

Fluidic functional verification for closing structures in drifts

Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Streckenverschlussbauwerke

Thomas Wilsnack	IBeWa-Ingenieurpartnerschaft, Meißner Ring 10, 09599 Freiberg, th.wilsnack@ibewa.de
Uwe Glaubach	IBeWa-Ingenieurpartnerschaft, Meißner Ring 10, 09599 Freiberg, u.glaubach@ibewa.de
Julius Bauermeister	TU Clausthal-Zellerfeld, Erzstraße 20, 38678 Clausthal-Zellerfeld, julius.bauermeister@tu-clausthal.de
Oliver Langefeld	TU Clausthal-Zellerfeld, Erzstraße 20, 38678 Clausthal-Zellerfeld, oliver.langefeld@tu-clausthal.de
Nina Müller-Hoeppe	BGE TECHNOLOGY GmbH, Eschenstraße 55, 31224 Peine, Nina.Mueller-Hoeppe@bge.de

Abstract

In the STROEFUN research project [3], a concept for the fluidic testing of closing structures was developed, installed and successfully tested on a closing structure at the Teutschenthal mine. The test concept for structures or sections of structures made of hydraulically settling sealing materials is based on the pressurization of at least 3 ring chambers installed on the drift contour. These can be individually pressurized with gas and/or liquid in a steady-state or transient pressure regime. The concept concentrates on testing the contact area between material and rock mass as the determining flow space for the sealing effect of drift closure structures. As a result of the model-based evaluation of the pressure hydrographs determined in the test, statements can be made about the permeability of the structure in the contact between the building material and the rock mass and, derived from this, about the integral permeability of the structure.

The installations required for the test are completely removed after use. The installation modules remaining in the structure do not influence the further functioning of the structure.

The test concept is an additional option for the fluidic functional test of drifts closure structures within the scope of verification of sealing effect.

As a result of the research project, extensive knowledge is available on the location and the structure made of MgO-building material [4]. This extensive knowledge, the accessibility and the site conditions offer the opportunity in the near future to carry out a large number of investigations on the subsequent improvement of the structure with assessment of the fluidic effect of the improvement as well as on the time-dependent behavior of the building material in contact with the atmosphere and in contact with the salt solution.

Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben STROEFUN [3] wurde ein Konzept für die strömungstechnische Testung von Streckenverschlussbauwerken entwickelt, installiert und in einem Streckenverschlussbauwerk in der Grube Teutschenthal erfolgreich getestet. Das Testkonzept für Bauwerke oder Bauwerksabschnitte aus hydraulisch abbindenden Dichtbaustoffen basiert auf der Druckbeaufschlagung von mindestens 3 an der Streckenkontur installierten Ringkammern. Diese können individuell mit Gas und/oder Flüssigkeit im stationären oder instationären Druckregime beaufschlagt werden.

Das Konzept konzentriert sich auf die Testung des Kontaktbereiches Baustoff/Gebirge als bestimmenden Strömungsraum für die Dichtwirkung von Streckenverschlussbauwerken. Im Ergebnis der modellbasierten Auswertung der im Test ermittelten Druckganglinien sind Aussagen über die Permeabilität des Bauwerkes im Kontakt Baustoff/Gebirge und daraus abgeleitet für die integrale Permeabilität des Bauwerkes möglich.

Die für die Testung erforderlichen Installationen werden, nach der Nutzung, vollständig geraubt. Die im Bauwerk verbleibenden Installationsbausteine nehmen keinen Einfluss auf die weitere Funktionsweise des Bauwerkes.

Das Testkonzept ist ein zusätzlicher Baustein für den gegenständlichen, strömungstechnischen Funktionstest von Streckenverschlussbauwerken im Rahmen der Nachweisführung.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens liegen umfangreiche Kenntnisse zum Standort und zum Bauwerk aus MgO-Baustoff (angelehnt an die Rezeptur A1) vor [4]. Dieser umfangreiche Kenntnisstand, die Zugänglichkeit und die Standortbedingungen bieten die Chance in der nahen Zukunft eine Vielzahl an Untersuchungen zur nachträglichen Vergütung des Bauwerkes mit Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung der Vergütung sowie zum zeitabhängigen Baustoffverhalten im Kontakt zur Atmosphäre und im Kontakt zur Salzlösung durchzuführen.

1 Sachverhalt/Motivation

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/Endlagerung. In diesem Zusammenhang ist der Nachweis der Dichtfunktion von notwendigen Streckenverschlussbauwerken eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb und/oder die Nutzung des untertägigen Hohlraumes.

Die Konzepte für die Nachweisführung sollen hier in folgender Weise unterteilt werden:

indirekte Methode: Ermittlung der für die Funktionsbeurteilung relevanten Eigenschaften des Gebirges und des Bauwerkes an Kernproben und aus in situ-Messungen als Grundlage der modellgestützten Simulation der Funktionsweise des Streckenverschlussbauwerkes

direkte Methode: strömungstechnische Testung des gesamten Bauwerkes oder relevanter Abschnitte des Bauwerkes über eine in situ-Druckbeaufschlagung

In der Vergangenheit erfolgte die Beurteilung von Streckenverschlussbauwerken vielfach aus einer Verknüpfung der indirekten und der direkten Methode. In Forschungsvorhaben und/oder großtechnischen Handhabungsversuchen wurden Streckenverschlussbauwerke im Maßstab und in der technischen Ausführung entsprechend der späteren praktischen Realisierung hergestellt, über Parameterermittlungen an Kernproben und über in situ-Untersuchungen charakterisiert und durch Druckbeaufschlagung getestet. Die Ergebnisse und Erfahrungen dieser Referenzbauwerke bilden dann die Grundlage der Handlungsvorgaben für die Errichtung der Streckenverschlussbauwerke in den Bergwerken - Praxisbauwerke. An diesen Bauwerken werden dann stichprobenweise die funktionsrelevanten Eigenschaften an Kernproben und in einzelnen in situ-Untersuchungen überprüft. Die Analogie der Herstellung des Referenzbauwerkes und der Praxisbauwerke, die Beurteilung und Einordnung der ermittelten Eigenschaften in den Erfahrungsstand und die modellgestützte Prognose der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes bildet dann die Grundlage für den Nachweis der strömungstechnischen Funktion.

Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und bildet die Grundlage für die erfolgreiche Errichtung von Streckenverschlussbauwerken.

Von Seiten der Genehmigungsbehörden wird aktuell für ausgewählte Streckenverschlussbauwerke ein gegenständlicher Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes gefordert [2].

Ausgehend von diesem Sachstand wurde in dem Forschungsvorhaben „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ (FKZ: 02 E11748A, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)

ein Konzept für die integrale strömungstechnische Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Nachweisführung entwickelt, in einem Dammbauwerk aus MgO-basiertem Baustoff (angelehnt an A1-Rezeptur [1]), in der Grube Teutschenthal installiert und das Testkonzept erfolgreich angewendet. Das entwickelte Testkonzept konzentriert sich aktuell auf Streckenverschlussbauwerke aus kohäsiven, hydraulisch abbindenden Materialien. Es ermöglicht, wenn erforderlich auch baubegleitend, die mehrfache Testung von Streckenverschlussbauwerken mit Gas und mit Flüssigkeit.

Begleitend zu der Entwicklung des Testkonzeptes wurden geeignete Injektionsmaterialien für die nachträgliche Vergütung des Kontaktes Baustoff/Gebirge ausgewählt, parametrisiert und in dem errichteten Streckenverschlussbauwerk angewendet. Darüber hinaus wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens umfangreiche Kenntnisse zur betontechnologischen Vorgehensweise bei der Betonage des Bauwerkes, zu den geotechnischen und strömungstechnischen Eigenschaften des Baustoffes und des Kontaktes zwischen Baustoffkörper und Gebirge ermittelt. Nachfolgend wird der Schwerpunkt auf die Erläuterung des Grundkonzeptes der Testung und die dazu gewonnenen Ergebnisse gelegt.

2 Grundprinzip

Die Konzeptentwicklung berücksichtigt die Erfahrungen der Projektpartner aus den Testungen der Streckenverschlussbauwerke aus kohäsiven Dichtbaustoffen in verschiedenen Forschungs- und Bauprojekten:

- Strömungsbarrieren Asse seit 2005,
- CARLA Teutschenthal (GV1 und GV2) - 2010,
- Abdichtbauwerk ERAM - 2010,
- Damm Bleicherode - 2013,

Das Grundkonzept der entwickelten Testmethodik eines kohäsiven Dichtsegmentes in einem Streckenverschlussbauwerk beruht auf der Installation von mindestens drei radial umlaufenden, über die Bauwerkslänge verteilten Ringkammern an der Streckenkontur im Kontakt zwischen Baustoff und Gebirge - siehe Fig. 1. Die Erfahrungen aus den oben genannten Bauwerkstests zeigen, dass der Kontakt Baustoff/Gebirge bestimmend für die Dichtwirkung des Bauwerkes ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Baustoffkörper unter Anwendung betontechnologischer Maßnahmen und Qualitätskriterien mit hinreichend geringer Permeabilität hergestellt werden kann. Die Ringkammern werden als flexible Gewebeschlauhe (NBR-Packerschlauch mit umgebenden Gewebemantel aus Polypropylen oder Glasfaser) in engem Kontakt zur Streckenkontur installiert. Durch das Aufpumpen der Ringkammern mit Druckluft (2-3 bar) wird für den Zeitraum der Betonage der formschlüssige Kontakt der sehr flexiblen Gewebeschlauhe zum Gebirge hergestellt. Der Gasdruck in den Ringkammern wird nach der Betonage bis zum Erreichen der Frühfestigkeit des Betons aufrechterhalten. Nach der Druckentlastung bilden die entstehenden Hohlräume der entlasteten Packerschlauhe die Ringkammern für die Fluiddruckbeaufschlagung bei der Testung des Bauwerkes. Der durchlässige Gewebemantel kleidet von innen den verbleibenden Hohlraum aus. Ein Beispiel für eine installierte Ringkammer mit den erforderlichen Anschlüssen zeigt das Foto in Fig. 2.

Erfolgt im Verlauf der Errichtung des Bauwerkes eine Vergütung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge durch Injektion, kann durch erneutes Aufpumpen des Packerschlauhes 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. Dies ermöglicht die Erfolgsbeurteilung und operative Fortsetzung der Injektionsmaßnahmen.

Jede Ringkammer wird durch mindestens drei einfallend verlaufende Leitungen angeschlossen. Eine Druckleitung gewährleistet das Aufpumpen und die Druckentlastung der Packerschlauhe (Fig. 1). Zwei weitere Leitungen ermöglichen die Druckbeaufschlagung und Entlüftung der Ringkammern. Für die Testinstallation kann aus der Geometrie der Anschlussleitungen und dem Volumen der Ringkammern das strömungstechnisch relevante Gesamtvolumen für die Testauswertung ermittelt werden. Durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass die Ermittlung des wirksamen Volumens auch über Gasentspannungsversuche möglich ist.

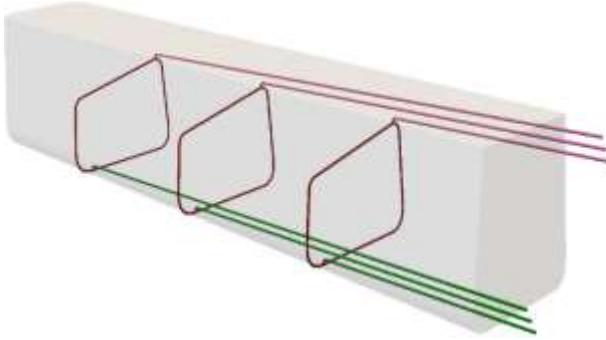


Fig. 1: Darstellung der Ringkammern mit Zu- und Entlüftungsleitungen

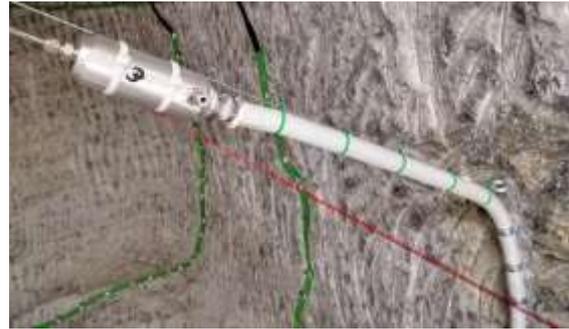


Fig. 2: Installierte Ringkammer.

Über die Ringkammern ist eine Druckbeaufschlagung/strömungstechnische Testung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge mit Gas und Flüssigkeit möglich. Die Testung ist, in Abhängigkeit von den Durchlässigkeitsbedingungen, über einen Druckimpuls, mit einem konstanten Volumenstrom oder einem konstanten Fluiddruck möglich. Dabei können die Ringkammern in unterschiedlicher Reihenfolge mit Druck beaufschlagt werden.

Im Grundkonzept wird die mittlere Ringkammer mit einem Fluiddruck beaufschlagt und die Druckreaktion in den Ringkammern zeitabhängig erfasst. 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.

Der Anschluss der Ringkammern zur Luftseite des Verschlussbauwerkes erfolgt über Kunststoffrohre mit einer Neigung von ca. 3°. Diese werden vor der Betonage im künftigen Dichtsegment installiert. Nach der Beendigung der Testungen werden die Kunststoffrohre überbohrt und auf der gesamten Zuleitungslänge geraubt. Danach erfolgt die qualitätsgerechte Verfüllung der verbleibenden Bohrlöcher (z.B. mit dem Dichtbaustoff des Bauwerkes).

Anhand von halbtechnischen Vorversuchen wurde das beschriebene Testsystem optimiert und die Grenzen der Leistungsfähigkeit getestet. Beispielhaft zeigt das Foto in Fig. 2 den versuchstechnischen Aufbau eines Packerschlauches zwischen zwei Injektionsleitungen. Die Installation wurde zwischen zwei Betonplatten eingegossen. Der halbtechnische Versuchsaufbau wurde dann mehrfach getestet und injiziert.

Die wichtigsten Ergebnisse der Vorversuche sind:

- volumenstabile Betonage des Ringkammern an Bauwerksfugen nachgewiesen,
- Funktionsprinzip des steuerbaren Ringkammern nachgewiesen,
- Setzdrücke der Packerschläuche im nicht betonierten Zustand bis 5 bar möglich,
- Setzdrücke der Packerschläuche im einbetonierten Zustand bis mind. 50 bar möglich (Betonversuchsaufbau versagte bei 81 bar),
- ausreichende Einbindung in den Beton und Anbindung des Gewebeschlauchs an die Fuge,
- bei Überwachung des Packerdruckes während einer Injektion im Nahbereich der Ringkammer ist eine Anströmung von Injektionsmaterial detektierbar,
- durch Drucktests bzw. Gasentspannungstests kann das Volumen der Ringkammern ermittelt werden.

3 Großtechnische Testung

3.1 Bauwerk

Im Rahmen des Projektes STROEFUN wurde in der 3. Projektphase das Testkonzept für den gegenständlichen in situ-Funktionsnachweis in einem großtechnisch errichteten Dammbauwerk in der Grube Teutschenthal der GTS-Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG realisiert.

In einer neu aufgefahrenen Strecke mit einer Firsthöhe von ca. 4,5 m wurde ein 15 m langer, 2,5 bis 3,1 m breiter und ca. 2,4 m hoher Halbdamm im Steinsalz errichtet – siehe Fig. 3. Die Form des Halbdammes wurde mit dem Ziel der Schaffung einer Zugänglichkeit zu der Oberfläche des Dammes und zu den seitlichen Kontaktflächen zwischen Gebirge und Bauwerk gewählt. Die Ausführung des Bauwerkes als Halbdamm war hinreichend für die Anwendung des Testkonzeptes und ermöglicht vielfältige weitere Untersuchungen an dem Bauwerk. Durch die ca. 6° Neigung der Stöße im Einbaubereich wurden die Voraussetzungen für eine Verspannung des Bauwerkes in der nach oben offenen Versuchsstrecke geschaffen.

Der Standort wurde in einem vorlaufenden Untersuchungsprogramm zu folgenden Schwerpunkten erkundet und parametrisiert:

- Geologie/Mineralogie,
- in situ-Permeabilität (Oberflächenpermeabilität und Permeabilität in Abhängigkeit vom Konturabstand),
- in situ-Spannungsverteilung in Abhängigkeit vom Konturabstand,
- hoch aufgelöstes 3d-Modell auf Basis von mehreren Laserscans als Planungsgrundlage,
- Oberflächenrauigkeit und gezielte Vorbereitung ausgewählter Konturflächen im Bauwerk mit unterschiedlicher Oberflächenrauigkeit

Eine Übersicht der geometrischen Parameter des Halbdammes in Auswertung einer Reihe von 3D-Scans des Standortes und des Bauwerkes sind in Fig. 3 mit dargestellt.

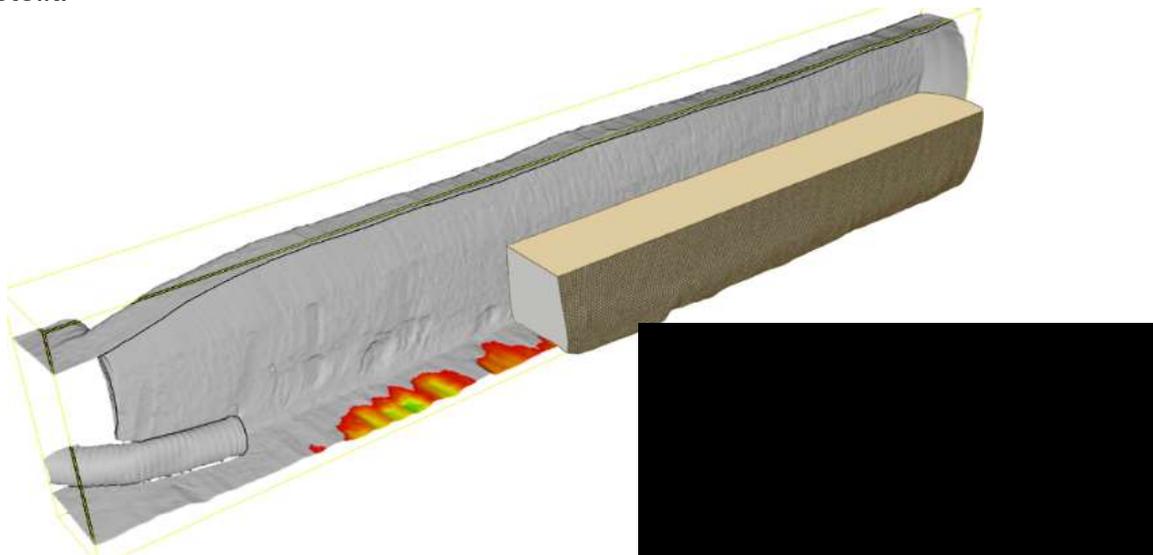


Fig. 3: Positionierung des Halbdammes in der Versuchsstrecke mit ausgewählten geometrischen Daten

3.2 Instrumentierung

In dem Halbdamm wurden 3 Ringkammern (RK01 bis RK03) nahezu radial umlaufend mit der erforderlichen Testinfrastruktur installiert – siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Die Enden der Ringkammern sind bei ca. halber

Dammhöhe in den Dammkörper eingezogen. Dies ist der geometrischen Form des Halbdammes geschuldet. Zur Erfassung der vertikalen Strömungsprozesse in Richtung der Dammoberfläche wurden oberhalb der radial verlaufenden Ringkammern zusätzlich zwei horizontale Ringkammern (HK01 und HK02) in axialer Richtung an den beiden Stößen installiert – siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Neben der Installation der Testinfrastruktur wurden 10 kabelgebundene Temperatursensoren im Bauwerk und 3 kabellose Drucksensoren an der Kontur des Einbaubereichs positioniert (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Darüber hinaus wurde ein geophysikalisches Messsystem mit Geoelektrik, Georadar und Mikroseismik installiert. Diese Verfahren lieferten zusätzliche Informationen zum Baustoff- und Bauwerksverhalten.

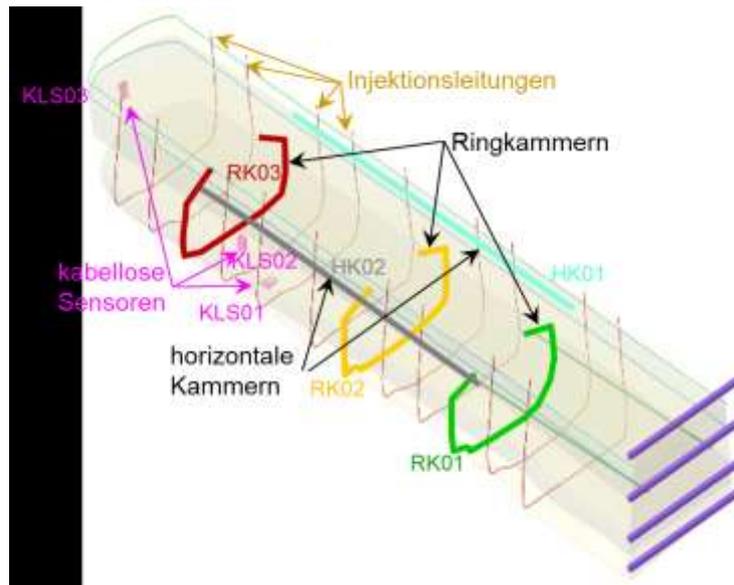


Fig. 4: Schematische Darstellung der Lage der Ringkammern (RK01-RK03), der Horizontalkammern (HK01-HK02), der Injektionsleitungen und der kabellosen Sensoren (KLS01-KLS03)

Über den gesamten Bauverlauf und die Standzeit des Bauwerkes wurden an der Kontur im Streckentiefsten und am südlichen Streckenstoß mit kabellos übertragenden Sensoren die Temperatur und die Spannung im Kontakt Baustoff/Gebirge erfasst. Eine Übersicht der Temperatur- und Spannungsganglinien wird in Fig. 4 gegeben (Sensor KLS01 ist im Versuchsverlauf ausgefallen; Daten sind daher nicht dargestellt). Die ermittelten Parameter bestätigen die Kenntnisse und Erfahrungen zum Materialverhalten der MgO-basierten Dichtbaustoffe. Die exotherme Reaktion des Baustoffes beim Abbinden führt zu einer deutlichen Temperaturerhöhung beim Einbau des Bauwerkes. Über die Zeitdauer kühlt sich das Bauwerk auf die Gebirgstemperatur ab. Im Ergebnis der Volumenzunahme der MgO-Bindemittelmatrix, im Verlauf der fortschreitenden Kristallisation, kommt es für diese Einspannungsbedingungen (für die Volumenbegrenzung) zeitlich nachlaufend zum Abbinden des Baustoffes zur Entwicklung einer mechanischen Einspannung. Zeitabhängig wird dieser Prozess von der Konvergenz des umgebenden Steinsalzgebirges überlagert. Für den Halbdamm hat dies bis zum Juni 2022 zu einer Einspannung des Bauwerkes mit Drücken in der Größenordnung von ca. 13 bar bis ca. 17 bar geführt.

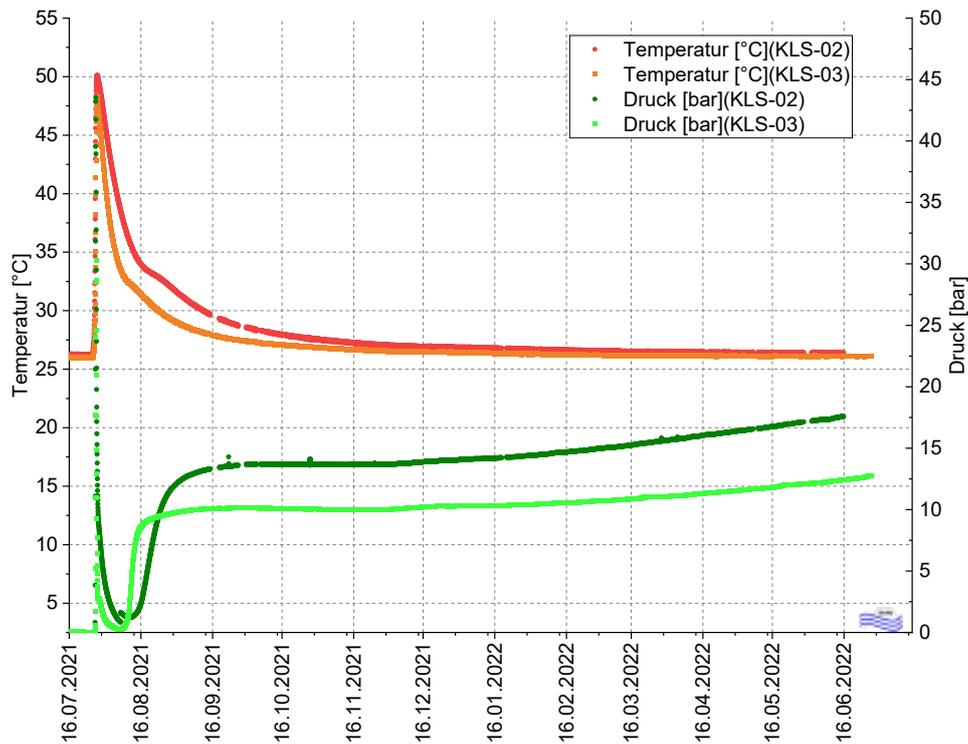


Fig. 4: Temperatur- und Druckganglinien des Bauwerkes

Für die Erprobung des Zusammenspiels aus Injektionen im Konturbereich des Bauwerkes und der installierten Testinfrastruktur wurden neun radial umlaufende und 2 horizontal umlaufende Injektionsschläuche des Systems Predimax installiert. Während des Projektes wurde ein Teil der Injektionsschläuche mit MgO-Suspension oder Epoxidharz verpresst.

Die Injektionsschläuche und die Ringkammern wurden konventionell mit Schlauchschellen und Nageldübel an den Stößen befestigt, wobei im Bereich der Ringkammern die Gebirgskontur mittels Flachmeißel händisch geglättet wurde.

Die Kunststoffrohre für den Anschluss der Ringkammern wurden frei im Betonage-raum aufgehängt. Als Installationshilfe für die Ringkammern und die Anschlussleitungen der Ringkammern wurden im axialen Abstand von 1 Meter eine Vielzahl von Stahldrähten zwischen der Streckensohle und dem Zwischenboden über dem Bauwerk gespannt. Einen Eindruck zu der fertiggestellten Installation im Bauwerk vor der Betonage wird in Fig. 5 gegeben. Die senkrecht hängenden Kunststoffrohre sind Platzhalter für spätere Bohrungen durch das erstellte Bauwerk zur Erkundung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge in der Streckensohle.



Fig. 5: Blick in die fertiggestellte Installation (links, zum hinteren Stoß; rechts in Richtung der Schalung)

4 Testung

4.1 Durchführung

Nach der Errichtung und Abkühlung des Bauwerkes wurde im Rahmen des Projektes STROEFUN eine Vielzahl von strömungstechnischen Tests mit Druckbeaufschlagung der unterschiedlichen Ringkammern mit Gas durchgeführt. Jeder Test umfasst die Druckbeaufschlagung einer Ringkammer und die Erfassung der Druckreaktionen in den weiteren Ring- und Horizontalkammern.

Ausgehend von der Testung aller Ringkammern im September 2021 (Referenztest) erfolgte im Rahmen des Vorhabens die Wiederholung der Tests für alle Ringkammern in Abhängigkeit von:

- der Standzeit des Bauwerkes,
- der Variation der strömungstechnischen Wirkung der Injektionsleitungen,
- der fortschreitenden Erkundung des Bauwerkes über Vertikalbohrungen durch den Bauwerkskörper und dem sich daraus ergebenden Kenntnisstand zur strömungstechnischen Wirkung der Betonierfuge,
- der Injektion ausgewählter Injektionsleitungen im Bereich der vorderen und hinteren Ringkammern (RK01, RK03).

Die Ergebnisse der durchgeführten 54 Tests werden im Endbericht zum Forschungsvorhaben [4] dokumentiert und erläutert.

An dieser Stelle soll als Beispiel für die Durchführung eines Tests das Ergebnis des letzten strömungstechnischen Tests der mittleren Ringkammer (RK02) am 13. Juni 2022 dargestellt und kurz erläutert werden.

Die Druckganglinien dieses Tests sind im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur modellbasierten Auswertung des Tests im nachfolgenden Abschnitt 4.2 in Fig. 8 dargestellt.

Die Druckganglinien in Fig. 8 verdeutlichen, dass es, für die spezifischen Bedingungen des Halbdammes, innerhalb von 300 Sekunden zu einer Druckreaktion in der vorderen Ringkammer (RK01, grüne Ganglinie) und nach ca. 400 Sekunden zu einer sichtbaren Druckreaktion in der hinteren Ringkammern (RK03, rote Ganglinie) kommt. In einem Zeithorizont von 3000 Sekunden ist der Druck der beaufschlagten mittleren Ringkammern (RK02, orange Ganglinie) vollständig abgefallen.

Im Ergebnis der Erkundung des Halbdammes wurden im Kontakt des Baustoffkörpers zum Gebirge vorhandene strömungstechnische Wegsamkeiten identifiziert. Die Fotos von Kernen aus dem Kontaktbereich Baustoff/Gebirge und die computertomografische Aufnahme eines solchen Bereiches in Fig. 6 soll einen Eindruck zur Anbindung des Baustoffes an das Gebirge geben. Im Ergebnis von laborativen Untersuchungen zur Permeabilität von Kernproben aus diesem Bereich wurde ein Wertebereich der Permeabilitäten im Kontakt Baustoff/Gebirge von $k=1,0E-18 - 1,4E-14 \text{ m}^2$, $N=12$ ermittelt. Dies bestätigt die bereits aus Fig. 6 visuell erkennbare Variation der Anbindung des Baustoffes an das Gebirge.

Vor dem Hintergrund dieser Kenntnisse ist davon auszugehen, dass der Strömungsprozess und damit die Druckganglinien für die einzelnen Ringkammern (siehe Fig. 8) maßgeblich von den Strömungsprozessen im Kontakt Baustoff/Gebirge bestimmt wird. Dies entspricht grundsätzlich den Erfahrungen, die bereits für andere Dichtbauwerke aus kohäsiven Materialien gewonnen wurden.

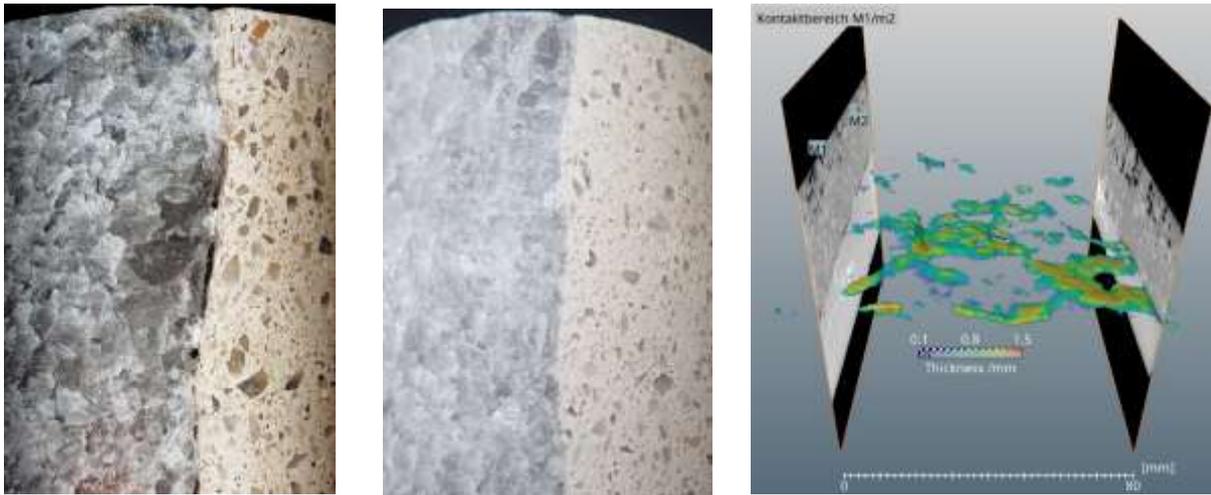


Fig. 6 Anbindung im Kontakt MgO-Baustoff/Steinsalzgebirge, links: sichtbare Wegsamkeiten und unzureichende Anbindung, Mitte: augenscheinlich gute Anbindung, rechts: Darstellung des Porenraumes im Kontakt im Ergebnis einer CT-Aufnahme (HZDR, Herr Dr. J. Kulenkampff, 25.08.2022)

Vor dem Hintergrund der Anzahl der durchgeführten Tests und dem großen Kenntniszuwachs aus jeder Testung der Ringkammern sowie der vielfältigen Beeinflussung der Strömungsprozesse durch die oben genannten Abhängigkeiten erfolgte im Verlauf des Forschungsvorhabens nicht, wie ursprünglich vorgesehen, die vollständige Injektion aller Injektionsleitungen und die Testung des Bauwerkes mit Salzlösung. Die vorhandene Testinstallation ermöglicht die Durchführung dieser Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt. Die dabei gewinnbaren Kenntnisse zur Injektion, zum Einfluss der Injektion auf die Permeabilität im Kontakt Baustoff/Gebirge und zum Einfluss von Salzlösung auf die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes sind, aus Sicht der Bearbeiter, von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis der Strömungsprozesse und die Beeinflussung der Strömungsprozesse in MgO-basierten Verschlussbauwerken.

4.2 Auswertung

Grundlage der Auswertung der durchgeführten in situ-Tests bilden die Kenntnisse zur Geometrie des Bauwerkes und der installierten Kammern, die Volumen der Kammern, die thermodynamischen Bedingungen am Standort, die strömungstechnischen Eigenschaften des verwendeten Gases sowie die in den Tests ermittelten Druckganglinien. Auf der Grundlage dieser Eingangsgrößen wird für jeden Test ein verallgemeinertes numerisches Modell erstellt, das die für die Auswertung relevanten Flächen, Abstände, Volumen und strömungstechnischen Eigenschaften der einzelnen Teilströmungsräume - Baustoffkörper, Auflockerungszone Gebirge, Gebirge, Kontakt Baustoffkörper/Gebirge – abbildet. In Fig. 7 wird, in einer Übersicht, ein Beispiel eines solchen Modells gegeben.

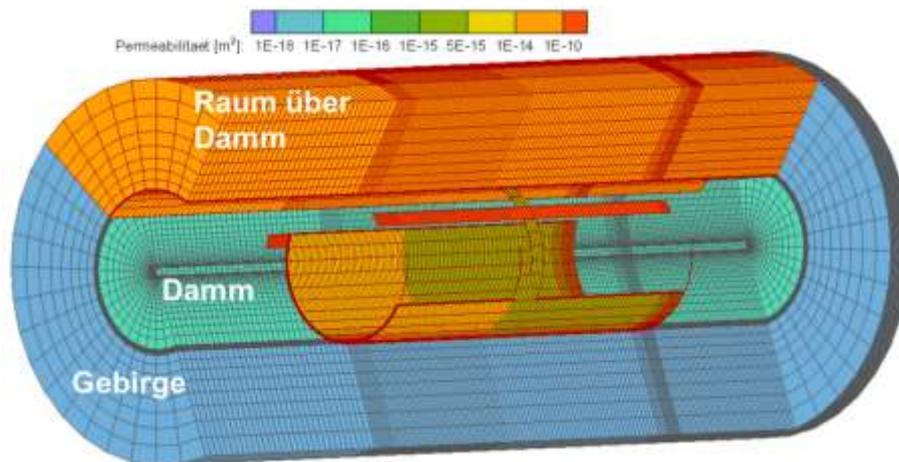


Fig. 7: Übersichtsdarstellung des numerischen Modells für die Auswertung der in situ-Tests im Bauwerk

Die modellgestützte Auswertung berücksichtigt die Phase der Druckbeaufschlagung und des instationären Strömungsprozesses im gesamten Bauwerk nach Beendigung der Druckbeaufschlagung. Damit ist gewährleistet, dass das in der Druckbeaufschlagung injizierte Fluidvolumen vollständig in Massenbilanz der Berechnungen berücksichtigt wird.

Auf der Grundlage der Kenntnisse und Erfahrungen zur bestimmenden Durchlässigkeit des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge, den Ergebnissen der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Kontakt Baustoff/Gebirge sowie den Ergebnissen der Kernuntersuchungen aus diesem Bereich erfolgte für die Anpassung in 1. Linie die Variation der Permeabilität im Kontakt Baustoff/Gebirge (siehe Fig. 6 und Fig. 7). Für die Auflockerungszone im Gebirge wurde, ausgehend von den Ergebnissen der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen und der modellbasierten Anpassung, eine integrale Permeabilität von $1\text{E}-18 \text{ m}^2$ vorgegeben. Die Permeabilität des massiven Baustoffes wurde, auf der Basis der laborativen Untersuchungen an Kernproben, mit $k=8\text{E}-19 \text{ m}^2$ berücksichtigt.

Von den 54 durchgeführten Bauwerkstests wurden 11 modellbasiert ausgewertet. An dieser Stelle ist beispielhaft das Auswertungsergebnis für die letzte Testung des Bauwerkes im Projektverlauf am 13. Juni 2022 dargestellt – siehe Fig. 8. In dem Test wurde die mittlere Ringkammer (RK02, orange Druckganglinie) mit Gasdruck beaufschlagt. Eine Erläuterung zum Verlauf des Tests wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt 4.1 gegeben. Eine Übersicht der im Testverlauf gemessenen und auf der modellbasiert berechneten Druckganglinien wird in Fig. 8 gegeben.

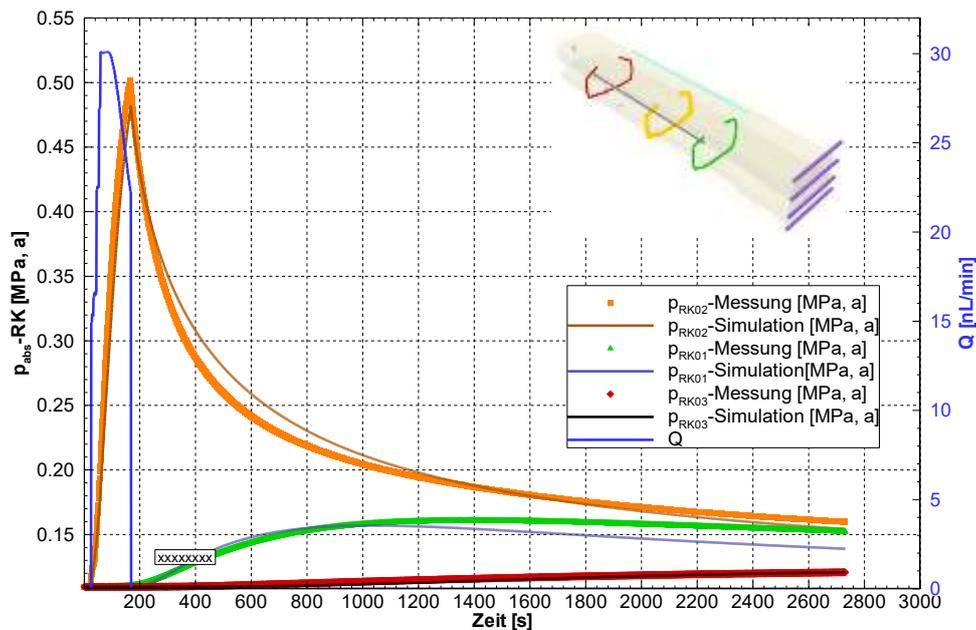


Fig. 8: Gemessene und berechnete Druckganglinien des Bauwerkstest am 13. Juni 2022, Druckbeaufschlagung der mittleren Ringkammern

Der Stand der modellbasierten Nachrechnung (Parameteridentifikation) des Tests zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Druckganglinien. Es kann gezeigt werden, dass mit dem angewendeten Modellkonzept und dem erstellten Modell eine repräsentative Nachrechnung der strömungstechnischen Vorgänge im Verlauf einer Testung und die Identifikation der Permeabilität des Kontaktes Baustoff/Gebirge möglich ist.

Aus den bisherigen Auswertungen wurden für den Kontakt Baustoff/Gebirge zwischen den einzelnen Ringkammern folgende Wertebereiche der effektiven Gaspermeabilität ermittelt:

RK01-RK02: $7,0E-15 - 1,4E-14 \text{ m}^2$

RK02-RK03: $9,0E-16 - 4,0E-15 \text{ m}^2$.

Wie bereits aus der Darstellung der Druckganglinien in Fig. 8 deutlich wird, ist, aufgrund der geringeren Druckreaktion, von einer geringeren Permeabilität zwischen der 2. und 3. Ringkammer auszugehen.

Die gewonnenen Kenntnisse zur Permeabilität im Kontakt Baustoff/Gebirge gelten für die spezifischen Bedingungen des Halbdammes. Eine Übertragung auf die strömungstechnische Situation in anderen MgO-basierten Bauwerken ist nicht möglich.

5 Schlussfolgerungen

Im Forschungsvorhaben STROEFUN [3] wurde ein alternatives Konzept für die strömungstechnische Testung von Streckenverschlussbauwerken entwickelt, installiert und erfolgreich getestet. Es basiert auf folgenden Schwerpunkten.

- Installation von drei Ringkammern im Bauwerksverlauf mit standortbezogen wählbaren Abständen zwischen den Kammern.
- Anschluss der Ringkammern über Druckleitungen, die im Bauwerk vorinstalliert sind und nach Abschluss der Testung rückgebaut und qualitätsgerecht verfüllt werden.
- Die Ringkammern ermöglichen die Druckbeaufschlagung bzw. Erfassung der Druckreaktion im Verlauf der strömungstechnischen Testung des Bauwerkes bzw. von Abschnitten des Bauwerkes.

- Das Funktionsprinzip der Ringkammern ermöglicht ein operatives Verschließen der Ringkammern bei Injektionsmaßnahmen und wieder Öffnen für die erneute Testung.
- Für die strömungstechnische Testung zwischen den Ringkammern kann jede Kammer in Abhängigkeit vom Permeabilitätsniveau individuell mit Gas- oder Flüssigkeitsdruck im stationären oder instationären Testkonzept beaufschlagt werden.
- Auf der Basis der für die drei Kammern ermittelten Druckganglinien, ist modellgestützt eine Aussage über die Permeabilität des Bauwerkes in Kontakt Dichtbaustoff/Gebirge und daraus abgeleitet für die integrale Permeabilität des Bauwerkes möglich.

Das Konzept konzentriert sich auf die Testung des Kontaktbereiches Baustoff/Gebirge als bestimmenden Strömungsraum für die Dichtwirkung von Streckenverschlussbauwerken auf der Grundlage von hydraulisch abbindenden Dichtmaterialien. Die Testung des gesamten Querschnittes des Dichtsegmentes ist ebenfalls möglich, wird jedoch in dem aktuell entwickelten Konzept nicht untersucht. Es wird davon ausgegangen, dass durch die materialspezifische, qualitätsüberwachte Einbautechnologie eine hinreichende Dichtheit des massiven Dichtsegmentes aus hydraulisch abbindendem Baustoff gewährleistet ist.

Das entwickelte und erfolgreich angewendete Testkonzept ermöglicht die individuelle strömungstechnische Testung von in situ errichteten Bauwerken bzw. Bauwerksabschnitten und ist damit ein zusätzlicher Baustein für den gegenständlichen strömungstechnischen Funktionstest von Streckenverschlussbauwerken im Rahmen der Nachweisführung. Die im Ergebnis der Testung verbleibenden Installationen nehmen keinen Einfluss auf die weitere Funktionsweise des Bauwerkes.

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens liegen darüber hinaus umfangreiche Kenntnisse zur Geologie, zur Parametrisierung des Bauwerkes und des umgebenden Gebirges und zu den thermodynamischen Bedingungen am Standort vor. Der im Rahmen des Vorhabens erstellte Halbdamm erlaubt aufgrund seiner Zugänglichkeit und der Standortbedingungen eine Vielzahl an Untersuchungen, die an anderen Dämmen, die aus A1 bestehen, nicht ohne erheblichen Mehraufwand durchgeführt werden können oder aus genehmigungsrechtlichen Gründen gar nicht möglich sind. Dies betrifft zum Beispiel die nachträgliche Vergütung des Bauwerkes durch Injektion mit Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung der Vergütung sowie das zeitabhängige Baustoffverhalten im Kontakt zur Atmosphäre und im Kontakt zur Salzlösung.

6 Danksagung

Grundlage des Vorhabens bildet die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Forschungskennzeichen 02 E11748A.

Das Gelingen des Vorhabens basiert auf der fachlich kompetenten, kollegialen und pragmatischen Zusammenarbeit der nachfolgend genannten Projektpartner und der immer sehr konstruktiven und helfenden Unterstützung durch den Projektträger Karlsruhe als Vertreter des Fördermittelgebers.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie vertreten durch den Projektträger Karlsruhe

Projektleitung:

TU Clausthal, Institut für Bergbau

Projektpartner:

BGE TECHNOLOGY GmbH

Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf

IBeWa-Ingenieurpartnerschaft

K-UTECH AG Salt Technologies





7 Quellen

- [1] Weber, Jonas; Wilsnack, Thomas; Langefeld, Oliver; Bollingerfehr, Wilhelm; Grafe, Friedemann; Hesse, Antja et al. (2016): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung. Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden (FKZ 02E11253)
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV), Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)
- [3] TU-CZ (2022): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches (STROEFUN), Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, in situ-Versuche. TU Clausthal-Zellerfeld, Institut für Bergbau, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen: 02E11748A, Laufzeit: 01.01.2019 – 30.06.2022 (in Vorbereitung)
- [4] TU-CZ (2022): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung, Phase III: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel, in situ-Versuche. Präsentation zum Fachgespräch am 02.02.2022, TU Clausthal-Zellerfeld, Institut für Bergbau, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen: 02E11748A, Laufzeit: 01.01.2019 – 30.06.2022 (in Vorbereitung)