



TU Clausthal
Institut für Bergbau

21. Kolloquium Bohr- und Sprengtechnik



30 und 31 Januar 2019
in Clausthal-Zellerfeld

Tagungsband

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

Kolloquium Bohr- und Sprengtechnik 2019

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Tudeski

Organisation. Thorben Plett, M.Sc.

Dipl.-Ing. Thomas Hardebusch

Redaktion. Jan Hußmann

Langefeld, O., Tudeski, H. (Hrsg.):

Bohr- und Sprengtechnik

21. Kolloquium, TU Clausthal,

30. und 31. Januar 2019

© Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2019

Telemannstraße 1, 38678 Clausthal-Zellerfeld

www.papierflieger-verlag.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1 Auflage, Clausthal-Zellerfeld, 2019

ISBN 978-3-86948-668-0

© 2019 bei den Autoren der Beiträge. Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich. Der Herausgeber übernimmt keine Verantwortung für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben.

Erfahrungen und Arbeitsschritte beim Verfüllen von Erkundungsbohrungen in dem ehemaligen Erkundungsbergwerk Gorleben und in der Schachtanlage Asse II

Reinhard Köster Michael Sniehotta, Ingolf Kretschmer Maximilian Hayart; Dr Hans-Joachim Engelhardt
Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE); BGE TECHNOLOGY GmbH

Zusammenfassung

Nach Abschluss der Erkundungsarbeiten verblieben im untertägigen Bereich des Bergwerks Gorleben offene Bohrungen, die zu verfüllen bzw abzudichten waren. Eine Herausforderung war dabei die Verfüllung von sieben großvolumigen, bis zu 530 m langen Erkundungsbohrungen. Diese Bohrungen sind unterschiedlich geneigt und erschlossen neben Steinsalz auch Anhydrit und Carnallitit. Unterschiedliche Bohrlochqualitäten, verursacht durch den Bohrprozess und längere Standzeiten, erforderten Voruntersuchungen, die u. a. Kalibermessungen und Kamerabefahrungen umfassten. Basierend auf den Rahmenbedingungen am Standort und den zu erfüllenden Anforderungen wurden technische Einrichtungen ausgewählt und unter in-situ Bedingungen getestet. Des Weiteren erfolgte die Auswahl von Verfüllbaustoffen. Sie ergab, dass aufgrund der geforderten Langzeitbeständigkeit und des kraftschlüssigen Verbundes mit dem Gebirge als Verfüllmaterial Magnesiabinder geeignet sind. Bekannte Rezepturen waren jedoch aufgrund unzureichender Verarbeitungszeiten nicht zur Verfüllung sämtlicher Bohrungen geeignet. Aus diesem Grund wurde eine weitere Rezeptur entwickelt und qualifiziert. Die Arbeiten erfolgten im Labor und im Bergwerk Gorleben und mündeten in einem Simulationsversuch, der die Verfüllung einer durchschlägigen Bohrung umfasste. Zum Nachweis der vollständigen oder allgemein anforderungskonformen Verfüllung wurde ein Qualitätssicherungskonzept mit Prüfanweisungen entwickelt.

Die Verfüllung der Bohrungen erfolgte im Zeitraum von April 2015 bis April 2016. Zum Einsatz kam neben dem entwickelten Baustoff die bewährte Rezeptur IM-Asse-1. Eingesetzt wurden Vor-/Trockenmischungen der Bindemittel mit den weiteren Feststoffkomponenten. Sie wurden wie die Anmischlösung gekühlt, um den Temperaturanstieg im Kolloidalmischer zu begrenzen. Zur Vermeidung von Verstopfern durch Abfiltrate erfolgte das Verfüllen der Bohrungen mittels Schlauch- bzw Exzenterorschneckenpumpe und mit einer modifizierten Coiled Tubing-Einheit, wobei die Verfüllleitung beim Verfüllen gezogen wurde. Diese Vorgehensweise ermöglichte das unterbrechungsfreie Verfüllen der Bohrungen. Auf der Basis der Daten der Qualitätssicherung und der Bilanzierung der ein- und ausströmenden Baustoffmengen, konnte die vollständige Verfüllung sicher nachgewiesen werden.

Die Bohrungen konnten somit entsprechend den „Richtlinien für Sicherheitsmaßnahmen beim Herstellen und beim Verfüllen von Untersuchungsbohrungen sowie beim Abdichten von Zuflüssen durch Einpressen von Dichtmitteln im Salzbergbau“ vom 12.01.1981 des damaligen Oberbergamtes [1] sowie darüber hinaus gehender Anforderungen verfüllt werden. Demzufolge war es auch möglich, den Sicherheitspfeiler gemäß § 224 Abs. 1 der Allgemeinen Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen (ABVO) aufzuheben.

Ein weiterer Einsatz der neu entwickelten Baustoffrezeptur erfolgte auf der Schachtanlage Asse II. In diesem Fall wurde der Baustoff über Tage angemischt, wobei die in Gorleben entwickelte Technik zum Einsatz kam. Nach dem Transport nach unter Tage konnte die Bohrung problemlos verfüllt werden.

1 Einleitung

Der Salzstock Gorleben wurde mehrere Jahrzehnte geologisch erkundet, mit dem Ziel die Eignung als Endlager für hochradioaktive Abfälle zu bewerten. Untertägige Arbeiten erfolgten auf der 820 m- und 840 m-Sohle im schachtnahen Erkundungsbereich 1. Mit der Verabschiedung des Standortauswahlgesetzes (StandAG) am 27. Juli 2013 wurden diese Arbeiten eingestellt. Am 29.07.2014 verständigten sich das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und das Niedersächsische Ministerium für Umwelt (NMU) den Erkundungsbereich 1 außer Betrieb zu nehmen und abzusperren. Demzufolge waren alle Anlagen, Komponenten und Systeme zu entfernen. Offene Bohrungen waren gemäß der „Richtlinien für Sicherheitsmaßnahmen beim Herstellen und beim Verfüllen von Untersuchungsbohrungen sowie beim Abdichten von Zuflüssen durch Einpressen von Dichtmitteln im Salzbergbau“ vom 12.01.1981 des damaligen Oberbergamtes [1] vollständig und damit ohne Luft- oder Spülungseinschlüsse zu verfüllen bzw. abzudichten. Dies betraf auch sieben Erkundungsbohrungen mit einer Länge von ca. 100 – 530 m. Die Bohrungen erschlossen Anhydrit, Steinsalz und Carnallitit. Aufgrund der längeren Standzeiten der Bohrungen waren das Auftreten von Gebirgslösung und der Bohrlochzustand, wie die Güte der Kontur zu prüfen.

Die Rahmenbedingungen stellten hohe Anforderungen an die Misch- und Verfülltechnik sowie an die Verfüllbaustoffe, insbesondere an deren Verarbeitungszeit und Fließfähigkeit. Auf der Basis der Befunde eines Qualitätssicherungsprogramms war die vollständige und anforderungskonforme Verfüllung sicher nachzuweisen. Nach Abschluss der Arbeiten in Gorleben erfolgte auf der Schachtanlage Asse II eine weitere Bohrungsverfüllung, bei der der für Gorleben entwickelte Baustoff über Tage anzumischen und für die Bohrlochverfüllung nach unter Tage zu transportieren war. Ziel dieser Publikation ist, die Vorgehensweise, die zur erfolgreichen Verfüllung sämtlicher Bohrungen führte, sowie die technischen Ausrüstungen und Baustoffe zu beschreiben.

2 Rahmenbedingungen im Bergwerk Gorleben

Im Bergwerk Gorleben wurden auf der Wettersohle (820 m) und auf der Erkundungssohle (840 m) im Infrastrukturbereich sowie im Erkundungsbereich 1 (EB1) Bohrungen zur Erkundung des Salzgebirges gestoßen. Die Bohrungen wurden mit HQ-Gestänge im Seilkernverfahren gestoßen (Bohrloch-/Kerndurchmesser 98,0 mm/63,0 mm). Als Spülmedium diente Luft; war der Bohrkernaustrag nicht mehr gewährleistet, beispielsweise in Folge des Auftretens von Lösung und feuchtem Bohrklein oder bei zu großer Bohrteufe, so wurde auf eine an Magnesiumchlorid gesättigte Lösung umgestellt. Die Bezeichnung der Bohrungen setzt sich in Gorleben zusammen aus einer Nummerierung, der die Buchstabenkennzeichnung RB vorgestellt wird. Im Jahr 2015 waren noch sieben Bohrungen mit den Bezeichnungen RB132, RB238, RB255, RB639, RB640 und RB815 zu verfüllen. Informationen zu den Bohrungen gibt die Tabelle 1 wieder.

Die Bohrung RB032 konnte ursprünglich nicht verfüllt werden, da der Zementierstrang abbrach. Bei den Aufwältigungsarbeiten riss die Bohrgarnitur, so dass Teile der Bohr- und Fanggarnitur sowie des Zementierstranges im Bohrloch verblieben. Der Strang und die Garnituren konnten vor der endgültigen Verfüllung der Bohrung vollständig entfernt werden. Bei diesen Arbeiten wurde der Bohrlochdurchmesser auf 152 mm erweitert.

Tabelle 1: Angaben zur Lokation der großvolumigen Bohrungen
Index*: Bohrungen sind durchschlägig

Erkundungsbohrung	Sohle [m]	Jahr	Länge [m]	Einfallen, Neigung [gon]	Volumen [m ³]
RB132	820	2011	161	(-) 1	1,2
RB238*	820	1998	121	(-) 1	0,9
RB255	840	2011	531	(-) 1 bis (-) 9	4,0
RB639*	840	2011	360	(+) 2	2,7
RB640	840	2012	344	(-) 23	2,6
RB815	840	2011/12	99	(-1)	0,7
RB032	840	1997	427	(-3)	7,5

Von besonderer Relevanz ist auch, dass im Hinblick auf die Arbeitssicherheit sehr günstige Rahmenbedingungen geschaffen wurden. So stand hinreichend Platz für den Aufbau und sicheren Betrieb der Geräte zur Verfügung sowie für den Einsatz von Transportfahrzeugen.

3 Klärung der weiteren Randbedingungen

Vorsorglich wurden die jeweiligen Bohrungen mit einer Kamera befahren. Zudem erfolgten Kalibermessungen, da bei den Standzeiten der Bohrungen davon auszugehen war, dass die Gebirgskonvergenz den Durchmesser und die Form der Bohrlöcher beeinflusste. Die Kalibermessungen dienten auch der Bewertung der Befahrbarkeit und Stabilität der Bohrlöcher und gaben Hinweise auf Klüfte und Ausbruchszonen. Das Abtasten der Bohrlochwände erfolgte mit einer 4-Arm-Sonde, deren Arme jeweils 90° zueinander versetzt angeordnet waren. Auf diese Weise konnten teufenabhängig mittlere Querschnittsflächen und Volumina berechnet werden. Die Vorarbeiten zeigten, dass sich in den Bohrungen RB132 und RB238 feuchtes Bohrklein und geringe Mengen an Salzlösungen befanden, die vor der Verfüllung entfernt wurden. Grundsätzlich wurden sämtliche Bohrlöcher gründlich gereinigt, um einen anforderungsgerechten Kontakt des Verfüllmaterials mit der Bohrlochkontur zu erhalten.

4 Festlegung von Anforderungen an das Verfüllmaterial und Materialentwicklung

Die Auswahl bzw. die Entwicklung von Verfüllrezepturen erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst waren Anforderungen an die Rezeptur und die Ausgangsstoffe festzulegen. Die Anforderungen an die Materialeigenschaften können gegliedert werden in Grundanforderungen sowie in Anforderungen an die Frischmaterialeigenschaften, die mechanischen, hydraulischen und chemischen Materialeigenschaften.

Die Grundanforderungen betreffen die Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe, die Lagerfähigkeit, die Dosier- und Mischbarkeit und die Anforderungen bezüglich der Zulassung nach der Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV). Besonders wichtig war auch die Gleichförmigkeit der Ausgangsstoffe, d.h. die Reproduzierbarkeit der Materialeigenschaften bei aufeinanderfolgenden Chargen der Herstellung.

Frischmaterialeigenschaften sind zu spezifizieren, weil die Bohrlöcher vollständig mit Baustoff verfüllt werden müssen, d.h. keine mit Lösung oder Gas erfüllten Hohlräume in den Bohrlöchern verbleiben durften. Dies erfordert eine gute und hinreichend lange Fließfähigkeit und ein vernachlässigbares Baustoffbluten. In den Bohrungen trat neben Steinsalz auch das Gestein Carnallit bzw. das Mineral Carnallit auf. Reaktionen der Baustofflösung mit Carnallit ($KMgCl_3 \cdot 6H_2O$) könnten zur Bildung lösungserfüllter Hohlräume führen und die Anbindung des Baustoffes mit dem Gebirge beeinträchtigen. Um An- und Umlöseprozesse zu vermeiden, sollte der Baustoff an $MgCl_2$ hoch konzentriert sein. Zudem wurde davon ausgegangen, dass eine Volumenzunahme beim Erhärten bzw. der Aufbau eines Drucks in Folge der Mineralbildungen beim Erhärten vorteilhaft für die Anbindung an das Gebirge ist. Zudem dürfen sich feine und

grobe Bestandteile nicht entmischen, d.h., dass die Sedimentationsstabilität gewährleistet sein muss. Die mechanischen Anforderungen orientierten sich an den Eigenschaften der Gesteine. So sollten die Festigkeiten der Baustoffe im Vergleich zum Steinsalz höher sein. Aufgrund der Tatsache, dass nur ein Kontakt mit MgCl₂-reichen Lösungen zu erwarten ist, sollte der erhärtete Baustoff in diesen Lösungen langzeitstabil sein. Zudem wurde als Anforderung eine Lösungspermeabilität von < 10⁻¹⁷ m² (Prüffluid MgCl₂-Lösung) festgelegt.

Im nächsten Schritt wurde geprüft, ob spezifikationskonforme Baustoffe bereits zur Verfügung stehen. Aufgrund der geforderten MgCl₂-reichen Anmischlösung sowie der Langzeitstabilität der Bohrlochverfüllungen kamen als Baustoffe Magnesiabinder in Betracht. Für die Verfüllung geringvolumiger Bohrungen wurde die Rezeptur IM-Asse-1 in Betracht gezogen. Für großvolumige Bohrungen stand aufgrund der geforderten Verarbeitungszeit kein Standardbaustoff zur Verfügung.

Auf der Basis eines Injektionsmittels wurde daher ein für den Einsatzfall optimierte Rezeptur entwickelt mit Magnesiumoxid der Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH als Bindemittel, der Bezug nehmend auf die Brennbedingungen des Magnesiumoxids als ETO-I (ETO: Etagenofen) bezeichnet wurde.

Die Optimierung der Rezepturen und der Nachweis der geforderten Materialeigenschaften erfolgten im Rahmen von Labor- und in-situ-Untersuchungen. Die in-situ-Untersuchungen können in Handhabungsversuche gegliedert werden. Sie hatten das Ziel einzelne der geforderten Materialeigenschaften nachzuweisen. Die Handhabungsversuche dienten auch dazu die Eignung der technischen Einrichtungen zu testen und Probekörper der Baustoffe unter realitätsnahen Bedingungen herzustellen. So kann der beim Mischen und Rohrleitungstransport auftretende Energieeintrag durch Scherung die Festmaterialeigenschaften eines Baustoffs beeinflussen. Da mit der Rezeptur ETO-I noch keine Bohrungen verfüllt wurden, endete die Entwicklungsreihe mit einem Simulationsversuch, d.h. der Verfüllung einer durchschlägigen Bohrung in Gorleben.

Sämtliche Prüfungen basierten auf Normen der Baustofftechnologie, jedoch wurde die Durchführung an die Charakteristika der Baustoffe (z. B. Wasserlöslichkeit) und die Belastungsbedingungen am Standort (z. B. Temperatur) angepasst. Bestimmt wurden

- das Fließverhalten (Fließrinnenmaß, Marshtrichter, vgl. DIN EN 13395-2, DIN EN 445, DIN EN 14117) in Abhängigkeit der Zeit (Labor, in-situ) sowie das Ausbreitmaß mit einem Trichter (Labor),
- die Dichte der frischen Baustoffe (Labor, in-situ, DIN EN 12350-6, DIN EN 12350-7) und erhärteter Probekörper (Labor, DIN EN 12390-7),
- die Homogenität erhärteter Probekörper und das Baustoffbluten (Labor),
- die Anbindung an das Gebirge durch Zugprüfungen (Anhydrit, Carnallitit und Steinsalz im Labor, Steinsalz in-situ)
- die Volumenexpansion beim Erhärten (Labor) und
- die Temperaturentwicklung mit Hilfe eines Kalorimeters.

Des Weiteren wurden im Labor Probekörper in Salzlösungen gelagert, um potentiell mögliche Änderungen der Baustoffe, die durch Reaktionen mit Salzlösungen und durch die Aufsättigung des Porenraumes hervorgerufen werden, zu prüfen. Zudem wurde der mineralogische Phasenbestand der Baustoffe ermittelt. Externe Prüfinstitutionen bestimmten die einaxiale Druckfestigkeit (DIN EN 12390-3), das statische Elastizitätsmodul (DIN 1048-5) und die einaxiale Zugfestigkeit (DAFStb-Richtlinie, Heft 422, 1991) sowie die Gas- und Lösungspemeabilität von Probekörpern, die in Gorleben hergestellt wurden. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der beiden eingesetzten Rezepturen. Die Anmischlösung ist eine 33-%ige $MgCl_2$ -Lösung

Tabelle 2: Zusammensetzung der Rezepturen IM-Asse-1 und ETO-I (ohne Luftporen).

	IM-Asse-1 [Ma.-%]	[kg/m ³]	ETO-I (Styromag) [Ma.-%]	[kg/m ³]
Magnesiumoxid	17,4	322	23,0	488
Salzgrus	44,6	826	15,0	318
Baryt	0,0	0,0	25,0	531
$MgCl_2$ -Lösung	38,0	704	37,0	786
Summe	100,0	1.852	100,0	2.123

Die rheologischen Untersuchungen zeigten, dass das Fließvermögen des Baustoffs erwartungsgemäß von der Mischintensität abhängig ist und die Dauer der Fließfähigkeit von der Temperatur. Handhabungsversuche, die im Bergwerk Gorleben durchgeführt wurden, zeigten das die Fließfähigkeit etwa acht Stunden nach dem Anmischen abnimmt, womit die hinreichende Verarbeitungszeit nachgewiesen werden konnte. Abbildung 1 verdeutlicht an Hand von Temperaturmessungen die längere Verarbeitungszeit des Baustoffs ETO-I im Vergleich zur Rezeptur IM-Asse-1 und zeigt, dass bei starkem Energieeintrag durch Scherung, wie beim wiederholten Pumpen, das Erstarren eines Magnesiabinders früher einsetzt.

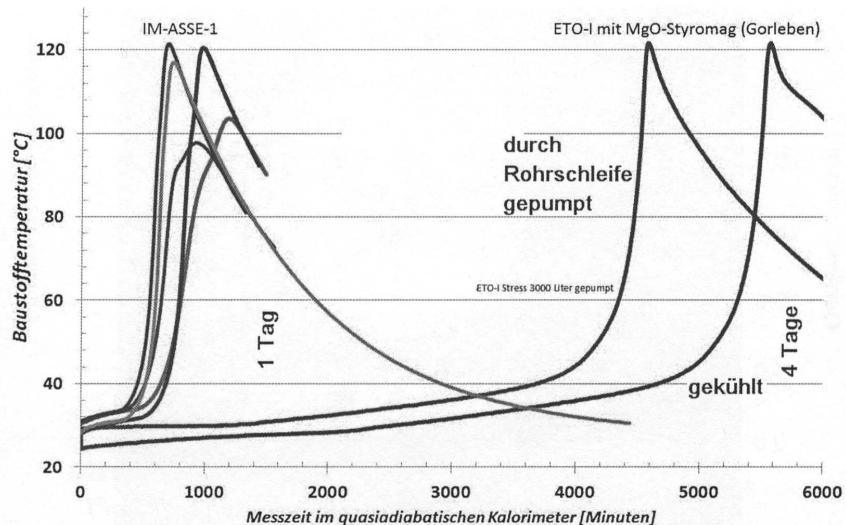


Abbildung 1: Temperaturrentwicklung der Baustoffe IM-Asse-1 und ETO-I

Eine Volumenexpansion bzw. die Entwicklung eines Quelldrucks beim Erhärten wirken sich vorteilhaft auf den Verbund eines Verfüllbaustoffes mit der Bohrlochwand aus. Zur Quantifizierung der Volumenexpansion wurden Quellmaße auf der Basis von Dichtemessungen berechnet und Änderungen des Durchmessers von Kunststoffrohren im Verlauf der Erhärtung der Baustoffe gemessen („radiales Quellen“). Resultate zeigt die Abbildung 2. Sie belegen Quellmaße bis zu 25 mm/m. Zur Prüfung des Quelldruckes erfolgten sogenannte Glasbruchtests. Die Prüfungen erfolgten bei unterschiedlichen Baustofftemperaturen, weil die Volumenexpansion und der Quelldruck temperaturabhängig sind.

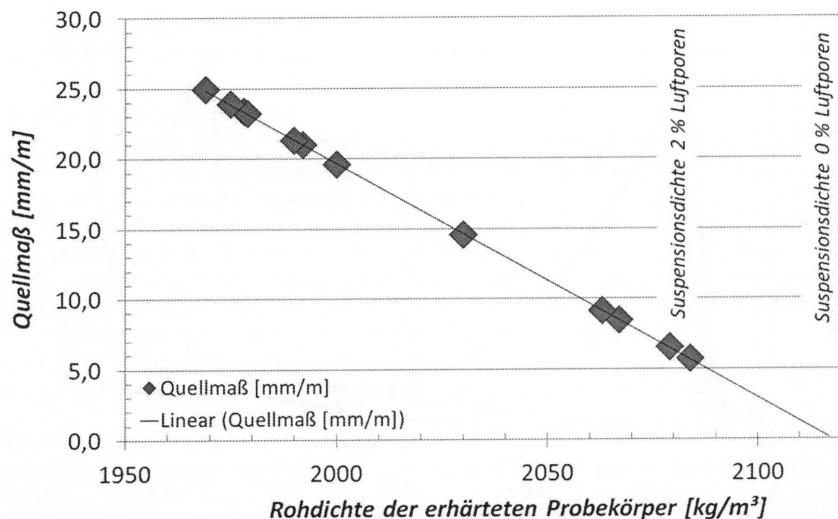


Abbildung 2: Quellmaß (Volumenexpansion beim Erhärten) des Baustoffs ETO I in Abhängigkeit der jeweils festgestellten Dichte der Probekörper (vgl. Tabelle 2).

Zur Prüfung des Verbundes der Baustoffe mit dem Gebirge wurde im Labor frischer Baustoff auf Anhydrit, Carnallitit und Steinsalz aufbetoniert und der Verbund nach der Baustofferhärtung geprüft. Im Bergwerk Gorleben erfolgten Zugprüfungen. Es wurden in der Sohle Bohrungen erstellt, Anker eingesetzt und die Hohlräume wurden dann mit den Baustoffen vergossen. Nach dem Erhärten der Baustoffe wurde die Festigkeit der Bohrlochverfüllungen durch Zugbelastung der Anker geprüft, bis die einzementierten Ankerstangen rissen, aber der Verbund zur Bohrlochkontur weiterhin bestand. Die Ankerstange hatte einen Durchmesser von 17 mm und riss bei einer Zugbelastung von ca. 20 t. Anschließend wurden die Bohrungen mit einer CSK-Krone überbohrt und aus den Bohrkernen Querschnitte präpariert, um die Qualität des Verbundes im Labor weiter zu untersuchen (Abbildung 3). Es wurde ein sehr guter Verbund der Baustoffe mit dem Steinsalz festgestellt.



Abbildung 3: Bohrkerne mit Baustoff IM-Asse-1 und Steinsalz Zugprüfungen im Baustoff einbetonierter Anker zur Untersuchung der Anbindung der Baustoffe an Steinsalzgebirge.

Im Labor wurden für die Rezeptur IM-Asse-1 als Endfestigkeiten einaxiale Druckfestigkeiten von rund 80 MPa ermittelt und statische Elastizitätsmodulen von 37 GPa. Beim Baustoff ETO-I wurden Druckfestigkeiten bis ca. 89 MPa und Elastizitätsmoduln bis etwa 27 GPa ermittelt. Zugfestigkeiten konnten nicht ermittelt werden, weil die einbetonierten Schrauben aus dem Probekörper rissen. Es konnte aber nachgewiesen werden, dass die Zugfestigkeiten oberhalb etwa 3,5 MPa liegen. Die Lösungspmeabilitäten lagen bei beiden Baustoffen in Abhängigkeit der Prüfbedingungen im Bereich von $10^{-18} - 10^{-20} \text{ m}^2$. Demnach konnte die Eignung beider Baustoffe sicher nachgewiesen werden. Die Durchführung der Arbeiten inklusive der Baustoffprüfungen, die mit der Festlegung der technischen Einrichtungen gekoppelt war, dauerte etwa 1,5 Jahre.

5 Technische Ausrüstung zur Verfüllung der Bohrungen

Ein wesentliches Ziel des Arbeitsprogramms war, die technischen Randbedingungen für einen sicheren Verfüllbetrieb herzustellen. Das Verfüllen von Bohrungen erfordert den Einsatz eines breiten Spektrums an Einrichtungen, wobei in Bezug zur Verarbeitungsreihenfolge des Baustoffs Lagereinrichtungen der Ausgangsstoffe, Dosier-, Misch- und Pumpenanlagen inkl. der Messeinrichtungen zur Bestimmung von Baustoffvolumina oder -massen und die Verfüllleitung bzw. das Verfüllgestänge hervorzuheben sind.

In Gorleben wurden nur Trockenmischungen der Feststoffe verarbeitet, die in 500 kg-Bigbags angeliefert wurden, während sich die Lösung in Cubitainern (IBC) befand. Das Anmischen von Feinkornsuspensionen erfordert viel Scherenergie, so dass sich die Baustofftemperatur erhöhen kann. Als Folge verkürzt sich die Verarbeitungszeit (Topfzeit) und erhöhen sich thermische Spannungen, die beim Abkühlen des Baustoffs im Bohrloch entstehen. Die Anmischlösung war zwar hochkonzentriert jedoch nicht vollständig mit $MgCl_2$ gesättigt. Daher war es möglich die Lösung auf rund 9 °C zu kühlen ohne Salzausfällungen befürchten zu müssen. Aufgrund der im Vergleich zur Lösung niedrigeren Wärmekapazität hat die Temperatur der Trockenmischung einen geringeren Einfluss auf die Baustofftemperatur. Durch die Wahl eines geräumigen Kühlcontainers, der zusätzlich ein gleichmäßiges bzw. homogenes Abkühlen der Lösung erlaubte, war es aber möglich, die Trockenmischung und die Lösung zu temperieren (Abbildung 4).

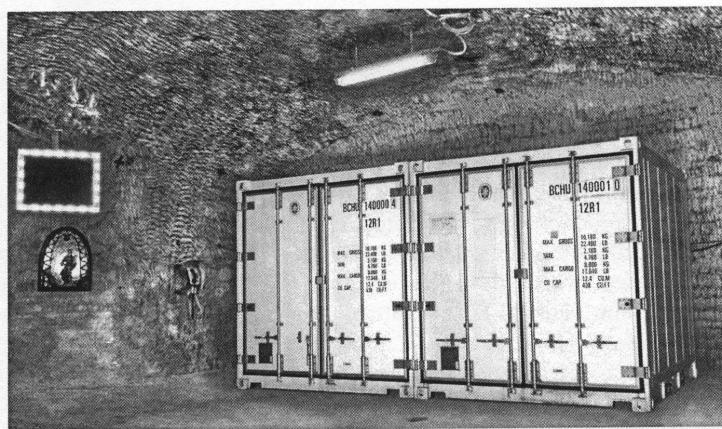


Abbildung 4: Kühlcontainer der Ausgangsstoffe (Vormischung und Salzlösung) im Bergwerk Gorleben (Barabaranische)

Das Anmischen erfolgte mit einem 1,0 m³-Kolloidalmischer (Chargenmischer) als Bestandteil einer SCC-20-Kompaktanlage der Fa. MAT Mischanlagen-technik GmbH, die über eine automatische Verwiegung der Ausgangsstoffe verfügte. Nach Abschluss des Mischprozesses lag die Baustofftemperatur bei etwa 20 °C und damit etwa 9 °C unterhalb der Stoßtemperatur und mehr als 10 °C unterhalb der Gebirgstemperatur. Mit Hilfe einer MAT-Schlauchpumpe gelangten die Mischungen in den Vorlagebehälter der Verfüllpumpe. Umfangreiche Tests ergaben, dass für die Verfüllung am besten eine Exzenter-schneckenpumpe (Hersteller Mai International GmbH, Typ MAT EP-40-100) geeignet ist. Das Schlauch- und Rohrleitungssystem zwischen den beiden aus Redundanzgründen eingesetzten Exzenter-schneckenpumpen wurde so ausgelegt, dass nach dem Verfüllen des Bohrloches durch Umlegen von Schiebern eine anschließende Druckhaltung realisiert werden konnte.

Einen Überblick dieses Systems vermittelt die Abbildung 5. Die Steuerung der Förder-/ Fließrate erfolgte mit Hilfe eines MAT-MES100-Kontrollstandes. Links ist die Bigbag Entladestation und die Förderschnecke der Trockenmischung dargestellt. Am rechten Bildrand sind die Vorlagebehälter (6 m³) zu erkennen.

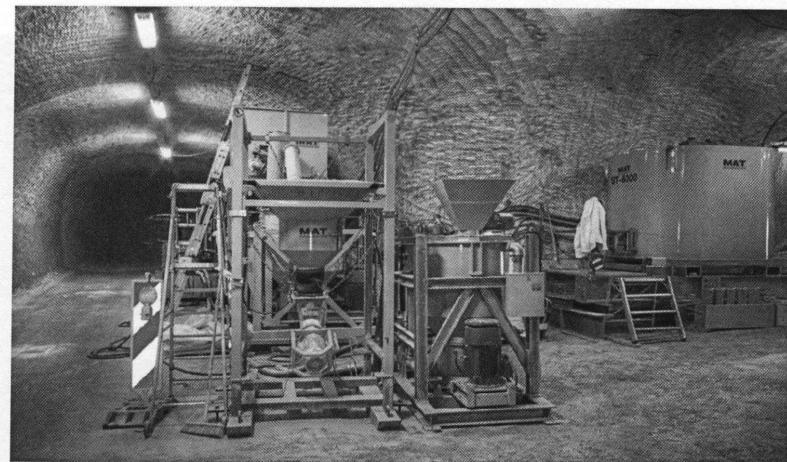


Abbildung 5: Kombinierte Dosier-, Misch- und Pumpenanlage der Fa. MAT Mischanlagen-technik GmbH beim Einsatz auf der 820-m-Sohle des Bergwerks Gorleben

Ziel war die Bohrungen ohne Lüft- und Spülungseinschlüsse zu verfüllen. Dies kann grundsätzlich auch mit einer Rohrleitung (Verfüllgestänge) erfolgen, die in der Bohrung verbleibt. Vorgesehen war jedoch die Leitung während der Verfüllungen vollständig aus den Bohrungen zu entfernen, da sie im erhärteten Baustoff potentielle Wegsamkeiten für Lösungen oder Gase darstellen könnten. Bei einem Lösungskontakt der Metallleitungen könnte zudem eine H₂-Bildung in Folge von Korrosion nicht ausgeschlossen werden.

Als Verfüllleitung diente eine flexible PE-Leitung, die sich auf einer Schlauchwickeleinheit befand (Coiled Tubing-System). Das alternative Verfüllen langer Bohrungen mit einem Gestänge erfordert Teilzementationen, bei denen durch das Abspülen des Baustoffs eine Mischzone entstehen kann. Mischzonen müssen aufwendig nachbearbeitet werden, um den Qualitätsanforderungen einer durchgängigen Verfüllung nachzukommen. Der Nachweis einer vollständigen Nachbearbeitung ist schwierig, da die Länge der Mischzonen kaum exakt bestimmt werden kann. Bei geneigten Bohrungen kann der erhärtete Baustoff Keile bilden, die beim Bohrprozess zu Ablenkungen (Austritt aus der Bohrlochachse) führen können.

Die Leitung eines Coiled Tubing-Systems kann während der Verfüllung kontinuierlich in Abhängigkeit der Verfüllrate zurückgezogen und ohne Reinigung des Steigraumes ausgebaut werden, so dass keine Mischzone entsteht. Es wird solange Verfüllmaterial eingebracht, bis über den Ringraum der Bohrung nur reines Verfüllmaterial austritt. Verwendet wurde eine 2 Zoll-Leitung der Fa. Isaflex, die auch die beim Ziehen auftretenden Kräfte problemlos aufnehmen konnte. Die Wickeleinheit der Fa. BLZ Gommern wurde für den anschließenden Einsatz auf der Schachtanlage Asse II mechanisch verstärkt (Abbildung 6).

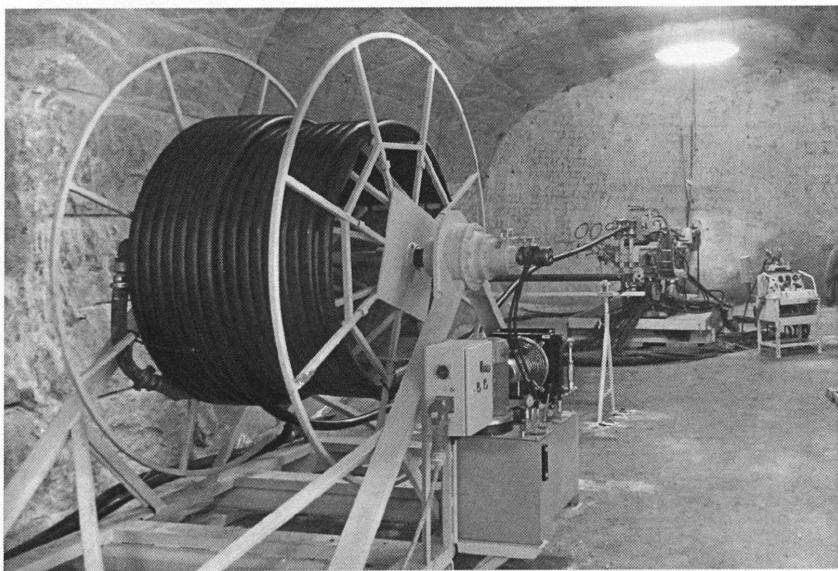


Abbildung 6: Verfüllung der Bohrung RB132. Schlauchwickeleinheit und zur Bohrmaschine Diamec 282 reichende PE-Leitung

Das Ziehen der Verfüllleitung, wie deren Einbau erfolgte mit einer Bohrmaschine Diamec 282, des Herstellers Atlas Copco (Abbildung 7). Bei der Bohrung RB032 war es jedoch erforderlich eine Tiefbohranlage (TBA) B2-20 der Fa. Aker Wirth einzusetzen.

Deutlich ist ebenfalls der Bypass vor dem Bohrmundloch zu erkennen, der ein ungestörtes Ausfließen des Baustoffs ermöglichte. Beim lösungs- und luftblasenfreien Austritt des Baustoffs wurde der Verfüllvorgang beendet.

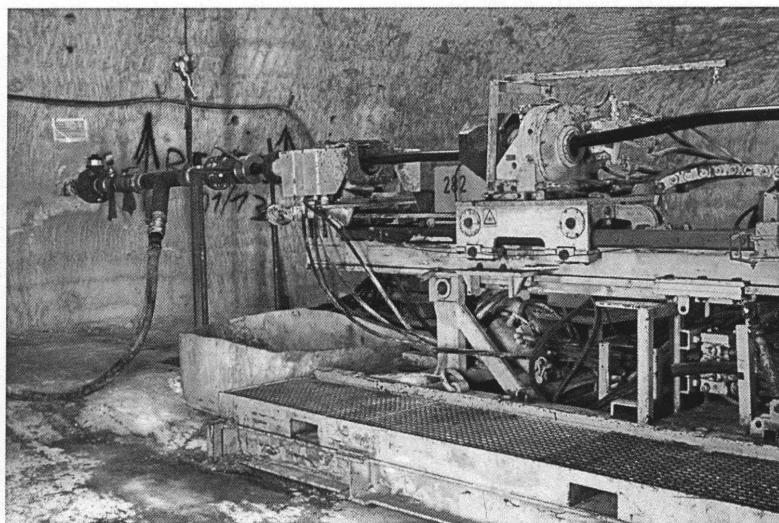


Abbildung 7: Diamec 282-Bohrmaschine mit der schwarzen Verfüllleitung.

Auch bei grundsätzlich zuverlässigen und getesteten Geräten können größere technische Störungen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund stand stets ein redundantes Verfüllsystem zur Verfügung, um bei Ausfall einzelner Anlagenkomponenten die Verfüllung nicht abbrechen zu müssen.

6 Durchführung von Qualitätssicherungsmaßnahmen

Ziel der Qualitätssicherung war nachzuweisen, dass die Bohrlochverfüllungen die geforderten Materialeigenschaften erfüllen. Grundsätzlich können Qualitäts sicherungsmaßnahmen der Ausgangsstoffe, d.h. der Vor-/Trockenmischung und der Lösung, des frisch angemischten Baustoffes und erhärteter Probekörper voneinander unterschieden werden. Bei der Entwicklung des Qualitäts sicherungsprogramms wurden bewährte Vorgehensweisen und die spezifischen Randbedingungen in Gorleben berücksichtigt. Die Untersuchungen erfolgten nach den Arbeitsanleitungen, die bereits bei der Baustoffentwicklung und -optimierung zur Anwendung kamen. Die Untersuchungen der Suspensionseigenschaften sowie zum Erhärten der Baustoffe erfolgten im Bergwerk Gorleben und die Prüfungen der Festmaterialeigenschaften wiederum bei externen Prüfinstitutionen.

Das Qualitätssicherungsprogramm, sah auch vor, dass nur geschultes und trainiertes Personal mit umfangreichen praktischen Erfahrungen die Verfüllmaßnahme durchführt. Da Prüfresultate der Festmaterialeigenschaften erst nach Abschluss einer Verfüllmaßnahmen vorliegen, hatten die Prüfungen der Ausgangsstoffe und der Frischmaterialeigenschaften eine hohe Priorität. Die Ausgangsstoffe wurden nach der Anlieferung und vor der Baustoffherstellung geprüft. Als Frischmaterialeigenschaften wurden die Baustoffdichte bestimmt, der Luftporengehalt und das Fließvermögen mit der Fließrinne und dem Marshtrichter. Routinemäßig wurde ebenso die Temperaturentwicklung in einem quasiadiabatischen Kalorimeter gemessen. Die Messresultate wurden auf Plausibilität und Konformität mit den Anforderungen geprüft und in Arbeitsprotokollen dokumentiert.

Im Verlauf der Verfüllmaßnahmen wurde Probematerial in KG-Rohre gegossen, mit dem Ziel die Dichte, die Druckfestigkeit sowie die Gas- und Lösungspemeabilität der erhärteten Baustoffe zu bestimmen. Zudem wurde visuell die Homogenität der Probekörper beurteilt. Vergleiche der Dichte des frischen und erhärteten Materials erlaubten Rückschlüsse zur Volumenexpansion beim Erhärten.

Sämtliche Prüfresultate der Frisch- und Festmaterialeigenschaften bestätigten die zuvor ermittelten Befunde und ergaben zweifelsfrei, dass beide Rezepturen vollumfänglich die Materialanforderungen erfüllten.

7 Vorgehensweise bei der Verfüllung

Alle Bohrungen waren auf der gesamten Länge vollständig, d.h. ohne Luft- und Spülungseinschlüsse zu verfüllen. Die grundsätzlichen Voraussetzungen waren hierfür durch die Wahl geeigneter Baustoffe und hinreichend leistungsfähiger Geräte gegeben. Die grundsätzliche Strategie der Verfüllung und die Zusammenarbeit im Team konnte bereits beim Verfüllen geringvolumiger Bohrungen erprobt werden. Zudem erlaubten diese Arbeiten die Vorgehensweise bei möglichen Störungen abzustimmen und zu üben. Bezüglich des Einsatzes der Rezeptur IM-Asse-1 erfolgte ein Erfahrungsaustausch mit Kollegen der Schachtanlage Asse II. Die Verfüllung der durchschlägigen und mit 121 m relativ kurzen Bohrung RB238 bot sehr gute Voraussetzungen den Baustoff ETO-I erstmals einzusetzen. Diese Rezeptur kam zudem bei der längsten Bohrung RB255 (531 m) und bei der Bohrung mit dem größten Volumen, d.h. der Bohrung RB032 ($7,5 \text{ m}^3$) zum Einsatz.

Die grundsätzliche Vorgehensweise war bei den beiden eingesetzten Baustoffen identisch und kann in Vorarbeiten, der eigentlichen Verfüllung und Nacharbeiten gegliedert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Bohrlöcher umfangreich inspiziert, vermessen und ggf. gereinigt wurden, zählten zu den Vorarbeiten auch finale Gerätetests, die Vorbereitung ausreichender Ausgangsstoffmengen sowie

allgemein von Geräten und Materialien, die für die Arbeiten essentiell sind. Vorgesehen war Baustoffmengen herzustellen entsprechend des doppelten Volumens des jeweiligen Bohrlochs und der verwendeten Leitungen.

Beim Fördern einer Suspension entlang trockener Oberflächen bilden sich lösungsreiche Randzonen, so dass mit zunehmender Förderlänge der Lösungsanteil der Suspension abnimmt. Bei der Verfüllung der Bohrungen hätte dieser Prozess eine Abnahme der Fließfähigkeit zur Folge, so dass auch die Wahrscheinlichkeit einer Stopferbildung ansteigen würde. Um ein „Abmagern“ der Verfüllbaustoffe zu verhindern und das Bohrloch von Partikeln zu reinigen, wurden die Verfüllleitung und die Bohrlöcher mit einer Magnesiumchloridlösung gespült. Dabei kam für jede Bohrlochverfüllung eine neue Verfüllleitung zum Einsatz, da eine 100 %ige Reinigung der Verfüllleitung nicht sichergestellt werden kann, wie vorlaufende Tests zeigten.

Bei der Verfüllung mit Baustoff musste sichergestellt werden, dass überschüssige Salzlösung vollständig ausgetragen wird. Die Bohrlochverfüllung muss den Sollwerten der jeweiligen Rezeptur entsprechen. Um diese Anforderung an die Verfüllung zu gewährleisten, wurde solange Baustoff verpumpt bis nur noch Suspension ohne Beimengung von Lösung austrat. Zudem war ein luftblasenfreier Austrag des Baustoffs sicherzustellen. Die Förderraten lagen im Bereich von 25 – 30 l/min, so dass bei der größtvolumigen Bohrung RB032 die Verfüllzeit bei etwa 5,5 Stunden lag. Vorteilhaft bei der Verfüllung war, dass nur die Bohrung RB639 geringfügig ansteigend gebohrt wurde. Die Verfüllleitung endete stets in der Suspension und konnte trotz der hohen Kräfte, die insbesondere aus den rheologischen Eigenschaften der Baustoffe resultieren gut sukzessive gezogen werden. Neben dem Pumpendruck wurden die eingepumpte und ausfließende Baustoffmenge gemessen. Auf der Basis dieser Messwerte wurden die in den Bohrlöchern verbliebenen Baustoffmengen kalkuliert. Die Bilanzierung der Baustoffmengen mit den ermittelten Bohrlochvolumina zeigte zweifelsfrei die 100 %ige Verfüllung der Bohrlöcher. Die nachlaufenden Arbeiten an den verfüllten Bohrungen umfassten beispielsweise regelmäßige Prüfungen auf Dichtheit, wie Sichtkontrollen im Hinblick auf das Auftreten von Lösungen.

Sämtliche relevanten Informationen zu den Bohrungen und ihrer Verfüllung wurden in Bohrakten zusammengefasst. Zudem wurde eine umfangreiche Gesamtdokumentation der Arbeiten erstellt. Mit der erfolgreichen Verfüllung der Bohrung RB032 konnte ein weiteres wichtiges Ziel erreicht werden. So konnte der bis dahin bestehende Sicherheitspfeiler gemäß § 224 Abs. 1 ABVO dieser Bohrung aufgehoben werden.

8 Verfüllen der Erkundungsbohrung EBrg. 700-2 auf der Schachtanlage Asse II

Für die Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachtanlage Asse II ist der Bau eines neuen Schachtes (Schacht Asse 5) und das Auffahren neuer Grubenräume (Anschlussstrecken und Infrastrukturräume) erforderlich. Der neue Schacht wird im bislang unverwitterten Salinar der Asse-Struktur östlich vom derzeitigen Grubengebäude zu liegen kommen.

Zur Erkundung des bislang unverwitterten Salinars werden seit 2013 Erkundungsbohrungen von über und unter Tage aus durchgeführt. Die untertägigen, von Bohrörtern auf den Sohlenniveaus 574- und 700-m-Sohle angesetzten Bohrungen mit einem Durchmesser von jeweils 98 mm werden als Horizontalbohrungen oder mit einer Neigung zur Teufe von ca. 25° und durchgängig als Kernbohrungen mit Luftpülung ausgeführt. Die bislang längste im Rahmen des Erkundungsprogramms untertägig ausgeführte Kernbohrung weist eine Länge von 371 m aus. Die in 2019 zur Ausführung kommenden Bohrungen sollen bis 400 m Teufe ausgeführt werden. Sämtliche Kernbohrungen im Salinar müssen unter Gas- und Ex-Schutz-Maßnahmen ausgeführt werden.

Im Januar 2016 trat in der Erkundungsbohrung EBrg. 700-2 ab einer Teufe von 252 m ein Lösungszutritt auf. Die täglichen Zutrittsmengen waren sehr gering, die chemische Analyse der aus dem Salinar zugetretenen Lösung ($MgCl_2$ gesättigte Lösung) ließ auf eine intrasalinare Herkunft ohne Verbindung zu Aquiferen des Deckgebirges schließen. Aufgrund des Lösungszutritts sollte die EBrg. 700-2 qualitätsgerecht so verfüllt werden, dass ein ggf. um die Bohrung bzw. um die Zutrittsstelle in der Bohrung gemäß § 224 ABVO noch auszuweisender Sicherheitsbereich möglichst klein gehalten werden kann oder ggf. auch gar nicht erforderlich ist.

Das nach Kalibermessungen zu verfüllende Bohrlochvolumen betrug $1,9 \text{ m}^3$, die Bohrung war somit vergleichsweise als großvolumig anzusprechen. Bei der Verfüllung wurde die bereits in Gorleben genutzte Technik eingesetzt, wobei in der Durchführung verschiedene Adaptionen an Asse-spezifische Gegebenheiten erforderlich waren. Da das Herstellen der Baustoffsuspension, die hierzu eingesetzte Anlagentechnik sowie der Baustoff selbst eine Verfahrenseinheit darstellen, wurde beschlossen, auch denselben Baustoff wie in Gorleben einzusetzen und insofern am Grundsätzlichen des in Gorleben bewährten Verfahrens so wenig wie möglich zu ändern.

Die geringe Größe des Förderkorbes im Schacht Asse II ließen es jedoch nicht zu, größere Anlagenteile der SCC-20-Kompaktanlage im Stück nach unter Tage zu transportieren. Die Platzverhältnisse hätten zudem den Aufbau der Anlage unter Tage erschwert. Gegenüber dem in Gorleben durchgeführten Verfahren waren daher Änderungen erforderlich. Im Einzelnen bestanden diese in folgenden Maßnahmen.

Der Gesamtprozess wurde unterteilt in einen übertägigen und einen untertägigen Teilprozess. Übertätig in einer Lagerhalle in Remlingen, ca. 3 km von der Schachtanlage entfernt, wurde die Baustoffsuspension mit der gleichen Technik, wie sie in Gorleben eingesetzt wurde, hergestellt und für den Transport nach unter Tage in IBC-Container verpumpt. Im Bohrort auf der 700-m-Sohle befanden sich nur das für das Verfüllen der Bohrung benötigte Verfüllequipment.

Durch diese Vorgehensweise und den untertägigen Teilprozess zum Bohrort auf der 700-m-Sohle wurde der Zeitbedarf vom Anmischen der ersten Baustoffcharge bis zum Beenden der Bohrlochverfüllung unter Berücksichtigung der prozessbegleitend durchzuführenden Qualitätssicherungsmaßnahmen auf mindestens 12 Stunden geschätzt.

Da die in Gorleben verwendete Baustoffsuspension eine zu geringe Topfzeit aufwies, war eine Modifikation des Baustoffes erforderlich. Nach Rücksprachen mit dem Lieferanten der Trockenmischung und dem Hersteller des Magnesiumoxids war es möglich, durch Anpassung des MgO-Brennprozesses die Topfzeit auf 16 Stunden zu verlängern und dabei die aus Gorleben bekannten rheologischen Eigenschaften der Suspension und die mechanischen Eigenschaften des erhärteten Baustoffs zu erhalten.

Den im Bohrort auf der 700-m-Sohle realisierten Anlagenaufbau gibt die Abbildung 8 schematisch wieder und die Abbildung 9 vermittelt einen Eindruck über die vergleichsweise geringen Platzverhältnisse des Verfüllortes. Gegenüber dem in Gorleben eingesetzten Aufbau wurde ein Verfüllschlauch höherer Druckstufe eingesetzt. Der Pumpendruck wurde durch einen hinter der Pumpe installierten, bei Überschreiten des eingestellten Grenzdruckes der Pumpe automatisch abschaltenden Druckwächter überwacht. Zur Redundanz dieser Sicherheitsmaßnahme wurden in das Rohrleitungssystem Berststopfen eingesetzt. Die zur Anpassung an die Bedingungen in der Schachtanlage Asse II erforderlichen Arbeiten dauerten etwa ein halbes Jahr.

Da das Zeitfenster zwischen der für die Durchführung der Maßnahme geschätzten mindestens erforderlichen Zeit von 12 Stunden und der Topfzeit von 16 Stunden relativ gering erschien und bei unplanmäßigen Ereignissen entsprechend wenig Spielraum für Interventionsmaßnahmen bot, wurden die Arbeitsschritte der Verfüllung wiederholt geübt. Aus den vorlaufenden Darlegungen, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Räumlichkeiten, wird deutlich, dass entsprechendes Personal vorzuhalten ist.

Der Bohrlochverfüllung ging das Spülen des zuvor mit Hilfe der Bohranlage bis zum Bohrlochtiefsten eingeschobenen Verfüllschlauches und des Bohrloches mit Anmachflüssigkeit voraus, um Fließwiderstände zu verringern, die Bohrlochwand zu benetzen und auch die im Bohrloch noch stehende, aus dem Salinar zugetretene Lösung zu verdrängen.

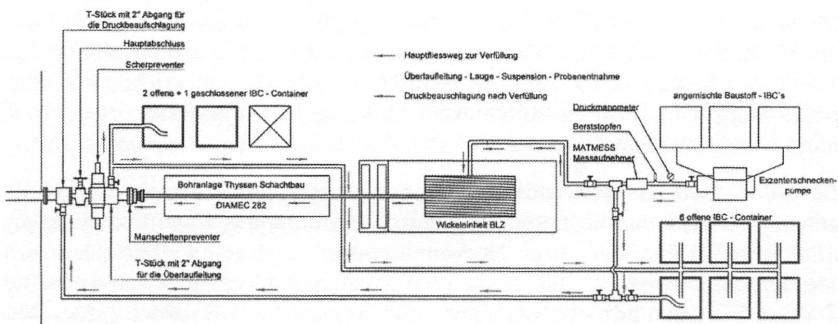


Abbildung 8: Schema des untertägiger Anlagenaufbaus im Bohrort auf der 700-m-Sohle.

Der Baustoff wird über übertägig befüllte IBC-Container bereitgestellt. Abweichend zur Ausrüstung in Gorleben wurde in der Schachtanlage Asse II zusätzlich ein Scherpreventer eingesetzt.

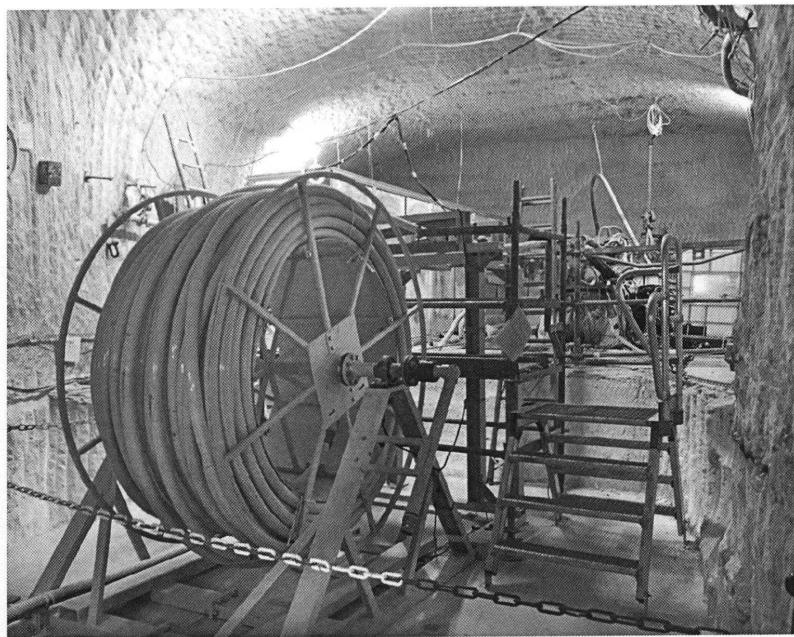


Abbildung 9: Verfüllort in der Schachtanlage Asse II mit der modifizierten Schlauchwickeleinheit im Vordergrund

Nach dem etwa halbstündigen Spülvorgang begann der Verfüllvorgang, bei dem die Baustoffsuspension über den Verfüllschlauch in das Bohrloch verpumpt wurde. Nachdem etwa ein Drittel des ermittelten Bohrlochvolumens eingepumpt war, wurde der Verfüllschlauch mit Hilfe der hydraulisch angetriebenen Schlauchwickeleinheit unter Beachtung der Förder-/Pumprate aus dem Bohrloch zurückgezogen. Auf diese Weise war gewährleistet, dass sich das Schlauchende zu jedem Zeitpunkt des Verfüllvorganges im Baustoff befand und so eine durchgängige Verfüllsäule hergestellt werden konnte. Das Einpumpen von Suspension in die Bohrung wurde erst beendet, nachdem die Dichte des aus dem Ringraum austretenden Baustoffs dem Sollwert entsprach. Nachdem der Verfüllschlauch aus dem Bohrloch herausgezogen und das Bohrloch mittels Schieber verschlossen war, wurde das Rohrleitungssystem umgeschiebert und die Druckhaltung begonnen. Das Verfüllen der 254 m langen Erkundungsbohrung wurde am 26.04.2018 in rund 12 Stunden planmäßig umgesetzt.

9 Literatur / Verwendete Unterlagen

[1] Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld. Richtlinien für Sicherheitsmaßnahmen beim Herstellen und beim Verfüllen von Untersuchungsbohrungen sowie beim Abdichten von Zuflüssen durch Einpressen von Dichtmitteln im Salzbergbau. 12.01 1981

Reinhard Köster

Reinhard.Koester@bge.de

Ingolf Kretschmer

Ingolf.Kretschmer@bge.de

Maximilian Hayart

Maximilian.Hayart@bge.de

Michael Sniehotta

Michael.Sniehotta@bge.de

Dr Hans-Joachim Engelhardt

joachim Engelhardt@bge.de

BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine