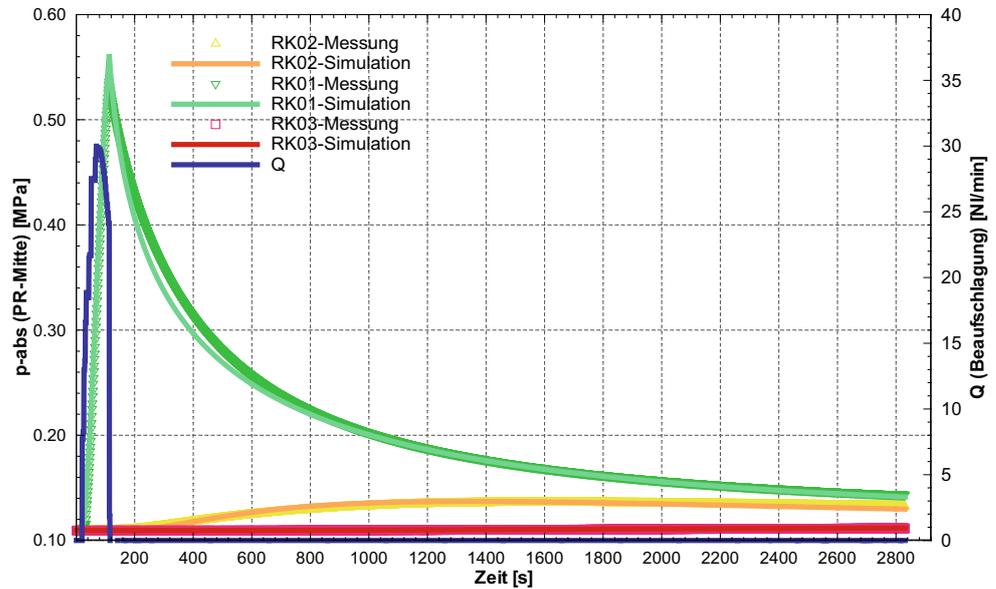


TABELLE 1  
Messerauswertungen der integralen Permeabilität zwischen den Ringkammern

Messung	Druckbeaufschlagte RK	Permeabilität zwischen RK 1 und RK 2 [m <sup>2</sup> ]	Permeabilität zwischen RK 2 und 3 [m <sup>2</sup> ]
21.01.2022	01	8,0 · 10 <sup>-15</sup>	3,0 · 10 <sup>-15</sup>
13.06.2022	01	7,0 · 10 <sup>-15</sup>	9,0 · 10 <sup>-16</sup>

den [3]. Bei dem Start des Projektes wurde die sogenannte A1-Rezeptur als aktueller Stand der Technik verwendet, die auf folgender Zusammensetzung basiert [4].:

- 11,3% MgO
- 63,7% Salz
- 25,0% MgCl<sub>2</sub>-Lösung

Die A1-Rezeptur schafft aufgrund der bereits erfolgten Anwendung bei erstellten Bauwerken im Bergwerk Asse die Möglichkeit vorhandene Erfahrungen zu nutzen, Ergebnisse zu vergleichen und so die Weiterentwicklung auf einer soliden technischen Basis aufzusetzen.

Für erste Handhabungserfahrung mit dem Baustoff und um die Anbindung von zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingebrachten Chargen zu untersuchen, wurde aus zwei Chargen Sorelzement ein zweilagiger Betonblock gegossen. Die Chargen sind in einem Abstand von 20h eingebracht worden.

Trotz Einhaltung der Zusammensetzung ist zu Beginn des zweiten Tages eine Überstandsflüssigkeit auf der am Tag zuvor eingebrachten Suspension aufgetreten. Dieses wurde dokumentiert und die Suspension erneut eingebracht. Nach einem halben Jahr wurde die Kontaktfuge zwischen diesen Bereichen überbohrt. Abb. 7 zeigt diesen eingeschweißten Bohrkern.

Bei diesem Bohrkern sind die beiden Bohrkernhälften klar zu unterscheiden. Die untere Hälfte weist optisch eine geringe Anzahl an größeren Partikeln auf, während die obere Hälfte eine Vielzahl an größeren Partikeln beinhaltet.

Aufgrund der gleichen Suspensionszusammensetzung, der Korngrößenverteilung, der Anmischmethode, des gleichen Fließmaßes und der Temperatur der Suspension wird von einer Sedimentierung innerhalb der eingebrachten Suspension ausgegangen, wobei die größeren Salzpartikel absinken und die feineren Salzpartikel sich in dem oberen Bereich der eingebrachten Suspension befinden.

Um die Sedimentation zu unterbinden und einen homogenen Baustoff zu generieren, wurde im Labor die Zugabe von 8% Anhydritmehl getestet. Abb. 8 und 9 zeigen die Ergebnisse der Suspension mit und ohne Anhydritmehl im direkten Vergleich.

Abb. 8 zeigt Sorelbeton mit und ohne Anhydritmehl nach einer Wartezeit von 24h. Es ist deutlich zu sehen, dass bei der linken Probe keine Flüssigkeit aufschwimmt, während dies bei der rechten Probe der Fall ist. Die Einstanzlöcher,

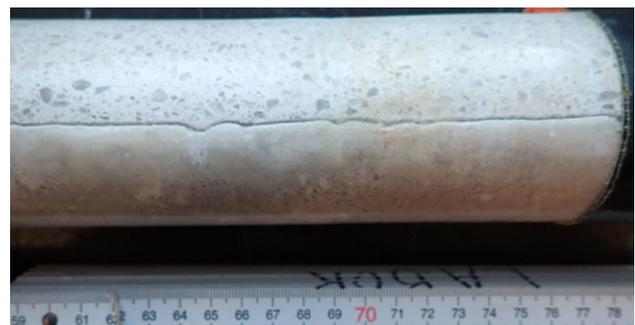


Abb. 7: Bohrkern aus dem Kontaktbereich



Abb. 8: Links: Sorelbeton mit Anhydritmehl (8%); rechts: ohne Anhydritmehl

die in der linken Probe zu sehen sind, wurden bei der Durchführung eines Vicat-Tests erzeugt. Die Einstanzlöcher in der rechten Probe sind hingegen nicht zu erkennen. Abb. 9 zeigt die bessere Homogenität des mit Anhydritmehl versetzten Baustoffes.

Die Zugabe von Anhydritmehl unterbindet das Auftreten von Sedimentation und produziert einen gleichmäßigen Baustoff. Aus Handhabungsgründen wurde bei der Betonage der Anteil des Anhydritmeihls auf 3,9% gesenkt. Die neue Mischungszusammensetzung liegt im tolerierbaren Schwankungsbereich [4]. Dementsprechend kann trotz der neuen Zusammensetzung der neue Baustoff ebenfalls als A1-Beton bezeichnet werden.

Die Dammerstellung geschah unter der Annahme, dass es beim Einhalten von neun Stunden Unterbrechung zwischen dem Einbringen der Mischchargen zu keiner Bildung von Betonierfugen kommt. Bei der Erstellung von einer vertikalen Bohrungen in der Mitte des Dammes wurde jedoch durch einen Bereich hindurch gebohrt, in welchem die Bohrkernstücke keine starke Anbindung zueinander hatten (Abb. 10). Die glatte Bruchfläche entstand in dem Bereich, in dem nach einer achtstündigen Unterbrechung eine neue Mischcharge eingebracht wurde. Somit kann es sich bei diesem Bruch um das Resultat einer Betonierfuge handeln.

Abb. 10: Bohrkern aus vertikaler Bohrung in Bauwerksmitte-Trennflächen der oberen Betonierfuge



Abb. 9: Links: Sorelbeton ohne Anhydritmehl; rechts: mit Anhydritmehl

Zwecks einer weiteren Untersuchung der Betonierfuge wurde eine weitere vertikale Bohrung in dem Randbereich gestoßen. Der Bohrkern weist keine Trennung der mit acht Stunden Unterbrechung eingebrachten Suspensionen auf.

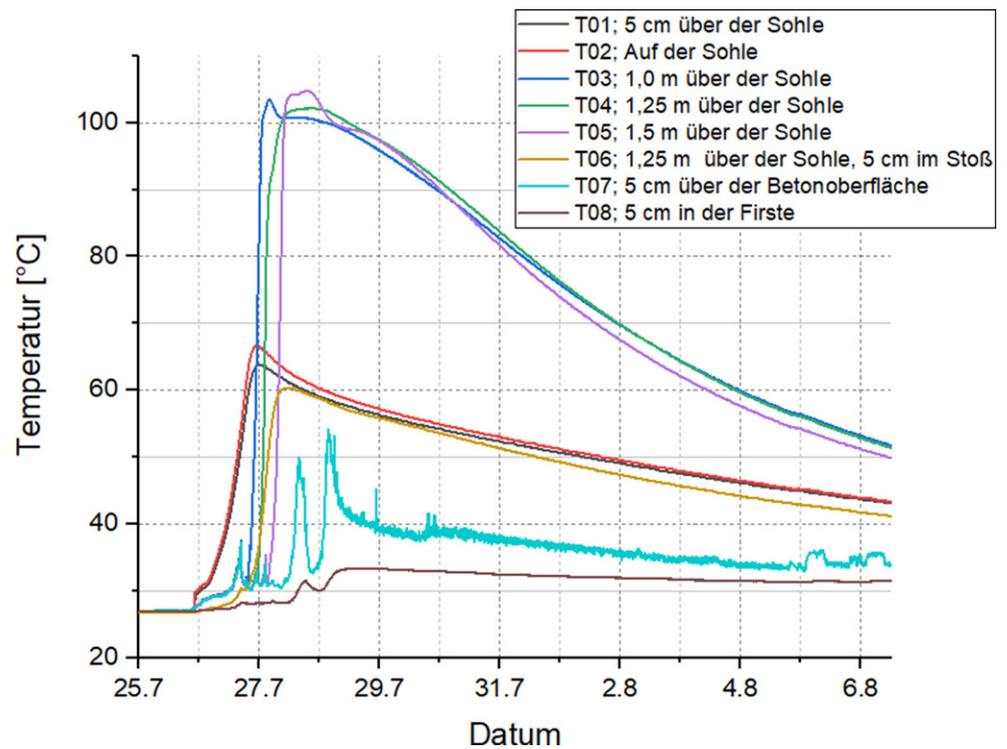
Einen möglichen Einfluss auf die Bildung von Betonierfugen hat die Temperatur. An verschiedenen Positionen der Salzkontur wurden Sensoren verbaut, die kontinuierlich die Temperatur aufzeichneten. Auch hing eine Temperaturmesskette in der Mitte des Dammes und zeichnete in unterschiedlichen Höhen die Temperatur auf. Die Temperaturganglinien an unterschiedlichen Positionen des Dammes sind in Abb. 11 dargestellt:

Wird von den Messergebnissen in der Firste und 5 cm oberhalb der Dammoberfläche abgesehen, können die Temperaturverläufe in zwei Gruppen unterschieden werden.

- Positionierung innerhalb des Dammes, Maximaltemperaturen ca. 104 °C,
- Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge, Maximaltemperatur ca. 67 °C.

Im Hinblick auf die Untersuchung der Kontaktzone ist festzustellen, dass die Anbindung des Sorelbetons an die

Abb. 11: Temperaturen während und nach der Betonage



Salzoberfläche an den luftzugewandten Bereichen als gut wahrgenommen wird (Abb. 12). Bohrungen bestätigen optisch eine gute Anbindung in den Randbereichen des Dammes. In der Sohlenmitte hingegen liegt eine geringere Anbindung des Baustoffes vor (Abb. 13).

Beide Bohrkernstücke, die in Abb. 12 und 13 dargestellt sind, stammen aus demselben Bohrkernabschnitt aus der Sohlenmitte. Die Entfernung zwischen den beiden

entnommenen Probestücken beträgt 12 cm. Der Bohrkern aus Abb. 12 zeigt optisch eine gute Anbindung des Kontaktbereiches. Abb. 13 hingegen zeigt optisch eine schwache Anbindung. Bei Betrachtung der Bohrkernstücke aus dem Zwischenbereich der beiden Probenstücke kann eine abnehmende Anbindung mit zunehmendem Abstand zur Stirnseite des Dammes festgestellt werden. Permeabili-

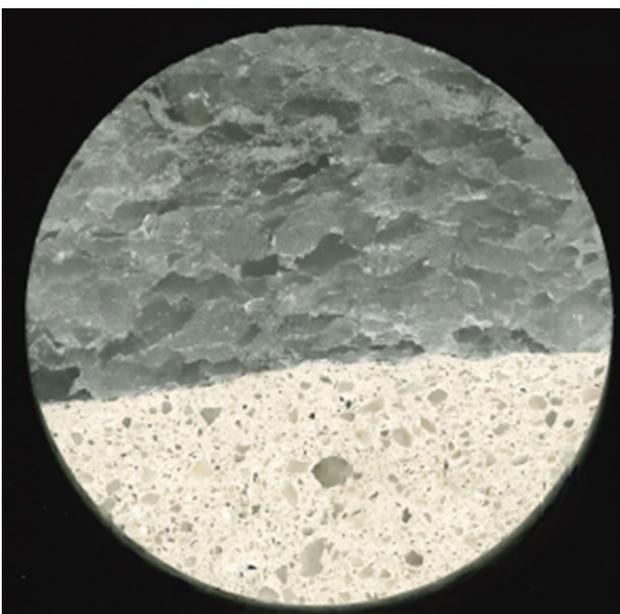


Abb. 12: Bohrkern aus dem Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge mit guter Anbindung

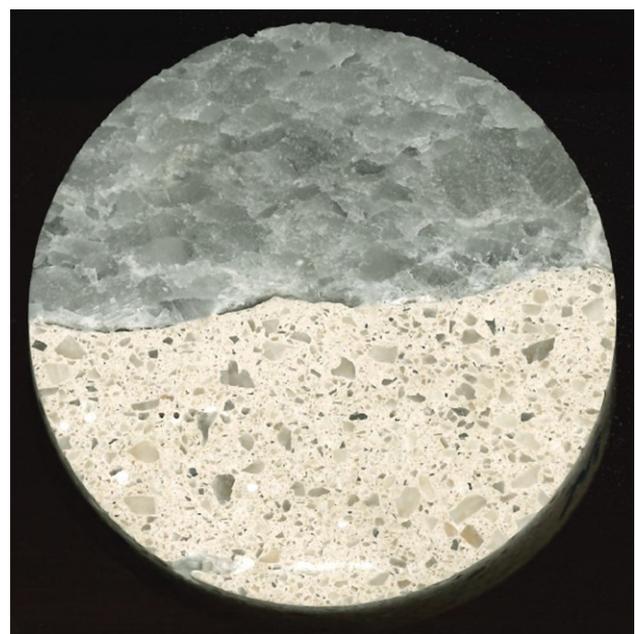


Abb. 13: Bohrkern aus dem Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge mit verbesserungswürdiger Anbindung

tätsmessungen für die unterschiedlichen Bereiche werden derzeit durchgeführt.

## 6. Resümee und Ausblick

Das Ziel des STROEFUN III-Projektes war die Entwicklung eines Testkonzeptes für die gegenständliche großtechnische Nachweisführung der strömungstechnischen Funktionssicherheit von installierten, sicherheitsrelevanten Streckenverschlussbauwerken. Das Konzept konnte erfolgreich umgesetzt und die Eignung für die strömungstechnische Testung eines installierten Streckenverschlussbauwerkes nachgewiesen werden. Im Ergebnis von zeitabhängigen Tests des Bauwerkes konnte eine Verringerung der integralen Permeabilität nachgewiesen werden.

Durch das Hinzufügen von Anhydritmehl zu der ursprünglichen Rezeptur wurden Sedimentationserscheinungen reduziert und ein homogener Dichtbaustoff erzeugt. Eine homogene Anbindung des Dichtbaustoffes an das Gebirge und zwischen zeitlich versetzt eingebrachten Betonierlagen innerhalb des Baukörpers konnte nicht nachgewiesen werden. Die gewonnenen Bohrkern, aus der Mitte der Sohle, weisen in dem Kontaktbereich Dichtbaustoff/Gebirge eine lokale Änderung der Baustoffanbindung an das Gebirge auf. In der Dammmitte, parallel zum Streckenverlauf, liegt eine schwach ausgeprägte Anbindung vor. Welche Faktoren dies beeinflussen, gilt es zu prüfen.

Die unvollständige Materialanbindung führt zu einer Erhöhung der integralen Permeabilität des Gesamtbauwerkes. Die Bohrkern stammen aus einem Bereich, der bei der Bestimmung der integralen Permeabilität nicht berücksichtigt wurde. Die Annahme, dass diese Materialanbindung sich durch den Damm fortsetzt, erklärt die relativ hohe gemessene Permeabilität.

Strömungstechnisch dichte Barrieren zu errichten ist eine zu bewältigende Herausforderung. Ein partiell nicht an das Gebirge abgebundener Baustoff stellt einen strömungstechnischen relevanten Bereich dar. Wird die Zielpermeabilität nicht erreicht, müssen Maßnahmen ergriffen werden, diese Bereiche abzudichten. Ein Messsystem, eine Barriere in situ zu prüfen, wurde erfolgreich getestet und ist verfügbar.

**Förderung.** Das Projekt „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches“ (STROEFUN III) wird von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02 E 11748A finanziert.

**Funding.** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

1. Weber, J., Wilsnack, T., Langefeld, O.: Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung. Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden (FKZ 02E11253)) (2016)
2. Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle: EndSiAnV
3. Freyer, D., Gruner, M., Popp, T.: Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg (2015)
4. TU-BA-Freiberg: Stellungnahme zum möglichen Einfluss von Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung eines Ausgangsstoffes bei der Herstellung auf die Baustoffeigenschaften von Sorel-beton A1 (2017)

**Hinweis des Verlags.** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.