

Anwendung eines Stahlfasernassspritzbetons im Endlager Schacht Konrad

Einleitung

Das Projekt, das von der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) beauftragt wurde, stellt aufgrund seiner einzigartigen Anforderungen und Rahmenbedingungen eine außergewöhnliche ingenieurtechnische Herausforderung dar.

Das Endlager Konrad entsteht in einer Tiefe von rund 850 Metern unter klimatisch anspruchsvollen Bedingungen, die besondere Anforderungen an die Bauweise und die eingesetzten Materialien stellen.



Abb. 1 Übersicht Schacht Konrad üt

Für den Einsatz von Stahlfasernassspritzbeton, der als dauerhafte und robuste Innenschale dienen soll, existieren in Deutschland derzeit keine verbindlichen Normen. Dies machte es erforderlich, im Vorfeld umfangreiche Versuche durchzuführen, um die Materialeigenschaften, die Verarbeitbarkeit und die Leistungsfähigkeit des Betons zu validieren. Zur erfolgreichen Umsetzung des Projekts war die Einbindung zahlreicher Experten aus verschiedenen Fachbereichen unverzichtbar. Ein wichtiger Partner war die Firma Bekaert, die mit ihrer Expertise und der Lieferung leistungsfähiger Stahlfasern einen entscheidenden Beitrag leistete. Gemeinsam konnten innovative Lösungen

entwickelt werden, um den hohen technischen und sicherheitstechnischen Anforderungen des Endlagers gerecht zu werden.

Geschichte des Endlagers Konrad

Die Geschichte des Endlagers Konrad reicht bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts zurück. Ursprünglich wurde die Lagerstätte in den 1930er Jahren als Eisenerzbergwerk entdeckt und bis in die 1970er Jahre aktiv betrieben. Mit der Stilllegung des Bergwerks begann die Suche nach einer neuen Nutzungsmöglichkeit, was schließlich zur Idee führte, das Bergwerk als Endlager für radioaktive Abfälle umzuwidmen.

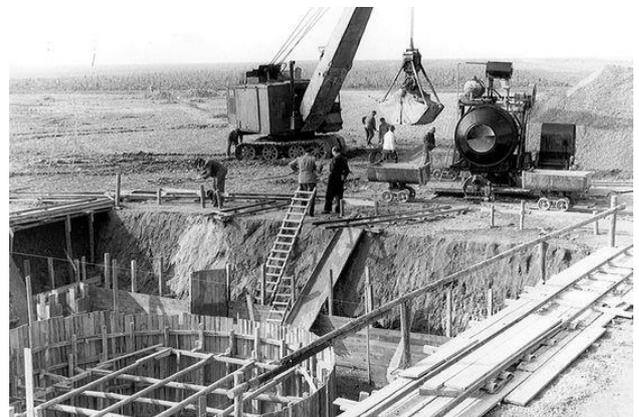


Abb. 2 Schachterstellung 1957 – Konrad I

Die Standortwahl beruhte auf der geologischen Beschaffenheit der Lagerstätte. Der dortige tonhaltige Deckgebirgsbereich und die stabilen geologischen Bedingungen machten den Standort grundsätzlich geeignet für die sichere Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen. In den 1980er Jahren begann mit der Einstellung der bergbaulichen Tätigkeiten die intensive geologische und technische Erkundung der Grube Konrad, um die Eignung des Standorts wissenschaftlich abzusichern. Was folgte, war

ein äußerst komplexes und langwieriges Planfeststellungsverfahren, das 1982 eingeleitet wurde und schließlich erst 2002 mit einem positiven Bescheid abgeschlossen wurde. Dieser Prozess war geprägt von intensiven Diskussionen, umfangreichen Gutachten und zahlreichen Einwendungen von Bürgern, Umweltverbänden und anderen Interessengruppen. Auch rechtliche Auseinandersetzungen begleiteten das Verfahren, die erst 2007 durch ein höchstrichterliches Urteil zugunsten des Projekts beendet wurden.

Mit dem rechtskräftigen Planfeststellungsbeschluss konnten die Ausbauarbeiten für das Endlager beginnen. Seitdem wird das ehemalige Bergwerk schrittweise an die Anforderungen eines modernen Endlagers angepasst. Dazu gehört unter anderem die Errichtung der Infrastrukturanlagen, die Herstellung der Einlagerungskammern sowie umfangreiche Sicherheitsvorkehrungen, um den langfristigen Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten.

Das Endlager Konrad soll künftig schwach- und mittelradioaktive Abfälle aufnehmen und ist ein zentraler Bestandteil der deutschen Entsorgungspolitik für radioaktive Abfälle. Die lange und anspruchsvolle Geschichte des Projekts zeigt, wie wichtig sorgfältige Planung, fundierte wissenschaftliche Grundlagen und gesellschaftlicher Dialog für ein Vorhaben dieser Größenordnung sind.

Arbeiten der ARGE ETS im Infrastrukturbereich des Endlagers

Die ARGE ETS, bestehend aus den Firmen Feldhaus Bergbau und Schachtbau Nordhausen, ist seit 2011 maßgeblich an den Arbeiten im Endlager Konrad beteiligt. Die Tätigkeiten begannen mit dem Nachriss bestehender Strecken sowie mit Neuauffahrungen, die zunächst mit einer Teilschnittmaschine durchgeführt wurden. Im weiteren Verlauf wurde auf den Baggervortrieb umgestellt, um den speziellen geologischen Bedingungen besser gerecht zu werden.

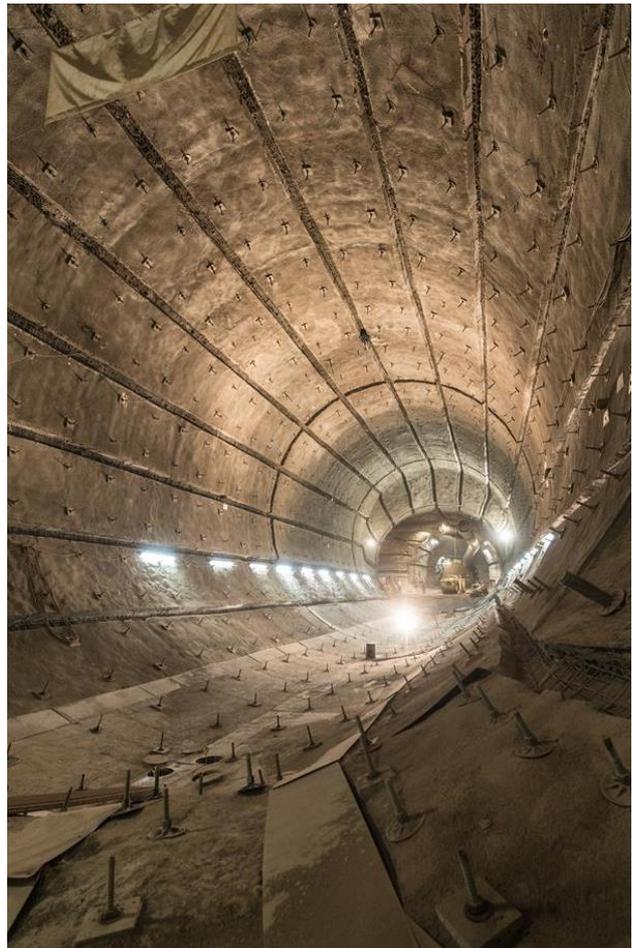


Abb. 3 Werkstatt fertige Ausführung Außenschale

Ein zentraler Schritt in der Stabilisierung der untertägigen Strukturen war die Errichtung einer geschlitzten Außenschale im Trockenspritzverfahren. Diese Schale diente als erste Sicherungsmaßnahme, um die unter Tage herrschenden gebirgsmechanischen Einwirkungen in einer Tiefe von rund 850 Metern zu kontrollieren. Ergänzend dazu wurden insgesamt 30.000 Anker – darunter 4500 Gleitanker bis 21 m Länge - gesetzt, um die Stabilität des Gebirges weiter zu erhöhen und das langfristige Verhalten der Hohlräume zu sichern.

Nach Abschluss der Arbeiten an der Außenschale und dem Abklingen der Konvergenzen konnte mit der konkreten Planung der Innenschale begonnen werden. Diese bildet den finalen Ausbauzustand der Strecken und stellt eine dauerhafte Sicherung der untertägigen Infrastruktur dar.

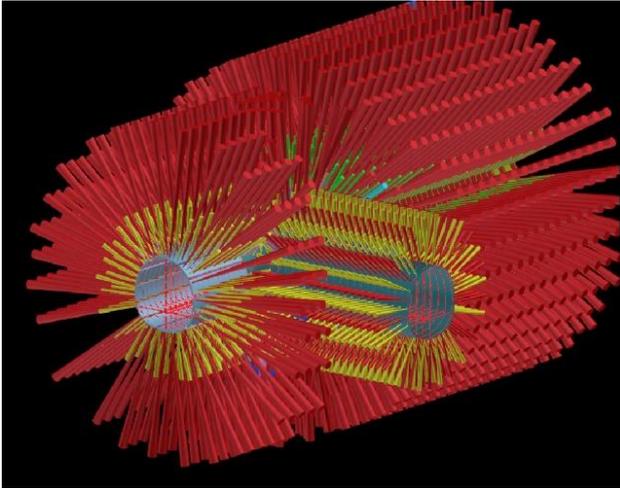


Abb. 4 Ankerausbau

Anforderungen an die Innenschale

Die Auswertung geomechanischer Mess-einrichtungen, wie beispielsweise Extensometer, war ein essenzieller Schritt, um das Abklingen der Konvergenzen im Bauwerk zu beurteilen. Erst nachdem die Messungen zeigten, dass die Spannungseinwirkungen ausreichend abgeklungen waren, konnte auf dieser Grundlage mit der Bemessung der Innenschale begonnen werden.

Die Analyse der geotechnischen Daten offenbarte jedoch, dass die geomechanischen Einwirkungen weiterhin erheblich waren. Diese Gegebenheit machte den Einsatz von Stabstahlbewehrung notwendig, um die strukturellen Anforderungen der Innenschale zu erfüllen. Dabei kamen Stabstähle mit einem Durchmesser von mehr als 12 mm zum Einsatz. Eine zusätzliche Herausforderung stellten die zahlreichen Querschnittswechsel des Bauwerks dar, die den Einsatz klassischer Schalungstechniken unwirtschaftlich machten.

Um den Bauablauf zu optimieren und zeitliche Synergien zu schaffen, wurde intensiv nach Alternativen zur herkömmlichen Bauweise gesucht. In diesem Zusammenhang wurde geprüft, inwiefern der Einsatz von Stahlfasern eine geeignete Lösung darstellen könnte, um die aufwendige Stabstahlbewehrung teilweise zu ersetzen. Ziel war es, jene Bereiche zu identifizieren, in denen der Einsatz von Stahlfasern sowohl wirtschaftlich als auch technisch sinnvoll ist.

Projektspezifische betontechnologische Herausforderungen

Die Herstellung des Betons für die Innenschale mit einer Festigkeitsklasse von C35/45 war von außergewöhnlichen betontechnologischen Herausforderungen geprägt, die sowohl durch die logistischen Anforderungen als auch durch die spezifischen Materialeigenschaften bedingt waren. Zunächst wurde ein Bereitstellungsgemisch verwendet, das per Silofahrzeugen angeliefert und über eine Falleitung 850 Meter in die Tiefe sowie 250 Meter waagrecht in ein untertägliches Silo pneumatisch transportiert wurde. Von dort erfolgte die Absackung des Materials in Bigbags zur Lieferung an den Geschäftsbereich der ARGE ETS.

Eine wesentliche Einschränkung war die Begrenzung des Größtkorns auf maximal 4 mm, um die Transportfähigkeit sicherzustellen. Dies führte jedoch zur Problematik der Entmischung und zu Schwankungen in der Kornabstufung, was die Homogenität des Betons beeinflusste. Der hohe Feinanteil, insbesondere durch die Zugabe von Gesteinsmehl, stellte eine zusätzliche Herausforderung dar. Insbesondere die Herstellung einer stabilen Grundmischung bei Einhaltung eines Wasser-Zement-Wertes (w/z) von 0,45 erwies sich als äußerst anspruchsvoll.

Um diese Schwierigkeiten zu bewältigen, wurden intensive Untersuchungen zur Zusammensetzung des Betons durchgeführt, darunter Analysen mittels Lasergranulometrie. Dabei zeigte sich, dass der gewählte Einsatz eines Doppelwellenchargenmischers eine entscheidende Voraussetzung war, um das Bereitstellungsgemisch effektiv aufzuschließen und verarbeitbar zu machen.



Abbildung 5 Versuchsaufbau unter Tage

Große Unterstützung kam von Anwendungstechnikern der Firma Sika, die sowohl bei über-tägigen Vorversuchen auf dem Gelände der Schachtbau Nordhausen als auch bei anschlie-ßenden untertägigen Versuchen beratend tätig waren.

Durch diese enge Zusammenarbeit und viele ite-rative Versuchsdurchgänge konnte schließlich ein verarbeitbarer Nassspritzbeton entwickelt werden.

Konzeption und Herstellung Stahlfaser-nassspritzbeton mit DRAMIX 4D Stahlfasern von BEKAERT

Nachdem erfolgreich eine geeignete Grundmischung für den Beton entwickelt werden konnte, begannen die Versuche zur Herstellung eines Stahlfasernassspritzbetons. Ziel dieser Versuche war es, die optimale Stahlfaser sowie den passenden Stahlfasergehalt zu bestimmen, um die Anforderungen aus der Bemessung zu erfüllen. Dieser wurde auf 60 kg/m^3 festgelegt und evaluiert. Gleichzeitig musste eine entschei-dende Herausforderung gelöst werden: In Deutschland ist die Verwendung von Stahlfasern in Spritzbetonen für tragende Bauteile bislang nicht vorgesehen. Die Richtlinie „Faserbeton“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStB) schließt diese Anwendung ausdrück-lich aus. Um dennoch die Eignung des Stahlfasernassspritzbetons nachzuweisen, entwickelte ein Gremium aus Fachplanern und Gutachtern, angeführt vom bsm², ein umfassendes Prüfkonzept. Im Mittelpunkt stand die Evaluation des Betons in Verbindung mit den Stahlfasern DRAMIX 4D der Firma Bekaert. Es folgte eine aufwendige Prüfkampagne, in deren Rahmen mehr als 100 Prüfkörper angefertigt wurden.

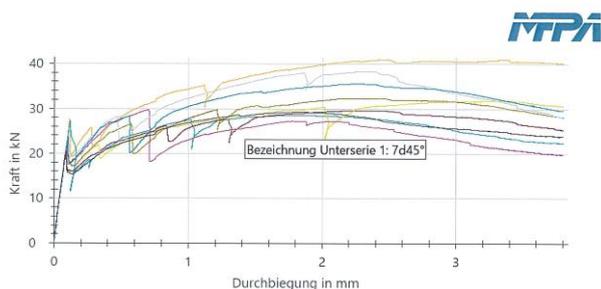


Abb. 6 Ergebnis Untersuchung Nachrissbiegezugfestigkeiten

In enger Zusammenarbeit mit der MFPA Weimar sowie dem Herrn Eberli von der Firma BEKA-ERT, wurden für den spezifischen Anwendungsfall Methoden entwickelt, um Leistungsklassen aus Nachrissbiegezugversuchen zu bestimmen. Die geforderten Leistungsklassen $L1 = 2,1$ und $L2 = 2,1$ stellten hohe Anforderungen an die Präzision der Herstellung und Prüfung. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der sorgfältigen Erstellung der Prüfkörper, um Vorschäden während der Produktion zu verhindern. Der Zuschnitt der Prüfkörper auf die genormten Maße wurde durch einen spezialisierten Steinmetz durchgeführt, um die höchste Qualität und Genauigkeit sicher-zustellen.



Abb. 7 Zuschnitt der Probekörper

Nach intensiven Versuchsreihen und sorgfälti-gen Analysen gelang es schließlich, die Vorga-ben aus dem Prüfkonzept zu erfüllen. Die Gut-achter des bsm² bestätigten die erfolgreiche Um-setzung und dokumentierten die Ergebnisse in einem abschließenden Gutachten. Dieses Gut-achten diente anschließend als verbindliche Grundlage für die Herstellung der Innenschale aus Stahlfasernassspritzbeton.

Umsetzung der Ergebnisse in der Her-stellung der Innenschale

Die bsm² entwickelte ein umfassendes Prüfkonzept zur weiteren Überwachung der qualitätsge-rechten Herstellung der Innenschale. Dieses Konzept legte eine engmaschige Kontrolle der verschiedenen Prozessschritte und Betonpara-meter fest, um die hohen Anforderungen an die Qualität des Stahlfasernassspritzbetons sicher-zustellen.

Ein zentraler Bestandteil des Prüfkonzepts war die kontinuierliche Überwachung der Frischbe-toneigenschaften, einschließlich der

regelmäßigen Bestimmung der Stahlfasergehalte. Zusätzlich wurde festgelegt, dass alle drei Produktionstage acht Prüfkörper hergestellt werden, um die Nachrissbiegezugfestigkeiten zu ermitteln. Diese Untersuchungen wurden weiterhin durch die MFPA Weimar durchgeführt.

Darüber hinaus sah das Prüfkonzept die Entnahme von Bohrkernen aus dem fertiggestellten Bauteil vor. Diese Bohrkern wurden verwendet, um den tatsächlichen Stahlfasergehalt und die Ausrichtung der Stahlfasern zu analysieren. Für diese Untersuchungen kam ein hochpräzises Mikro-CT-Röntgenverfahren an der Technischen Universität Kaiserslautern zum Einsatz.

Mit diesem Prüfkonzept stellte die bsm² sicher, dass die Herstellung der Innenschale nicht nur den normativen Anforderungen, sondern auch den projektspezifischen Qualitätsvorgaben entsprach. Die Kombination aus Frischbetonprüfungen, mechanischen Tests und zerstörungsfreien Analysen am fertigen Bauteil garantierte eine lückenlose Dokumentation und Kontrolle des gesamten Bauprozesses.

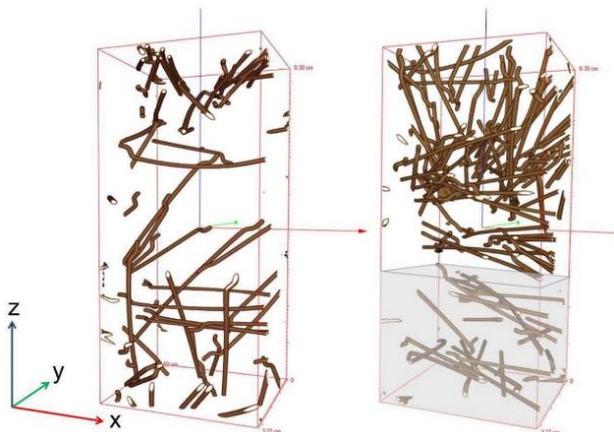


Abb. 8 Untersuchung Stahlfasergehalt mittels Mikro-CT

Fazit und Ausblick

Die Innenschalenbestandteile, die aus Stahlfasernassspritzbeton hergestellt wurden, sind mittlerweile erfolgreich an die Bundesgesellschaft übergeben worden. Für diese Komponenten wurden insgesamt ca. 3500 m³ Stahlfasernassspritzbeton produziert und eingebaut. Um eine verletzungsfreie Nutzung zu gewährleisten, wurden die Innenschalenteile zusätzlich mit einer 3

cm starken Spritzbetondeckschicht überzogen.



Abb. 9 fertige Innenschale aus Stahlfasernassspritzbeton

Alle Beteiligten – die ausführende Firma ARGE ETS, die Fachplaner, die Materialprüfanstalt und die Gutachter – können auf eine intensive und produktive Zeit zurückblicken. Die Bundesgesellschaft hat aus dem Projekt viele positive Schlüsse gezogen. Derzeit wird eine neue Betonmischanlage errichtet, in der die gewonnenen Erfahrungen der ARGE ETS integriert werden. Ziel ist es, für weitere Projekte im Endlager Konrad die Anwendung von Stahlfasernassspritzbeton noch effizienter und praxistgerechter zu gestalten.



Abb. 10 neue Betonmischanlage der BGE zur Herstellung von Stahlfasernassspritzbeton

Das Projekt zeigt eindrucksvoll, wie durch die enge Zusammenarbeit aller Beteiligten innovative und zukunftsweisende Bauweisen im Bereich des Endlagerbaus umgesetzt werden können.

Literatur:

- [1] Gutachterliche Stellungnahme „Prüfkonzept zur Qualitätssicherung der Ausführung eines Stahlfaserspritzbetons“; bsm² 11.07.2021