

Wolfram Kudla
Matthias Gruner
Philipp Herold
Michael Jobmann

Shaft sealing concepts for high-level radioactive waste repositories based on the host-rock options rock salt and clay stone

Unlike the shaft barriers used for the dry preservation of former mine workings and underground storage sites, shaft seals designed for radioactive-waste repositories must also fulfil additional requirements associated with the design diversity of the sealing system. This diversity makes use of the simple redundancy principle in order to prevent the proliferation of defects. In practice this means combining several sealing elements made from different materials or from materials with different properties. The R&D project, Shaft sealing systems for final repositories for high-level radioactive waste (ELSA) - phase 2: concept design for

shaft seals and testing of the functional elements of shaft seals', which was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), set out to investigate potential sealing elements for the two host-rock options rock salt and mudstone. This paper combines the text that the authors presented at the First International Freiberg Shaft Colloquium held at the Freiberg University of Mining and Technology on 01.10.2014 with a presentation on the sealing elements that were investigated as part of the R&D project.

Schachtverschlusskonzepte für zukünftige Endlager für hochradioaktive Abfälle für die Wirtsgesteinsoptionen Steinsalz und Ton

Gegenüber Schachtverschlüssen für die trockene Verwahrung ehemaliger Gewinnungsbergwerke sowie für Untertagedeponien besteht bei Schachtverschlüssen für Endlager radioaktiver Abfälle die zusätzliche Anforderung nach einer diversitären Auslegung des Dichtsystems. Damit soll die bei einfacher Redundanz mögliche Vervielfachung von Fehlern vermieden werden. In der Praxis bedeutet das, mehrere Dichtelemente aus unterschiedlichen bzw. unterschiedlich wirkenden Materialien zu kombinieren. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten FuE-Vorhabens „Schachtverschlüsse

für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA) - Phase 2: Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen“ sollen für die beiden Wirtsgesteinsoptionen Steinsalz und Tonstein mögliche Dichtelemente untersucht werden. Der vorliegende Beitrag fasst den gleichlautenden Vortrag der Autoren auf dem 1. Internationalen Freiburger Schachtkolloquium am 01.10.2014 an der TU Bergakademie Freiberg und die im FuE-Vorhaben untersuchten Verschlusselemente zusammen.

1 Introduction

The R&D project ‚Shaft sealing systems for final repositories for high-level radioactive waste (ELSA) - phase 2: concept design for shaft seals and testing of the functional elements of shaft seals‘, which was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), set out to develop shaft sealing concepts for the two host-rock options rock salt and clay stone. These concepts are to be modular in design so that they can be adapted to suit the future site conditions. As no decision has yet been taken on the choice of site to be used as a final repository for high-level radioactive waste, the concept that has been developed is, for illustrative purposes, based on data currently available.

The ‚Salzdetfurth‘ shaft sealing concept (Figure 1) (1,2) describes the current technology available for constructing watertight, durable shaft seals for underground storage sites and for the dry preservation of former salt workings. According to this concept the shaft seal is composed of bentonite sealing elements and abutments built from crushed rock (hard rock). Both materi-

1 Einleitung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten FuE-Vorhabens „Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA-Phase 2: Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen“ (ELSA II) sollen für die beiden Wirtsgesteinsoptionen Steinsalz und Tonstein Schachtverschlusskonzepte entwickelt werden. Diese Konzepte sollen modular aufgebaut sein und an die zukünftigen Standortbedingungen angepasst werden können. Da eine Standortauswahl für zukünftige Endlager für hochradioaktive Abfälle noch nicht getroffen wurde, erfolgt die Konzeptentwicklung exemplarisch auf der Basis vorliegender Daten.

Den derzeitigen aktuellen Stand der Technik für flüssigkeitsdichte und langzeitstabile Schachtverschlüsse für den Abschluss von Untertagedeponien sowie für die trockene Verwahrung ehemaliger Salzabbau beschreibt das Schachtverschlusskonzept „Salzdetfurth“ (Bild 1) (1, 2). Nach diesem Konzept besteht der Schachtverschluss aus Bentonit-Dichtelementen und Widerla-

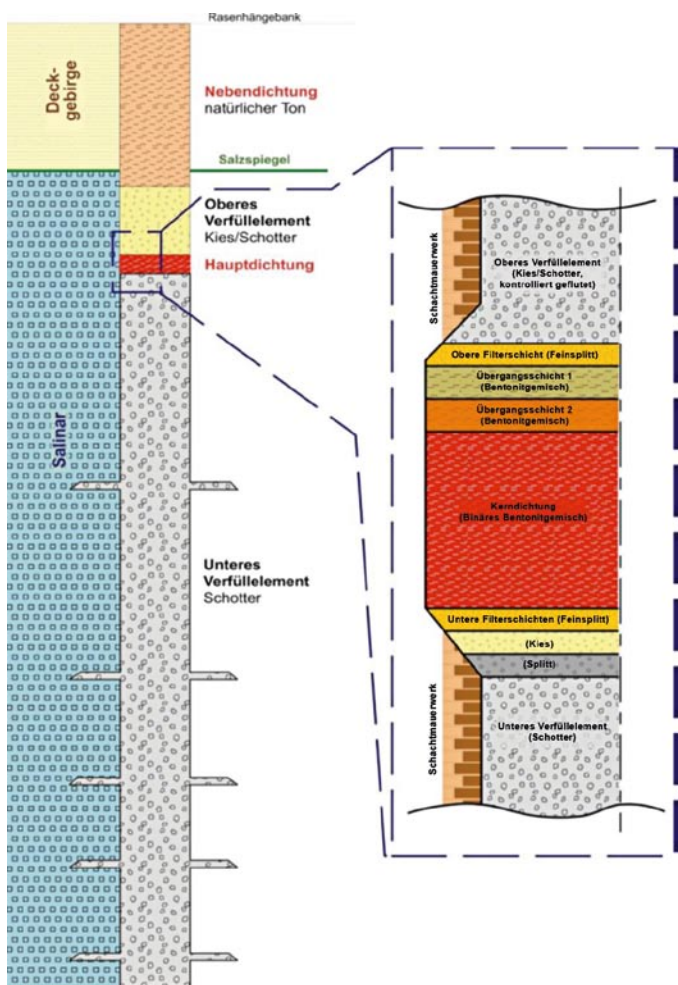
als – bentonite and basalt or diabase – exhibit long-term stability under saline conditions.

NAGRA (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) has proposed a similar structure of compacted bentonite and crushed rock for shaft sealing operations in clay stone at the planned waste repository in Switzerland (3). This design, comprising bentonite sealing elements and crushed rock abutments, has therefore been chosen as the basic concept.

Unlike the shaft barriers used for sealing underground storage sites and for the dry preservation of former salt workings, shaft seals designed for radioactive-waste repositories must also fulfil additional requirements in terms of the design diversity of the sealing system.

Diversity is a special form of redundancy in which the additional sealing components operate on a number of different principles. This avoids the proliferation of defects that can arise when the simple redundancy method is employed. In practice this means combining several sealing elements made from different materials or from materials with different properties. Proof of functionality must be provided individually and independently for each sealing element. This design diversity enables the sealing system to meet a higher safety standard.

A combination of clay and bitumen/asphalt has over the years proved extremely effective for constructing seals in normal mining industry shafts (4). Other diversified systems involve the combined use of bentonite and compacted mixtures of crushed salt and clay.



gern aus Hartgesteinsschotter. Beide Materialien – Bentonit und Basalt bzw. Diabas sind unter salinaren Bedingungen langzeitstabil.

Ein ähnlicher Aufbau aus verdichtetem Bentonit und Schotterwiderlagern wird von der Nagra für die Schachtversiegelung des zukünftigen Schweizer Endlagers im Tongestein vorgeschlagen (3). Deshalb wird dieses Konzept mit den Verschlusselementen Bentonitdichtelement und Schotterwiderlager als Basiskonzept ausgewählt.

Gegenüber den Schachtverschlüssen für den Abschluss von Untertagedeponien sowie für die trockene Verwahrung ehemaliger Salzabbau besteht bei Schachtverschlüssen für Endlager radioaktiver Abfälle die zusätzliche Anforderung nach diversitärer Auslegung des Dichtsystems.

Diversität ist eine Sonderform der Redundanz, bei der die zusätzlichen Verschlusskomponenten nach unterschiedlichen Prinzipien funktionieren. Dadurch wird die bei einfacher Redundanz mögliche Vervielfachung von Fehlern vermieden. In der Praxis bedeutet das, mehrere Dichtelemente aus unterschiedlichen bzw. unterschiedlich wirkenden Materialien zu kombinieren. Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit muss für jedes Dichtelement einzeln und unabhängig voneinander erbracht werden. Durch die diversitäre Auslegung der Verschlussysteme wird ein höheres Sicherheitsniveau erreicht.

Bei Schachtverschlüssen hat sich die Kombination von Ton mit Bitumen/Asphalt im klassischen Bergbau langjährig bewährt (4). Weitere mögliche diversitäre Systeme sind Kombinationen aus Bentonit mit verdichteten Salzgrus-Ton-Gemischen.

Für die Randbedingungen im Salinar sind Kombinationen aus Magnesiumoxid (MgO)-Beton und Asphalt eine weitere Option, wenn die Kontaktzone zwischen MgO-Beton und dem Gebirge entsprechend vergütet wird.

2 Dichtelemente aus Bitumen/Asphalt

2.1 Allgemeine Prämissen

Dichtelemente aus Bitumen/Asphalt für Schachtverschlüsse werden meistens mit Dichtungen aus Bentonit oder anderen Tonen kombiniert. Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schachtverschlusses, der für die beiden Annahmen - Flüssigkeitszutritt von oben und Flüssigkeitszutritt von unten - ausgelegt ist. Aufgrund des Flüssigkeitscharakters von Bitumen müssen für den Bau von Bitumen- und Asphalt-dichtelementen entsprechende Regeln zur Einstellung der Dichte gegenüber der Dichte der angenommenen Zutrittslösung eingehalten werden (Bild 2 und Tabelle 1). Werden diese Regeln nicht eingehalten, kommt es infolge von dichtebedingten Umschichtungen zu Instabilitäten, insbesondere zu einer Lageänderung des Bitumens.

Fig. 1. Arrangement used for constructing durable shaft seals in saliferous strata – Salzdetfurth type
Bild 1. Prinzipieller Aufbau langzeitstabiler Schachtverschlüsse im Salinar – Typ Salzdetfurth

When operating in saliniferous formation a combination of magnesium oxide (MgO) concrete and asphalt can offer another potential solution, provided suitable measures are taken to consolidate the contact zone between the MgO concrete and the rock.

2 Sealing elements of bitumen/asphalt

2.1 General

Shaft sealing elements composed of bitumen/asphalt are usually combined with seals built from bentonite or other forms of clay. Figure 2 shows the arrangement used for a shaft seal that is designed to meet two operational requirements, namely water inflow from above and water inflow from below. Because of the fluid nature of bitumen, various rules have to be observed when constructing bitumen and asphalt sealing elements in order to ensure that the bitumen density is correctly adjusted to the density of the assumed inflow (Figure 2 and Table 1). Failure to abide by these rules can cause instability due to the rearrangement of the density levels, which essentially means a change in the position of the bitumen.

The following premises apply to the technical design of bitumen/asphalt sealing elements for shaft seals:

- Bitumen, asphalt mastic or poured asphalt can generally be hot applied for use as shaft sealing elements in rock salt. This technique is in keeping with latest practice and extensive experience has been built up in this field. The cool-down time is one of the system's unavoidable drawbacks.
- The use of asphalt concrete or mastic asphalt with subsequent compaction and quality control, as employed in hydraulic engineering, presents a problem in shaft sealing projects because the high ambient temperatures (> 80 °C) preclude manual surface work or require costly technical adaptations.
- The variable wettability of bitumen on the rock face can reduce the strength of the bond between the bitumen and the host rock. Recent investigations have shown that in rock salt too the bond strength of bitumen and asphalt can be impaired after the cool-down process. Rock surface wettability can be improved by applying a special primer coating whose viscosity and composition are specially adapted to the purpose (see section 2.2).
- It is impractical to use asphalt elements or mastic asphalt elements. The reason for this is the high viscosity and the asphalt cool-down period required due to the heat absorption by the crushed stone structure, which results in a further increase in viscosity. Operations in the field have shown that the crushed stone structure can only be filled with a few centimetres of asphalt and that the interspace filling is as a result inconsistent and patchy. One possible option is to employ gravel-bitumen elements (see section 2.4).

One drawback for the continuation of the work is that after the bitumen or asphalt elements have been installed a cool-down period is required in order to reach a minimum viscosity level that will prevent the subsequent materials from sinking in.

Combinations of MgO concrete and asphalt constitute another option for saliniferous conditions (see section 3). Mutual inter-

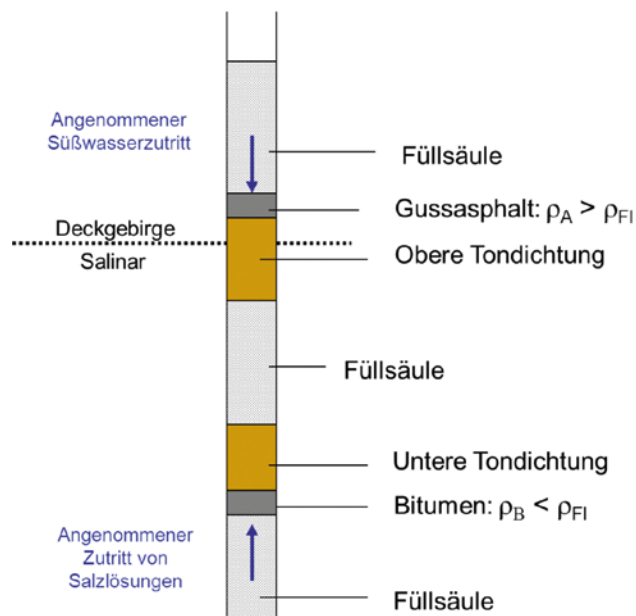


Fig. 2. Arrangement used for constructing a shaft seal with diversified sealing elements

Bild 2. Prinzipieller Aufbau eines Schachtverschlusses mit diversitären Dichtelementen

Bei der technischen Ausführung von Dichtelementen aus Bitumen/Asphalt für Schachtverschlüsse bestehen folgende Prämissen:

- Der Heißeinbau von Bitumen, Asphaltmastix oder Gussasphalt für Schachtverschlüsselemente im Steinsalz ist prinzipiell möglich. Die Verfahrensweise entspricht dem Stand der Technik. Es liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Nachteilig sind die nicht zu vermeidenden Abkühlzeiten.
- Der im Wasserbau praktizierte Einbau von Asphaltbeton oder Splittmastixasphalt mit nachfolgender Verdichtung und Qualitätskontrolle ist in Schächten problematisch, da die hohen Umgebungstemperaturen (> 80 °C) manuelle Arbeiten auf der Oberfläche ausschließen oder aufwendige technische Anpassungen erfordern.
- Die unterschiedliche Benetzbarkeit von Bitumen an der Gebirgsoberfläche kann zu einer eingeschränkten Haftfestigkeit des Bitumens an der Gebirgskontur führen. Neue Untersuchungen haben gezeigt, dass auch am Steinsalz eine Verringerung der Haftfestigkeit von Bitumen und von Asphalt nach dem Abkühlen eintreten kann. Durch einen in der Viskosität und der Zusammensetzung speziell abgestimmten Voranstrich (s. Abschnitt 2.2) kann die Benetzbarkeit der Gebirgsoberfläche verbessert werden.
- Schotter-Asphalt-Elemente bzw. Asphaltmastix-Schotter-Elemente können praktisch nicht realisiert werden. Ursache ist die hohe Viskosität bzw. die durch die Wärmeaufnahme des eingebauten Schottergerüsts bedingte Abkühlung des Asphalt, die zu einer weiteren Viskositätssteigerung führt. Praktisch wurde gezeigt, dass die Füllung eines Schottergerüsts mit Asphalt nur im Zentimeterbereich möglich ist und dass dabei die Ausfüllung der Zwischenräume ungleichmäßig ist. Möglich ist die Realisierung von Schotter-Bitumen-Elementen (s. Abschnitt 2.4)

Dichtelement	Bauausführung
Obere Asphaltabdichtung (Flüssigkeitsdruck von oben) → $\rho_{\text{Asphalt}} > \rho_{\text{Lösung}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Einbau von Gussasphalt - Berücksichtigung einer thermisch beeinflussten Schicht im benachbarten Bentonitdichtelement oder Bemessung einer speziellen Übergangsschicht. - Fortsetzung des Baus nach Erkalten des Gussasphalts
Untere Bitumendichtung (Flüssigkeitsdruck von unten) → $\rho_{\text{Bitumen}} < \rho_{\text{Lösung}}$	<ul style="list-style-type: none"> - Heißeinbau von Bitumen auf eine thermisch stabile Zwischenschicht - Weiterbau nach Erkalten des Bitumens (Gewährleistung klimatischer Normen und Erreichen einer Mindestviskosität, die ein Einsinken der nachfolgenden Materialien ausschließt)

Table 1. Construction of bitumen/asphalt shaft seals
Tabelle 1. Bauausführung von Bitumen/Asphaltabdichtungen für Schachtverschlüsse

ference here is very low. During the construction phase an asphalt seal can be set on an existing MgO concrete element without posing any problems. Applying the asphalt as quickly as possible (when an adequate early-strength level has been reached) to the concrete element is beneficial when it comes to minimising unfavourable temperature gradients. This allows the concrete body to cool down at a slower rate, which can reduce the internal temperature stresses. Numerical calculations can be used to describe this effect in accordance with the geometric constraints.

The reverse case – namely concreting on top of the asphalt element – is however critical. In order to stop the concrete sinking into the asphalt and prevent the evaporation of the mixing solution sufficient time must be left to allow the asphalt layer to cool down (to achieve the minimum viscosity required for loading strength and to attain the determined temperature limit). The limit temperature is considered to be the maximum temperature that can be expected in the concrete as a result of hydration. However a close watch has to be kept on the reheating of the asphalt due to the transference of hydration heat from the concrete. Numerical calculations are also needed here as part of the execution planning work.

2.2 Bitumen undercoat

Based on positive results already achieved, bitumen and asphalt is used for the sealing elements that are provided in addition to the bentonite. Extensive basic research at the Institute for Mining and Special Civil Engineering (5) has shown that a key factor for the sealing performance of the bitumen or asphalt element is to have as effective a bond as possible between the bitumen and the rock profile. Application of a suitable bitumen undercoat can improve the adhesion force acting at the asphalt seal and a special bitumen coating of this kind, which was developed by the Institute for Mining and Special Civil Engineering (6), has already been successfully tested.

2.3 Poured asphalt seals

There is real development potential in improving the quality control procedures used when installing poured asphalt seals, as already tried and tested in the rock salt industry, or in introducing a

Nachteilig sind die für die Fortsetzung der Bauarbeiten nach dem Einbau der Bitumen- bzw. Asphaltlemente erforderlichen Abkühlzeiten bis zum Erreichen einer Mindestviskosität, die ein Einsinken der nachfolgenden Materialien ausschließt.

Für die Randbedingungen im Salinar sind Kombinationen aus MgO-Beton und Asphalt eine weitere Option (s. Abschnitt 3). Die gegenseitige Beeinflussung ist gering. In der Bauphase ist der Bau der Asphaltabdichtung auf ein bestehendes MgO-Beton-Element unkritisch. Für die Minimierung ungünstiger Temperaturgradienten im Beton ist es vorteilhaft, den Asphalt so schnell wie möglich (bei Erreichen einer ausreichenden Frühfestigkeit) auf das Betonlement aufzubringen. Dadurch kühlt der Betonkörper langsamer ab, was die Temperatureigenstressungen verringern kann. Dieser Effekt kann durch numerische Berechnungen entsprechend den geometrischen Randbedingungen beschrieben werden.

Der umgekehrte Fall – Betonage auf das Asphaltlement – ist kritisch. Um das Einsinken des Betons in den Asphalt und das Verdampfen der Anmachlösung auszuschließen, ist das Abkühlen der Asphaltsschicht abzuwarten (Erreichen der Mindestviskosität für die Tragfähigkeit und einer Grenztemperatur). Die Grenztemperatur liegt im Bereich der maximal zu erwartenden Temperatur im Beton infolge der Hydratation. Allerdings ist die Wiederaufheizung des Asphalts infolge der Übertragung der Hydratationswärme aus dem Beton zu berücksichtigen. Auch hierzu sind numerische Berechnungen im Rahmen der Ausführungsplanung erforderlich.

2.2 Bitumen-Voranstrich

Für die zusätzlich zum Bentonit vorgesehenen Dichtelemente wird aufgrund der bereits positiven Erfahrungen als Dichtmaterial Bitumen bzw. Asphalt vorgesehen. Umfangreiche Grundlagenuntersuchungen am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (5) haben gezeigt, dass für die Dichtwirkung einer Bitumen- oder Asphaltabdichtung der Verbesserung der Haftwirkung zwischen dem eingesetzten Bitumen und der Gebirgskontur die entscheidende Bedeutung zukommt. Durch Auftragen eines geeigneten Bitumen-Voranstrichs kann die Haftwirkung im Bereich einer Asphaltabdichtung verbessert werden. Am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau wurde ein spezieller Bitumen-Voranstrich entwickelt (6), der bereits erfolgreich getestet wurde.

quality management system designed to monitor, maintain and record the planning specifications and material requirements. The following measures have been proposed in this respect (4):

- Testing the composition of the mix (asphalt formula) with reference to existing technical specifications and/or DIN EN 12697
- Inspection of the rock profile (dry and clean) as a prerequisite for good adhesion
- Assessment of deformation by indentation test (DIN 12697-21)
- Control of placement temperature
- Determination of the installed asphalt mass
- Determination of the installed volume of the seal in order to assess the mean compaction density
- Investigation by taking samples of the rock contact area (core drilling)
- Use of core drilling to determine the residual porosity and structure of the asphalt.

By employing these measures it is believed that proof of performance for a conventional sheet asphalt seal can also be safely provided for the high requirements specified for shaft seals destined for high-level radioactive waste repositories.

2.4 Crushed rock bitumen elements

Trials are now under way on a sealing element composed of crushed rock ballast whose interstices are filled with bitumen or filler-coated bitumen. This combination of materials produces a watertight element that is both durable and resistant to settlement.

When designing a crushed rock bitumen element for shaft seals it is assumed that there is a stable column of ballast or an appropriate section within this column in which the interstices can be filled with bitumen. This operation must not compromise the settlement stability of the ballast column. Such an operation is based on the requirement that the ballast column is constructed first and the bitumen fill is then introduced afterwards. Alternative methods in which the crushed rock is added to the hot bitumen can be ruled out of consideration.

The feasibility of a crushed rock bitumen element will depend on the capacity of the bitumen to penetrate the existing column of ballast. This penetration performance is determined by the following factors:

- initial temperature of the ballast
- initial temperature (installation temperature) of the bitumen
- outer surface of the stone ballast
- geometry of the pore space in the ballast fill.

The methods used to alter the flow behaviour of the bitumen in the pore space of the ballast column are very complex and mainly involve the transfer of heat between the bitumen and the stone, a process that increases the viscosity of the bitumen. However, if an intrinsic viscosity is exceeded it will no longer be possible to completely fill the ballast bed. For this reason the process can only make use of materials (grades of bitumen) whose viscosity at installation is significantly lower than the intrinsic viscosity. The latter value, which can be established by calculation, will depend on the geometry of the pathways in the ballast fill.

2.3 Gussasphalt-Dichtungen

Ein wesentliches Entwicklungspotential besteht in einer Verbesserung der Qualitätskontrolle beim Einbau bereits im klassischen Salzbergbau bewährter Gussasphaltdichtungen bzw. der Einführung eines Qualitätsmanagements, um die Planungsvorgaben und Materialanforderungen überwachen, einhalten und dokumentieren zu können. Dazu wurden folgende Maßnahmen vorgeschlagen (4):

- Prüfung der Zusammensetzung des Mischgutes (Asphaltrezeptur) in Anlehnung an bestehende technische Lieferbedingungen bzw. an die DIN EN 12697,
- Kontrolle der Gebirgskontur (Sauberkeit, Trockenheit) als Voraussetzung für ein gutes Haftvermögen,
- Prüfung des Verformungsverhaltens durch den Stempeldruckversuch (DIN 12697-21),
- Kontrolle der Einbautemperatur,
- Bestimmung der eingebauten Masse des Asphalts,
- Ermittlung des eingebauten Volumens der Dichtung zur Bestimmung der mittleren Einbaudichte,
- Untersuchung des Kontaktbereichs zum Gebirge durch Probenahme (Kernbohrungen),
- Bestimmung des Restporengehalts und des Gefüges des Asphalts an Hand von Bohrkernen.

Bei Umsetzung dieser Maßnahmen wird eingeschätzt, dass auch für die hohen Anforderungen eines Schachtverschlusses für ein Endlager radioaktiver Abfälle der Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer klassischen Gussasphaltdichtung sicher erbracht werden kann.

2.4 Schotter-Bitumen-Elemente

Derzeitig in Erprobung befindet sich ein Verschlusselement aus Schotter, dessen Zwischenräume mit Bitumen oder mit gefülltem Bitumen ausgefüllt sind. Durch diese Materialkombination kann dieses Element zugleich setzungsstabil und langzeitstabil flüssigkeitsdicht ausgeführt werden.

Ein Schotter-Bitumen-Element für Schachtverschlüsse geht davon aus, dass in eine setzungsstabile Schottersäule bzw. in einen entsprechenden Abschnitt dieser Schottersäule die Zwischenräume mit Bitumen ausgefüllt werden können. Dabei soll die Setzungsstabilität der Schottersäule nicht beeinträchtigt werden. Dies setzt voraus, dass immer zuerst die Schottersäule eingebaut wird und das Bitumen nachträglich aufgefüllt wird. Die Variante des nachträglich eingebrachten Schotters in heißes Bitumen scheidet aus.

Die Realisierbarkeit eines Schotter-Bitumen-Elementes hängt vom Eindringverhalten des Bitumens in die bestehende Schottersäule ab. Dieses Eindringverhalten wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Ausgangstemperatur des Schotters,
- Ausgangstemperatur (Einbringtemperatur) des Bitumens,
- äußere Oberfläche des Schotters,
- Geometrie des Porenraums der Schotterschüttung.

Die Vorgänge der Änderung des Fließverhaltens des Bitumens im Porenraum der Schottersäule sind sehr komplex und werden vor allem durch den Wärmeaustausch zwischen Bitumen und dem

2.5 Bitumen seal 'hard shell – soft core'

As outlined above, a seal constructed purely from bitumen is suitable for the lower sealing system which is designed to withstand fluid pressure from below. Here the density of the fluid encroaching from below must be greater than that of the bitumen.

The multi-layer seal 'hard shell – soft core' combines an ideal sealing bitumen (low viscosity, good wettability, good penetration capacity into the surrounding rock) with the outer-lying bearing layers (higher viscosity, no outflow, good encapsulation of the sealing bitumen). These conflicting requirements (ideal sealing properties with minimal bitumen loss through penetration) cannot be fulfilled by one type of bitumen alone.

Figure 3 shows one possible arrangement in which a 70/100 distillation bitumen provides the sealing layer while the more rigid 85/25 oxidised bitumen acts as a protective shell. Other bitumen combinations are also possible. A multi-layer seal of this kind is currently undergoing trials in an in-situ borehole test at Sondershausen mine.

For sealing systems that are designed to withstand fluid pressure from above the bitumen must be concentrated to such a level that its density is greater than that of the fluid encroaching from above. For this reason asphalt seals are always installed for the upper sealing systems of shaft barriers. In this case the 'hard shell – soft core' principle can also be applied with different grades of asphalt. In such systems the inner seal (the core) is composed of a more plastic asphalt with a higher binder content.

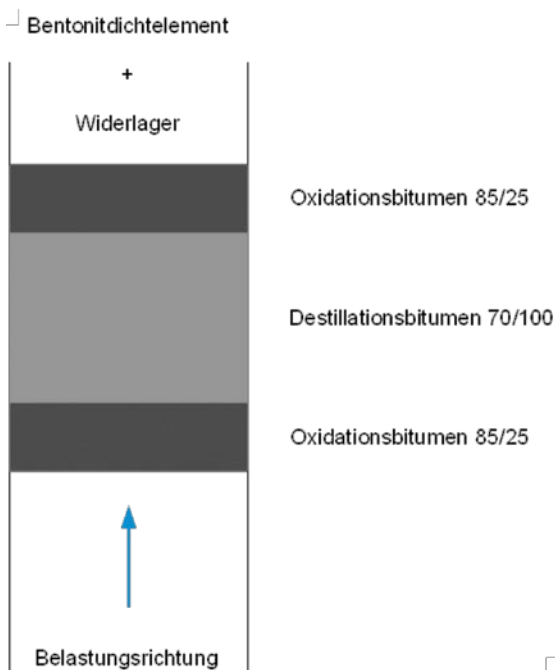


Fig. 3. Multi-layer seal constructed from HSSC bitumen (hard shell – soft core)

Bild 3. Mehrschichtdichtung aus Bitumen HSWK („Harte Schale – weicher Kern“)

Schotter bestimmt, der zu einer Viskositätserhöhung des Bitumens führt. Wird dabei eine Grenzviskosität überschritten, ist die Füllung des Schotterbettes nicht mehr vollständig möglich. Daraus folgt, dass nur die Materialien (Bitumensorten) eingesetzt werden können, deren Viskosität beim Einbau deutlich geringer sein wird, als diese Grenzviskosität. Die Höhe dieser Grenzviskosität hängt von der Geometrie der Wegsamkeiten in der Schotter-schüttung ab und kann rechnerisch bestimmt werden.

2.5 Bitumendichtung „Harte Schale – Weicher Kern“

Eine reine Bitumendichtung kommt, wie oben bereits beschrieben, für das untere Dichtsystem infrage, welches gegen Flüssigkeitsdruck von unten ausgelegt wird. Dabei gilt, dass die Dichte des von unten angreifenden Fluids größer sein muss, als die Dichte des Bitumens.

Das System der Mehrschichtdichtung „Harte Schale – weicher Kern“ vereint ein ideales Dichtbitumen (geringe Viskosität, gute Benetzung, gutes Penetrationsvermögen in das umliegende Gebirge) mit den außen liegenden Tragschichten (höhere Viskosität, kein Abströmen, Einkapselung des Dichtbitumens). Beide Anforderungen (ideales Dichtverhalten bei minimalen Bitumenverlusten durch Penetration) widersprechen sich und sind nicht durch eine Bitumensorte erfüllbar.

Bild 3 zeigt eine mögliche Anordnung aus einem Destillationsbitumen 70/100 als Dichtbitumen und aus dem steiferen Oxidationsbitumen 85/25 als Schale. Kombinationen anderer Bitumensorten sind möglich. Eine derartige Mehrschichtdichtung wird aktuell in einem in situ Bohrlochversuch im Bergwerk Sondershausen getestet.

Für Dichtsysteme, die gegen Flüssigkeitsdruck von oben ausgelegt werden, muss das Bitumen in seiner Dichte so beschwert werden, dass seine Dichte größer ist, als die Dichte des von oben angreifenden Fluids. Für die oberen Dichtsysteme von Schachtverschlüssen werden deshalb immer Asphalt-dichtungen eingebaut. Das Prinzip „Harte Schale – Weicher Kern“ kann in diesem Fall auch mit unterschiedlichen Asphalten realisiert werden. In diesem Fall besteht die innere Dichtung („Kern“) aus einem plastischeren Asphalt mit höherem Bindemittelanteil.

3 MgO-Beton

Im klassischen Salzbergbau werden MgO-Baustoffe immer dort eingesetzt, wo aufgrund eines nicht auszuschließenden Zutritts Mg-haltiger Lösungen die Anwendung zementbasierter Baustoffe nicht möglich ist. Dies betrifft generell alle Baumaßnahmen im Kalibergbau und weiterhin die Bauwerke im Steinsalz, in deren Umgebung (Grubengebäude) Mg-haltige Salze anliegen. In letzterem Fall stellt sich auch bei Zutritt einer primär reinen Steinsalzlösung ein entsprechender Mg-Gehalt der Lösung ein, da die Löslichkeit der Mg-Salze höher als die Löslichkeit des Steinsalzes ist.

Umfangreiche Untersuchungen gemeinsam mit dem Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg haben zur Entwicklung eines MgO-Betons auf Basis der 3-1-8 Bindemittelphase $[3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ geführt (7), der unter den oben genannten Bedingungen langzeitstabil ist. Mit dieser neu entwickelten Rezeptur wurde in der Grube Sondershausen ein in situ Versuch in einem Großbohrloch ($D = 1 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$) durchgeführt (Bild 4).

3 MgO concrete

Magnesium oxide materials are always employed in the conventional salt mining industry when cement-based materials cannot be used because of the risk of an inflow of magnesium-containing solutions. This generally affects all building and construction work in the potash industry and also any structures in the rock salt industry that are located in mine workings with a magnesium-salt environment. In the latter case a corresponding Mg level will establish itself in the solution even with the influx of a mainly pure rock salt solution, as the solubility of the magnesium salts is greater than that of the rock salt.

Wide-ranging investigations carried out in conjunction with the Institute of Inorganic Chemistry at Freiberg University of Mining and Technology have resulted in the development of a magnesium oxide concrete based on the 3-1-8 binder phase $[3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ (7) that exhibits long-term stability under the conditions described above. This newly developed formula was the focus of in-situ trials in a large-diameter borehole ($D = 1 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$) at Sondershausen mine (Figure 4).

The tests included measuring the temperature development in the MgO concrete during the setting reaction (Figure 5).

As expected, the temperatures at the rock profile are relatively low (< 45 to $50 \text{ }^\circ\text{C}$) because of the high thermal conductivity of the rock salt. The maximum temperatures at the core of the plug were measured at 65 to $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Using the calorimetric data from this formulation a maximum temperature difference of 55 K , for adiabatic conditions, was calculated as a result of the setting reaction. At the ambient temperature of $29.5 \text{ }^\circ\text{C}$ prevailing at the time this is equivalent to a potential maximum core temperature of $84.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

The MgO concrete plug can be made watertight by employing appropriate injection measures to consolidate the contact zone between the MgO concrete and the surrounding strata and by preventing the formation of cracks in the concrete. This makes it possible to design a range of sealing elements based on a favourable combination of MgO concrete and bitumen/asphalt (Figure 6).

4 Compacted crushed salt-clay mixtures

The use of filling columns constructed from compacted crushed salt has been considered for many years as a potential option for salt rock. Some progress has recently been made in developing this material for such a purpose (8), this mainly relating to the composition of the raw material and the installation procedure.

Laboratory tests have been carried out on different compositions of crushed salt and Friedland clay. Powdered bentonite can also be used as an alternative to Friedland clay.

The basic crushed salt mixture is blended from various individual fractions to produce a constant grain distribution. The maximum particle size is limited to 10 mm so as to restrict the amount of particle degradation during compaction.

Compactibility can be improved, and a lower residual porosity in the compacted mixture achieved, by adding ground clay and water. The optimum quantity of clay and moisture to be added will depend in turn on the compaction energy and probably also on the actual method of compaction used. Laboratory tests with a Marshall machine, which were based on a compaction force of 15.4 MJ/m^3 (in relation to the solids volume) and a crushed salt



Fig. 4. Setting up the large-borehole trial to test formula-C₃ MgO concrete (3-1-8 binder phase)

Bild 4. Einbau des Großbohrlochversuchs zum Test des MgO-Betons der Rezeptur C₃ (3-1-8-Bindemittelphase)

Dabei wurde während der Abbindereaktion die Temperaturentwicklung im MgO-Beton gemessen (Bild 5).

Erwartungsgemäß sind aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes die Temperaturen an der Kontur relativ niedrig (< 45 bis $50 \text{ }^\circ\text{C}$). Die maximalen Temperaturen im Kern des Pfropfens lagen bei 65 bis $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Aus den kalorimetrischen Daten der vorliegenden Rezeptur wurde für adiabatische Bedingungen eine maximale Temperaturdifferenz infolge der Abbindereaktion von 55 K berechnet. Dies entspricht unter der vorliegenden Umgebungstemperatur von $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$ einer maximal möglichen Kerntemperatur von $84,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bei Vergütung der Kontaktzone zwischen MgO-Beton und dem Gebirge durch geeignete Injektionsmittel und bei Vermeidung einer Rissbildung im MgO-Beton kann eine Flüssigkeitsdichtheit des MgO-Betonpfropfens erreicht werden. Dadurch

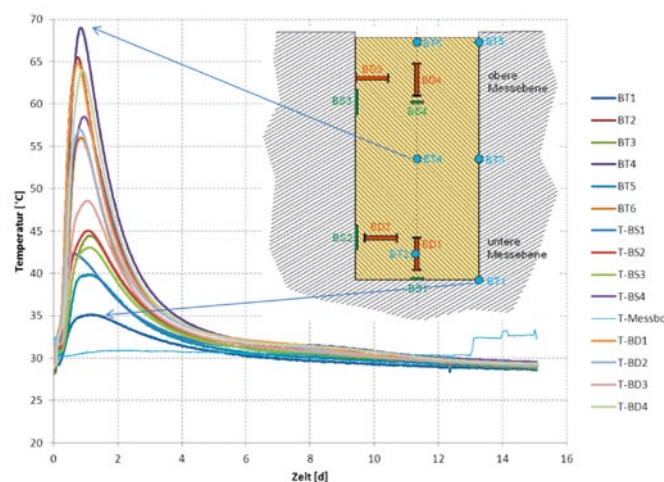


Fig. 5. Temperature profile measured in the MgO concrete plug ($D = 1 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$)

Bild 5. Gemessener Temperaturverlauf im MgO-Betonpfropfen ($D = 1 \text{ m}$, $L = 2 \text{ m}$)

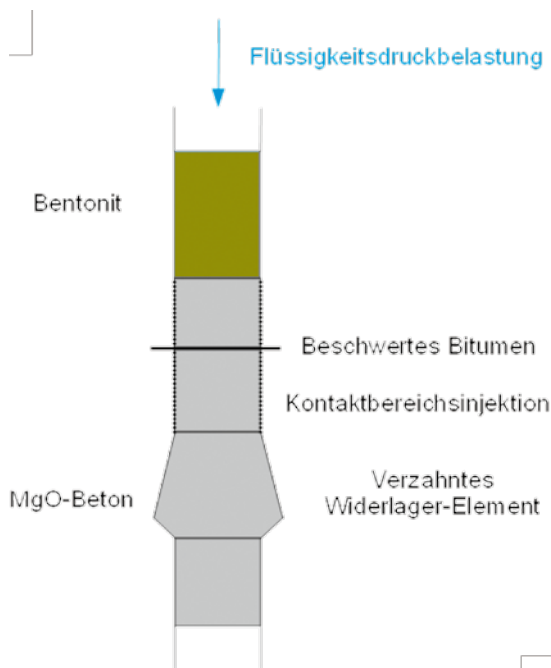


Fig. 6. Bentonite seal followed by MgO concrete element with integral bitumen sealing layer
 Bild 6. Bentonitdichtelement mit nachfolgendem Element aus MgO-Beton mit integrierter Bitumendichtschicht

mixture comprising 7.8% by vol. Friedland clay and 6.2% by vol. water, achieved a residual porosity (total pore volume) of 7.7%.

Problems arise however when these findings are transferred to the conditions that apply when constructing a column of fill inside a shaft. Conventional industrial compaction equipment, such as vibrating plates and trench rollers, can be employed easily and with little technical effort under in-situ conditions (Figure 7, left). However the compaction force that can be achieved with machines of this kind is relatively low. Performance is usually somewhere between 1 to 2.5 MJ/m³, but is difficult to quantify

ergibt sich die Möglichkeit der Konzipierung von diversitären Verschlusselementen in der vorteilhaften Kombination aus MgO-Beton und Bitumen/Asphalt (Bild 6).

4 Verdichtete Salzgrus-Ton-Gemische

Für die Wirtsgesteinsoption Steinsalz ist die Verwendung von Füllsäulen aus verdichtetem Salzgrus eine schon lange angestrebte Option. In der letzten Zeit hat es zu diesem Material einige Fortschritte gegeben (8), die sowohl die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials als auch das Einbauverfahren betreffen.

In Laborversuchen wurden verschiedene Gemischzusammensetzungen aus Salzgrus und Friedländer Tonmehl untersucht. Alternativ zum Friedländer Tonmehl kann auch Bentonitmehl verwendet werden.

Das Basisgemisch aus Salzgrus wird aus geeigneten Einzelfraktionen so zusammengemischt, dass man eine stetige Kornverteilung erhält. Um den Kornbruch während der Verdichtung einzuschränken, wird die maximale Korngröße auf 10 mm begrenzt.

Eine Verbesserung der Verdichtbarkeit bzw. eine geringere Restporosität des verdichteten Gemisches erhält man durch die Zugabe von Tonmehl und Wasser. Die optimale Menge des Tongehalts und der Feuchte ist wiederum von der Verdichtungsenergie und wahrscheinlich auch vom Verdichtungsverfahren selbst abhängig. Durch Laborversuche mit einem Marshall-Gerät wurde bei einer Verdichtungsenergie von 15,4 MJ/m³ (bezogen auf das Feststoffvolumen) mit einem Salzgrusgemisch mit 7,8 Vol.-% Friedländer Ton und 6,2 Vol.-% Wasser eine Restporosität (Gesamtporen) von 7,7% erreicht.

Problematisch ist die Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf die Bedingungen für den Einbau einer Füllsäule in einem Schacht. Unter In-situ-Bedingungen können die im Erdbau üblichen Verdichtungsgeräte wie Rüttelplatten und Grabenwalzen problemlos und mit geringem technischem Aufwand eingesetzt werden (Bild 7, links). Allerdings ist die mit diesen Geräten realisierbare Verdichtungsenergie relativ gering. Sie liegt im Bereich von 1 bis 2,5 MJ/m³ und kann aufgrund der Ungenauigkeiten der Verweil-

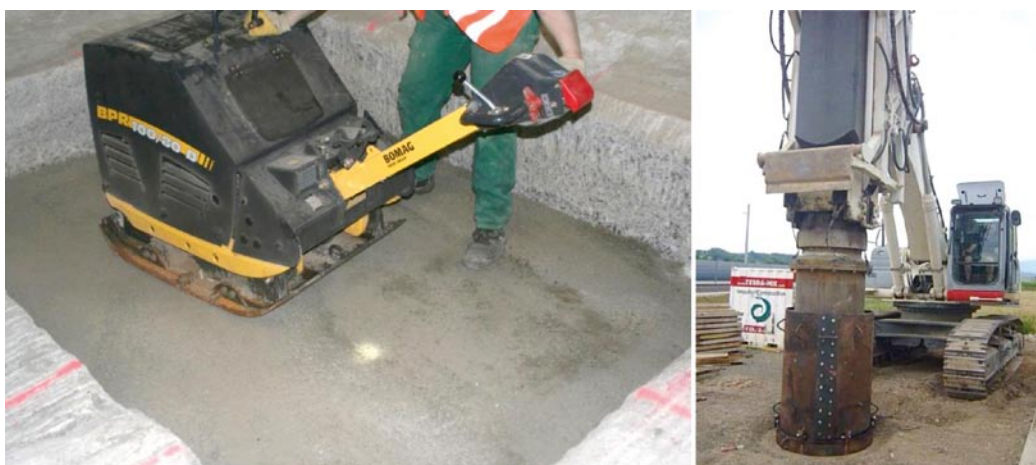


Fig. 7. Pilot-scale compaction trials with a crushed salt-clay mix. Left: in-situ test with a plate compactor. Right: first field trial with percussive compaction system at Wettmannstätten/Styria
 Bild 7. Halbtechnische Versuche zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemisch. Links: in situ Verdichtung mit einer Rüttelplatte. Photo / Foto: M. Uhlig
 Rechts: Erster Feldversuch zur Impulsverdichtung in Wettmannstätten/Steiermark. Photo / Foto: R. Schulze

because of the inexact nature of the machine dwell times. Compaction methods of this kind can only achieve residual porosity levels of about 15%. However, technical implementation presents no real problems.

A more effective solution is to use percussive compaction with high impactor masses of several tonnes and controllable drop heights of a few metres. The pulse compaction system developed by TERRA-MIX has already been trialled in a surface field test (Figure 7, right). In this case a compaction force of about 106 kNm per blow was achieved using an impactor mass of 9 t. Preparations are currently under way for another field trial in which a crushed salt-clay mixture will be dynamically compacted in three layers in a countersunk hole 8.5 m³ in volume.

The percussive compaction method can produce very high compaction forces, depending on the number of blows delivered, and hence can achieve lower residual porosity levels of < 10%. However, it would be very expensive to deploy this technology inside a shaft as this will require technical modifications and adjustments to the operating equipment. Evidence of technical feasibility would then have to be provided on a 1:1 scale.

5 Concept design

Using the material building blocks described above a number of early design concepts were presented that as well as bentonite and ballast columns also included the following sealing elements intended for the given host-rock options:

Host rock – mudstone:

- Stone-asphalt elements supplemented by concrete abutments with integral bitumen layers.

When designing the bentonite sealing elements there is still some further potential for ensuring uniform moisture penetration and preventing irregularities in the event of extremely fast rises in fluid pressure. The principle of a sealing system constructed from bentonite barriers and equipotential elements has been successfully tested in pilot-scale trials in collaboration with the Competence Centre for Material Moisture (CMM) at Karlsruhe Institute of Technology (KIT) (9). A fourth pilot trial is now under way, though this improved sealing system has not yet undergone in-situ trials on a 1:1 scale.

Host rock – rock salt:

- Compacted crushed salt-clay mixtures in combination with bitumen/asphalt elements
- Elements manufactured from MgO concrete with integral bitumen layers and a consolidated zone of contact with the rock face.

The parameters for a column of crushed salt and clay mix that can be produced in situ will determine the functional role that the column can play. Preliminary findings from tests carried out at the Institute for Rock Mechanics Leipzig (10) as well as from other investigations still running show that mixes with a clay content of around 15% may be capable of demonstrating immediate fluid tightness. In this case structures made from a crushed salt-clay mix can be regarded as another diversified sealing element for rock salt as the host-rock option.

zeit (Dauer der Übergänge) nicht genau quantifiziert werden. Mit diesen Verdichtungsverfahren sind nur Restporositäten von ca. 15% erreichbar. Die technische Umsetzbarkeit ist aber problemlos.

Vorteilhafter ist eine schlagende Verdichtung mit hohen Fallmassen von einigen Tonnen und beherrschbaren Fallhöhen von wenigen Metern. In einem übertägigen Feldversuch wurde das Verfahren der Impulsverdichtung der Firma TERRA-MIX bereits getestet (Bild 7, rechts). Die Fallmasse beträgt 9 t, je Schlag kann dadurch eine Verdichtungsarbeit von ca. 106 kNm realisiert werden. Zurzeit wird ein weiterer Feldversuch zur dynamischen Impulsverdichtung von einem Salzgrus-Ton-Gemisch in einem Gesenk mit 8,5 m³ Volumen in drei Lagen vorbereitet.

Mit der schlagenden Verdichtung bzw. Impulsverdichtung können je nach Schlagzahl sehr hohe Verdichtungsenergien und damit geringere Restporositäten < 10% erreicht werden. Allerdings ist die technische Umsetzung in einem Schacht sehr aufwendig, da sie technische Umbauten und Anpassungen des Gerätes erfordern. Dies zwingt letztendlich zu einem Nachweis der Realisierbarkeit im Maßstab 1:1.

5 Stand der Konzeptentwicklung

Mit dem vorliegenden und beschriebenen Materialbaukasten werden erste Konzeptentwürfe vorgestellt, die neben Bentonitdichtelementen und Schottersäulen folgende Verschlusselemente für die jeweiligen Wirtsgesteinsoptionen enthalten können:

Wirtsgesteinsoption Tonstein:

- Schotter-Asphalt-Elemente, ergänzt durch Betonwiderlager mit integrierten Bitumenschichten.

Bei der Gestaltung der Bentonitdichtelemente besteht in Details noch ein weiteres Entwicklungspotential hinsichtlich der Gewährleistung einer gleichmäßigen Durchfeuchtung und der Vermeidung von Unregelmäßigkeiten bei sehr schnellen Flüssigkeitsdruckanstiegen. Das Prinzip eines Dichtsystems aus Bentonitdichtung und sogenannten Äquipotenzialsegmenten wurde gemeinsam mit dem Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM) des Karlsruhe Institute of Technology (KIT) in halbtechnischen Versuchen bereits erfolgreich getestet (9). Ein vierter halbtechnischer Versuch dauert zurzeit noch an. Eine In-situ-Erprobung dieses verbesserten Dichtsystems im Maßstab 1:1 steht aber noch aus.

Wirtsgesteinsoption Steinsalz:

- Verdichtete Salzgrus-Ton-Gemische in Kombination mit Bitumen/Asphalt-Elementen,
- Elemente aus MgO-Beton mit integrierten Bitumenschichten und einer Vergütung des Kontaktbereiches zum Gebirge.

Die in situ realisierbaren Parameter einer Füllsäule aus Salzgrus-Ton-Gemischen entscheiden über die Funktion dieser Füllsäule. Erste vorläufige Ergebnisse von am IfG Leipzig (10) und von noch laufende Untersuchungen zeigen, dass mit Gemischen mit einem Tongehalt von ca. 15% der Nachweis der sofort wirksamen Flüssigkeitsdichtheit möglich erscheint. In diesem Fall kann das Element aus Salzgrus-Ton-Gemisch als weiteres diversitäres Dichtelement für die Wirtsgesteinsoption Steinsalz betrachtet werden.

Acknowledgements

The project that forms the basis for this paper was supported by funding from the Federal Ministry for Economics and Energy, reference 02E11193A and 02E11193B. The project was supervised and sponsored by Karlsruhe Water Technology and Waste Management (PTKA-WTE). The authors assume sole responsibility for the content of this paper.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen 02E11193A und 02E11193B gefördert. Das Vorhaben wird durch den Projektträger Karlsruhe Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Breidung, K.P. (2002): Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdethfurth. – BMBF-gefördertes Vorhaben, Kennz.: 02Co516, Kali u. Salz GmbH, Kassel.
- (2) Wilsnack, Th.; Sitz, P.; Heinemann, K.-H.; Rumphorst, K.; Hunstock, F. (2008): Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. Kali und Steinsalz, Nr. 3, S. 24 – 35.
- (3) Nold, A. L.; Zuidema, P.; Blümling, P. (2002): TECHNISCHER BERICHT 02-02. Konzept für die Anlage und Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Hg. v. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen.
- (4) Herold, Ph.; Gruner, M. (2011): Asphalt- und Bitumendichtungen für Schachtverschlüsse im Salinar – Stand der Technik und Optimierungsansätze. Bergbau – Zeitschrift für Rohstoffgewinnung, Energie, Umwelt, Nr. 9, S. 404 – 407.
- (5) Kudla, W.; Glaubach, U.; Gruner, M. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke mit Schwerpunkt Asphalt. Fachgespräch „Verschlussysteme für untertägige Entsorgungseinrichtungen“, Freiberg, 20. - 21. Oktober 2009 - Materialienband -, PTKA-WTE, Projektträger Karlsruhe im Karlsruher Institut für Technologie - Wassertechnologie und Entsorgung. S. 3 – 26.
- (6) Glaubach, U.; Gruner, M.; Hofmann, M. (2008): Material zur Verbesserung der Flüssigkeitsdichtheit einer Bitumen- oder Asphaltabdichtung durch wesentliche Verbesserung der Adhäsion bzw. Benetzung in der Kontaktzone zum Salzgestein. Patentschrift DE10 2008 050 211 B4.
- (7) Freyer, D.; Gruner, M.; Priestel, U. (2010): Aushärtbare Baustoffmischung und deren Verwendung. Patentschrift DE10 2010 024 974 B4.
- (8) Glaubach, U.; Hofmann, M.; Gruner, M.; Kudla, W. (2014): New Progress in Crushed Salt Compaction for Shaft Sealing Elements. International Conference on the Performance of Engineered Barriers. February 6-7, 2014. Proceedings Hannover. S. 455 – 474.
- (9) Königer, F.; Emmerich, K.; Kemper, G.; Gruner, M.; Gaßner, W.; Nüesch, R.; Schuhmann, R. (2008): Moisture spreading in a multi-layer hydraulic sealing system (HTV-1), Engineering Geology 98, 41 – 49.
- (10) Popp, T.; Weise, D.; Salzer, K.; Minkley, W. (2013): Improved crushed salt/clay backfill - Experiences from the seal concept shaft "Saale" – Teutschenthal mine. 4th US-German Workshop on Salt Repository, Design and Operation. September 17-18, 2013. Berlin.

Authors / Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla
Institut für Erdbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg
Dr.-Ing. Matthias Gruner
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Erdbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg
Dipl.-Ing. Philipp Herold
Planungsingenieur, DBE Technology GmbH, Peine
Dipl.-Geophys. Michael Jobmann
Stellvertretender Leiter Endlagersicherheit, DBE Technology GmbH, Peine