

Injection Processes for Rock Salt and Salt Backfill – Tried and Tested Materials and New Developments

According to the classic approach, fissure or pore systems in solid rock or backfill are to be injected with particle-laden, and thereafter particle-free material when a high level of impermeability is required. The suspensions used in the salt and potash mining industries are usually in the form of magnesia binders. Waterglass is also frequently employed as a particle-free injection medium because of its capacity to react with salts and saline solutions to form a solid. Waterglass reacts with magnesium oxide (MgO) and many other substances containing magnesium. This served as a basis for developing a new type of injection medium. Un-

like magnesia binders these mixtures move out along their flow paths and force waterglass, rather than an inert solution, into the adjoining areas. The lubricating effect of the waterglass improves the capacity of the particles to penetrate the cavities. This increases the degree to which the voids are filled with reactive material and the number of injections can potentially be reduced as a result. The mixtures can be combined with magnesia binders and pure waterglass and this serves to enhance the available range of injection media.

Injektionen von Salzgesteinen und Salzversatz – Bewährte Baustoffe und Neuentwicklungen

Nach der klassischen Vorgehensweise sind Riss- oder Porensysteme eines Gesteins oder Versatzes mit partikelhaltigen und danach partikelfreien Baustoffen zu injizieren, wenn eine hohe Dichtigkeit gefordert wird. Im Kali- und Steinsalzbergbau sind die Suspensionen meist Magnesiabinder. Aufgrund der Fähigkeit mit Salzen und Salzlösungen zu Feststoffen zu reagieren, wird häufig als partikelfreies Injektionsmittel Wasserglas eingesetzt. Wasserglas reagiert auch mit Magnesiumoxid (MgO) und vielen weiteren magnesiumhaltigen Stoffen. Dies war die Grundlage, einen neuen Typ von Injektionsmitteln zu entwickeln. Bei diesen Mischungen wird im Gegen-

satz zu Magnesiabindern ausgehend von ihren Strömungswegen keine inerte Lösung, sondern Wasserglas in die angrenzenden Bereiche abgepresst. Eine Schmierwirkung des Wasserglases verbessert das Eindringvermögen der Partikel in Hohlräume. Durch diese Effekte steigt das Ausmaß der Hohlräumeauffüllung mit reaktivem Material und es ergibt sich die Möglichkeit, die Anzahl der Injektionen zu reduzieren. Die Mischungen sind mit Magnesiabindern und reinem Wasserglas kombinierbar und bereichern damit die Palette an Injektionsmitteln.

1 Introduction

Rock salt is extremely compact and practically impermeable. However, mining activities and the excavation of underground cavities can result in stress differences in the rock and this in turn will cause fissures to form and lead to a loss of stability and density. A proven way of reducing these stress differences has been to fill the voids with building material or to backfill with crushed salt. However, the latter material takes a long time to compact into a rock-like mass, a process that depends on both its own weight and on the prevailing rock pressure. If strata convergence is to be confined relatively quickly, the pores of the backfill material, along with cracks, fissures, and other cavities, can be effectively filled with an incompressible medium. Further stabilisation of backfilled zones and damaged strata calls for the use of building materials that on setting are able to create a solid link between and within areas of loose rock or backfill. Material of this kind can also be used to close off flow paths for

1 Einleitung

Salzgesteine sind sehr kompakt und nahezu impermeabel. Infolge bergmännischer Tätigkeiten, d. h. wenn Hohlräume geschaffen werden, können jedoch im Gebirge Spannungsdifferenzen auftreten, die zur Rissbildung und damit zum Verlust der Stabilität und Dichtheit führen. Mit dem Ziel diese Spannungsdifferenzen zu senken, hat es sich bewährt, Hohlräume mit Baustoffen zu verfüllen oder mit Salzgrus zu versetzen. Salzversatz wird jedoch erst über lange Zeiträume durch Eigenlast und den Gebirgsdruck zu gesteinsartigen Körpern kompaktiert. Sofern die Gebirgskonvergenz kurzfristig zu begrenzen ist, sind daher die Poren des Versatzes, Risse sowie ggf. weitere Hohlräume mit inkompressiblen Stoffen aufzufüllen. Eine weitere Stabilisierung von Versatzkörpern und geschädigtem Gebirge erfordert den Einsatz von Baustoffen, die nach dem Erhärten aufgelockerte Gebirgs- oder Versatzbereiche kraftschlüssig miteinander verbinden. Zudem sind Baustoffe einzusetzen, wenn Fließwege für Lösungen oder

solutions and gases, i.e. to seal areas of rock and backfill in order to create sufficient impermeability. When measures of this kind are carried out under pressure, the process is referred to as "injection" and the material employed is termed "grout" or "injection medium".

Injection is a very demanding geotechnical operation, as the injection process cannot be observed visually, and despite careful exploration, there will still be some degree of uncertainty about the fissure and pore structure of the injection body. The success of such an operation will therefore depend on the use of suitable injection media in accordance with a carefully derived injection strategy. The company BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine/Germany, has extensive expertise in the injection of rock salt and salt backfill. The aim of this paper is to present the materials associated with operations of this kind, along with the developments that have taken place concerning these materials and the basic principles of their application.

2 Fundamental principles for the application of injection media

Injection operations are only successful if the particles present in the injection medium are able to penetrate the fissures and pores of the injection body, i.e. the entry points and constrictions must not become clogged. This assumes that the fissure width or the size of the pore constrictions is sufficiently large in relation to the particles contained in the injection medium. In this case equation (1) applies, where R_w is the fissure width, and D_{95} the particle size, at which 95% by mass of the granular mixture of the injection medium is finer than the pore entry points. Here, the D_{95} value is an effective particle size that takes account of the effects of agglomeration and binder reactions (1).

$$R_w / D_{95} > 5 \quad (1)$$

Equation (1) shows that injection media of increasing product fineness are to be employed for injecting fissures or for injecting cavities of diminishing size or width (2).

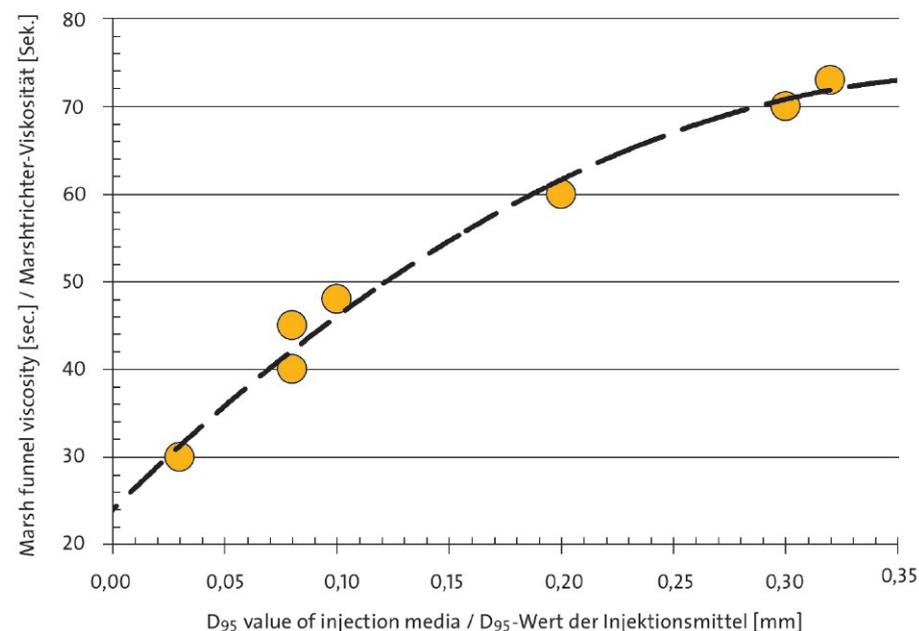


Fig. 1. Flow times as a measure of viscosity for the Marsh funnel according to (3) (discharge opening \varnothing 8 mm) and D_{95} values of particle-based injection media.

Bild 1. Fließzeiten als Maß der Viskosität aus dem Marshtrichter nach (3) (Auslauföffnung \varnothing 8 mm) sowie D_{95} -Werte von partikelhaltigen Injektionsmitteln. Für Wasser wurden zum Vergleich Fließzeiten von im Mittel 9,4 s gemessen.

Gase zu schließen, d.h. Gebirgs- oder Versatzbereiche abdichten sind, um Anforderungen an die Dichtigkeit zu erfüllen. Erfolgen diese Maßnahmen unter Druck, werden sie als Injektion (Einpressen) bezeichnet und die verwendeten Materialien als Einpress-, Füll-, Injektionsgut oder als Injektionsmittel.

Injektionen sind sehr anspruchsvolle geotechnische Arbeiten, da der Verpressvorgang nicht visuell verfolgt werden kann und trotz sorgfältiger Erkundung Ungewissheiten zum Riss- und Porengefüge der Injektionskörper vorliegen. Die Anwendung geeigneter Injektionsmittel entsprechend einer sorgfältig hergeleiteten Injektionsstrategie sind daher essentielle Voraussetzungen für ihren Erfolg. Die BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, verfügt über umfangreiche Kenntnisse zur Injektion von Salzgesteinen und Salzversatz. Im Rahmen dieser Arbeiten eingesetzte Baustoffe und Baustoffentwicklungen sowie Grundlagen ihres Einsatzes vorzustellen, ist das Ziel dieser Publikation.

2 Grundlagen zur Anwendung von Injektionsmitteln

Injektionen sind nur erfolgreich, wenn die Partikel des Injektionsmittels in die Risse und Poren des Injektionskörpers eindringen, d.h. Eintritts- oder Engstellen nicht verstopfen. Dies setzt voraus, dass das Verhältnis der Rissweite oder der Größe von Porenengstellen im Vergleich zu den Partikeln des Injektionsmittels ausreichend groß ist. So gilt für Risse die Gleichung (1), mit R_w der Rissweite, während der D_{95} -Wert die Partikelgröße ist, bei der 95 Massen-% des Korngemischs vom Injektionsmittel feiner sind. Hierbei ist der D_{95} -Wert eine effektive Partikelgröße, die Auswirkungen von Agglomerationen und Bindemittelreaktionen berücksichtigt (1).

$$R_w / D_{95} > 5 \quad (1)$$

Gleichung (1) zeigt, dass für die Injektion von Rissen oder allgemein von Hohlräumen abnehmender Weite oder Größe Injektionsmittel zunehmender Feinheit einzusetzen sind (2).

Nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille beeinflussen die Größe der Wegsamkeiten und die Viskosität (Zähigkeit) des Injektionsmittels den weiteren Fließprozess. Vernachlässigt man Ein-

According to the Hagen-Poiseuille law, the size of the pathways and the viscosity of the injection medium have an influence on the ongoing flow process. If inflow losses (Hagenbach effect) and capillary forces are disregarded, the flow behaviour in porous bodies (backfill) can be described in simplified terms by means of Darcy's law, where v is the speed of the fluid front, K_p the permeability of the porous body, μ the dynamic viscosity of the fluid and Dp the pressure difference over the distance Dx .

$$v = K_p / \mu \cdot Dp / Dx \quad (2)$$

In the event of a decrease in the permeability of the rock mass, which can be due to a reduction in the number or size of the pathways, it is therefore necessary to increase the injection pressure and/or to use a less viscous injection medium in order to ensure that the flow is maintained. Finer injection media will usually have a lower viscosity. Figure 1 shows the relevant circumstances, with the outflow times for a Marsh funnel being used as the unit of viscosity ("Marsh funnel viscosity")

The facts and circumstances as described above have far-reaching consequences for the injection strategy. Generally speaking, building materials with a high solids content, larger sized particles and a higher viscosity are used in order to fill or inject larger cavities and pathways. Subsequent injections then use finer injection media, which are usually of lower viscosity due to an increase in solvent level and/or the addition of superplasticizer. The final injection of very fine flow paths can then only be undertaken using solutions, i.e., particle-free injection media.

If they are to work effectively, injection media must perform their function over the long-term. They have to withstand chemical and mechanical influences and display the required material properties for the entire duration of their functionality. In the salt mining industry these requirements can be met by magnesia binders, if contact is expected with solutions containing magnesium chloride, and by waterglass, due to the extremely low solubility of its reaction products.

3 Magnesia binders

The basic components of magnesia binders are magnesium oxide (MgO) and/or magnesium hydroxide (Mg(OH)₂), along with highly-concentrated saline solutions containing magnesium. As with cement-based materials they can contain inert (type I, grout) or reactive (type II) additives, together with aggregate and other admixtures, such as plasticisers.

The flowability of materials requires a spacing between the suspended particles, which means that sedimentation and phase separation cannot be completely ruled out. Generally speaking, however, magnesia binders have a fairly low tendency for "bleeding" (secretion) or for the draining of the solution, though there is some risk of solution being squeezed out due to high injection pressures.

The processing time of the material will depend on the reactivity of the binding medium, this in turn is influenced by the grinding fineness and conditions of the production process. As it sets, the material binds both the water and the magnesium salts contained in its solution. In the case of the most commonly used variant, which contains a magnesium chloride solution, this re-

stromverluste (Hagenbach-Effekt) und Kapillarkräfte, so kann die Strömung in porösen Körpern (Versatz) vereinfacht mit Hilfe des Darcy-Gesetzes beschrieben werden, mit v der Geschwindigkeit der Fluidfront, K_p der Permeabilität des porösen Körpers, μ der dynamischen Viskosität des Fluids sowie Dp dem Druckunterschied zwischen der Distanz Dx .

$$v = K_p / \mu \cdot Dp / Dx \quad (2)$$

Bei einer Abnahme der Permeabilität des Gesteinskörpers, die auf eine Abnahme der Anzahl oder der Größe von Wegsamkeiten beruhen kann, ist daher zur Gewährleistung einer Strömung ein größerer Injektionsdruck und/oder die Anwendung eines geringer viskosen Injektionsmittels erforderlich. Feinere Injektionsmittel haben daher meist eine geringere Viskosität. Bild 1 zeigt diesen Sachverhalt, wobei als Maß der Viskosität die Ausfließzeiten aus einem Marshtrichter („Marshtrichter-Viskosität“) dargestellt sind.

Die beschriebenen Sachverhalte haben weitreichende Konsequenzen für die Injektionsstrategie. So werden im Allgemeinen Baustoffe mit hohem Feststoffgehalt, größeren Körnern und höherer Viskosität verwendet, um größere Hohlräume und Wegsamkeiten zu verfüllen bzw. zu injizieren. Bei den folgenden Injektionen werden feinere Injektionsmittel genutzt, die häufig infolge eines ansteigenden Lösungsgehalts und/oder den Einsatz von Fließmitteln gering viskos sind. Die abschließende Injektion sehr feiner Wegsamkeiten ist dann nur noch mit Lösungen, d.h. partikelfreien Injektionsmitteln, möglich.

Die erfolgreich verpressten Injektionsmittel müssen dauerhaft ihre Funktion erfüllen. Sie müssen den chemischen und mechanischen Einwirkungen widerstehen und die geforderten Materialeigenschaften über die geforderte Zeitdauer der Funktionstüchtigkeit aufweisen. Diese Voraussetzungen werden im Salzbergbau von Magnesiabindern erfüllt, wenn ein Kontakt mit magnesiumchloridhaltigen Lösungen zu erwarten ist sowie von Wasserglas aufgrund der extrem geringen Löslichkeit seiner Reaktionsprodukte.

3 Der Baustoff Magnesiabinder

Grundkomponenten der Magnesiabinder sind Magnesiumoxid (MgO) und/oder Magnesiumhydroxid (Mg(OH)₂) sowie hochkonzentrierte magnesiumhaltige Salzlösungen. In Analogie zu den zementbasierten Baustoffen können sie inerte (Typ I, Füllstoffe) oder reaktive (Typ II) Zusatzstoffe enthalten sowie Gesteinskörnung und Zusatzmittel, wie Fließmittel.

Die Fließfähigkeit von Baustoffen erfordert einen Abstand zwischen den suspendierten Partikeln, sodass eine Sedimentation und Phasentrennung nicht auszuschließen ist. Im Allgemeinen ist zwar die Neigung von Magnesiabindern zum „Bluten“ (Lösungsabsonderung) oder zum Drainieren der Baustofflösung gering, jedoch ist ein Abpressen von Lösung infolge erhöhter Injektionsdrücke nicht auszuschließen.

Ihre Verarbeitungszeit ist abhängig von der Reaktivität des Bindemittels, die von der Mahlfeinheit und den Bedingungen beim Herstellungsprozess beeinflusst wird. Beim Erhärten werden neben Wasser auch Magnesiumsalze der Baustofflösung gebunden. So entstehen bei der zumeist verwendeten Variante mit

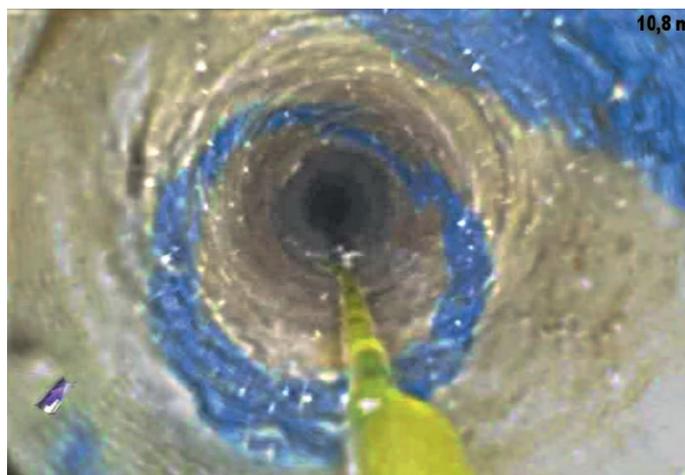
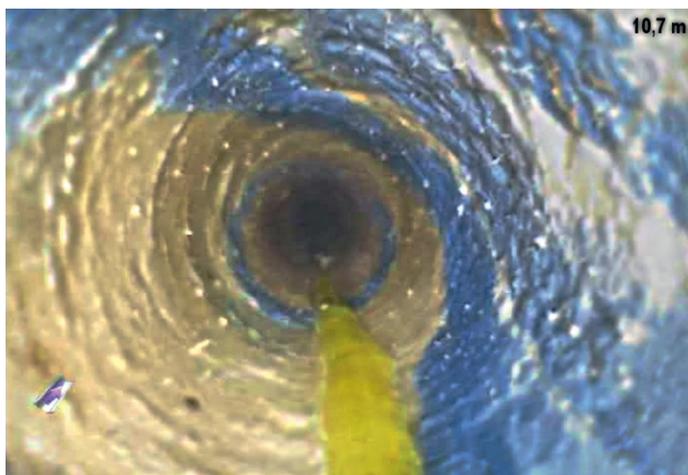


Fig. 2. Fissures in compacted salt backfill (in the mm and cm range) filled with blue magnesia binder. The borehole diameter is 76 mm.
 Bild 2. Mit blauem Magnesiabinder gefüllte Risse (mm- und cm-Bereich) in kompaktiertem Salzversatz. Der Bohrl Lochdurchmesser beträgt 76 mm.
 Photo/Foto: BGE TECHNOLOGY GmbH

sults in magnesium oxychloride. When it comes to the sealing of pathways, one beneficial characteristic is the expansion in volume during setting or, if there is limited capacity for an increase in volume, the development of pressure on the surrounding medium (rock, backfill). Figure 2, which is the result of a video camera inspection, shows the outcome of a successfully concluded fissure grouting operation using a magnesia binder that was coloured with blue pigment.

4 Waterglass

Waterglass is an aqueous solution of alkali silicates. In terms of the alkali metal, a distinction is to be made between sodium silicate (Na) and potassium silicate (K) solutions. Commercial products are classified according to their density. Increasing density means a higher viscosity and longer possible application time of the waterglass. The precipitation reactions are designated as “gelling” due to the formation of a silicate gel (amorphous silicon dioxide) and are based on a reduction in the pH value, the removal of water and/or an increase in salt concentration.

In a saline environment, the silicates dissolved in the waterglass are almost completely precipitated and the amorphous silicates in the long term can be transformed into three-dimensional silicate networks. Their solubility in salt solutions is comparable with that of quartz in water (4). Additionally, halite and magnesium silicate and magnesium oxychloride also crystallise out, the latter two on contact with Mg-containing solutions or salts. The solids occlude the pathways and join up the flanks of the cracks. Because of this sealing and consolidating effect waterglass has also proved to be a tried and tested injection medium for the mining and tunnelling industries (5), where it is mainly used in association with isocyanates (silicate resins) or with esters as a hardener (6) in the single-phase process. It can also be employed in conjunction with separately injected salt solutions according to the Joosten method (two-phase method), or in the salt mining industry where no additional hardeners are employed, as the salt itself acts as a hardening medium. The guidelines for successful implementation can be found in numerous specialist publications (7, 8).

Magnesiumchloridlösung Magnesiumoxychloride. Bezüglich der Abdichtung von Wegsamkeiten ist eine vorteilhafte Eigenschaft die Volumenexpansion beim Erhärten bzw. bei eingeschränkter Möglichkeit des Volumenanstiegs die Entwicklung eines Drucks auf das umgebende Medium (Gestein, Versatz). Das Bild 2 einer Kamerabefahrung (Videoinspektion) zeigt das Resultat erfolgreich abgeschlossener Rissverpressungen mit Magnesiabinder, der mit Pigmenten blau gefärbt wurde.

4 Wassergläser

Wassergläser sind wässrige Lösungen von Alkalisilikaten. In Bezug auf das Alkalimetall sind Natronwasserglas (Na) und Kaliumwasserglas (K) zu unterscheiden. Handelsübliche Produkte werden nach ihrer Dichte klassifiziert. Mit der Dichte steigen die Viskosität und die mögliche Einsatzzeit der Wassergläser. Die Fällungsreaktionen werden infolge der Bildung eines Silikatgels (amorphes Siliciumdioxid) als gelieren bezeichnet und beruhen auf einer Senkung des pH-Werts, einem Entzug von Wasser und/oder einem Anstieg der Salzkonzentration.

Im salineren Milieu fallen die im Wasserglas gelösten Silikate fast vollständig aus und die amorphen Silikate können sich langfristig in dreidimensionale Silikat-Netzwerke umwandeln. Ihre Löslichkeit in Salzlösungen ist vergleichbar der von Quarz in Wasser (4). Zudem kristallisieren Halit und bei einem Kontakt mit Mg-haltigen Lösungen oder Salzen Magnesiumsilikate und Magnesiumoxychloride. Die Feststoffe verstopfen Wegsamkeiten und verbinden Rissflanken. Aufgrund dieser abdichtenden und verfestigenden Wirkung sind Wassergläser auch im Bereich des Berg- und Tunnelbaus ein bewährtes Injektionsmittel (5), wobei es vor allem im Verbund mit Isocyanaten (Silikatharze) oder mit Estern als Härter (6) im Einphasenverfahren oder in Verbund mit getrennt injizierten Salzlösungen gemäß dem Joosten-Verfahren (Zweiphasenverfahren) oder im Salzbergbau ohne zusätzlichen Härter eingesetzt wird, da das Salz selbst als Härter fungiert. Richtlinien für ihren erfolgreichen Einsatz finden sich in zahlreichen Fachpublikationen (7, 8).

Grundsätzlich sind die Fällungs- und Umbildungsreaktionen vergleichbar mit Vorgängen in der Natur, wie die Quarzbildung

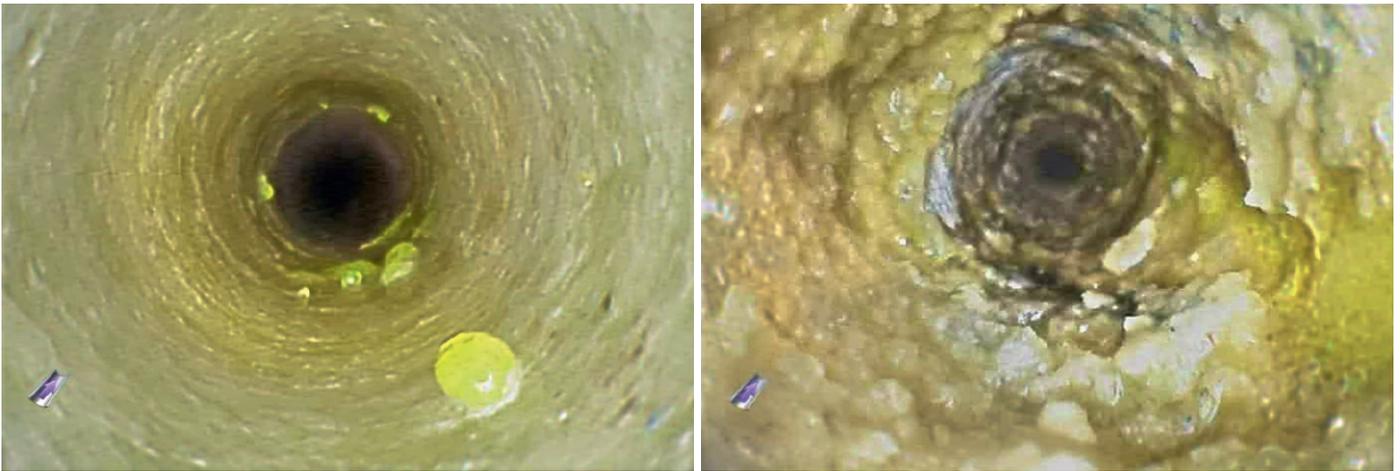


Fig. 3. Sodium silicate escaping in a lenticular and areal manner from salt backfill, appearing yellow due to the addition of uranin. Borehole diameter 76 mm. // Bild 3. Linsenförmig und flächenhaftig aus Salzversatz austretendes Natronwasserglas, das durch die Zugabe von Uranin gelb erscheint. Bohrlochdurchmesser 76 mm.

The precipitation and transmutation reactions are essentially comparable with processes that take place in nature, such as quartz formation during sea-water evaporation and the occurrence of silicification in the vicinity of evaporite formations (9). Petrified wood and the frequent occurrence of silicated glass are also evidence of the capacity and durability of waterglass. Figure 3 shows the results of pore-space injections (salt backfill) with sodium silicate that was traced using uranin as a fluorescent dye.

5 Potential for optimisation

It is often recommended that a liquid such as water should be introduced ahead of the particle-based injection medium in order to prevent any loss of fluid from the suspensions during the flow process. The “maceration” resulting from the wetting of the dry surfaces could reduce the flowability of the injection medium and cause a blockage of the flow paths. During the injection process, solutions can also be squeezed out of the suspensions and into the pores, fissures or tips of the cracks that are not accessible for the particles (Figure 4).

The solutions that are squeezed out of the material for the wetting of the flow paths cannot, however, contribute to the stabilisation or sealing of the injection body. In fact, the penetration of injection media into the solution-filled cavities can even be hindered, or the solutions may become mixed with the injection medium, with the result that the quality of the latter is impaired. It is also well known (equation (1)) that particles cannot penetrate

bei der Meerwassereindunstung sowie das Auftreten von Verkieselungen in der Nähe von Evaporitformationen (9) zeigen. Auch versteinerte Hölzer und das häufige Auftreten silikatischer Gläser, sind Belege für die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Wassergläser. Das Bild 3 zeigt Resultate von Porenrauminjektionen (Salzversatz) mit Natronwasserglas, das mit Uranin als fluoreszierendem Farbstoff getracert wurde.

5 Möglichkeiten der Optimierung

Häufig wird empfohlen, vor den partikelhaltigen Injektionsmitteln Flüssigkeiten, z.B. Wasser, zu verpressen, um einen Flüssigkeitsverlust der Suspensionen beim Strömungsprozess zu verhindern. Dieses sogenannte „Abmagern“ als Folge des Benetzens trockener Oberflächen könnte die Fließfähigkeit des Injektionsmittels verringern und ein Verstopfen der Fließwege bewirken. Bei der Injektion können zudem Lösungen aus den Suspensionen in Poren oder Risse bzw. Rissspitzen abgepresst werden, die für die Partikel nicht zugänglich sind (Bild 4).

Zum Benetzen der Strömungswege und aus dem Baustoff ausgepresste Lösungen können aber nicht zur Stabilisierung oder Abdichtung der Injektionskörper beitragen. Vielmehr kann sogar das Eindringen von Injektionsmitteln in die lösungserfüllten Hohlräume behindert werden oder die Lösungen vermischen sich mit den Injektionsmitteln, sodass deren Qualität leidet. Bekannt ist zudem (Gl. (1)), dass Partikel nicht in die Rissspitzen eindringen können, sondern nur der Lösungsanteil der Injektionsmittel. Diese

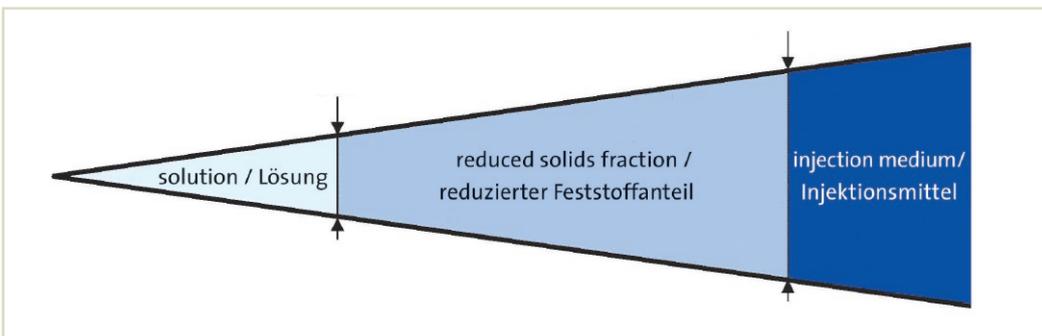


Fig. 4. Separation of material solution and injection medium suspension in the tip of a crack. Bild 4. Trennung von Baustofflösung und Injektionsmittelsuspension in einer Risspitze. Source/Quelle: BGE TECHNOLOGY GmbH

right to the tips of the cracks and that only the solution component of the injection medium is able to do this. This situation, along with the experience gained from the use of waterglass, led to a modification of the injection strategy and to the development of a new family of building materials.

Prior to reactive waterglass is introduced magnesia binder, it can act as a lubricating film and temporarily expand the flow paths. At the contact surface of the injection media, the reaction of the waterglass with the magnesium chloride solution of the magnesia binder also forms a silicate gel layer, which allows higher pressures to be attained at the magnesia binder. As a result, the fissures and pore spaces are more effectively filled and closed, as has been verified in application. However, this method cannot avoid the separation of solution from the magnesia binder. This was the reason why a further step was taken by replacing the mixing solution of magnesia binder with sodium waterglass (NaWG).

6 The development of MgO-NaWG mixtures

Laboratory tests have already indicated that waterglass reacts with magnesium oxide, magnesium hydroxide and amorphous silicates but that these reactions are so slow that the processing times permit its use as an injection medium. It has also been established that many possibilities exist for controlling the properties of these mixtures. In addition to the composition of the formula, it is worth noting the availability of binders of different reactivities and the wide range of waterglass products that exists, both in terms of the dissolved alkalis and the density and viscosity levels. The main emphasis of the investigations was on mixtures of magnesium oxide and NaWG, as the use of NaWG and magnesia binders with MgO provided the basis for many successful injection programmes, and MgO-NaWG mixtures are in material terms a link between pure waterglass and magnesia binders containing MgO.

The development work on these materials took into consideration the requirements for injection media as specified in the relevant documents (10, 11, 12). However, as waterglass is itself a stabilising and sealing injection medium, unlike normal building materials that are mixed with a saline solution or water, there are no specifications laid down regarding of material "bleeding". Indeed, it may be beneficial, or even necessary, to introduce bleeding or strongly bleeding mixtures, especially when – in addition to the flow paths for the suspension – larger volumes of cavities have to be injected that are not particle-accessible. The quantity of waterglass that can penetrate the pores, fissures and crack tips will then increase as the solids fraction is reduced. In salt backfill, solution can also be removed from the building material by capillary force. When using MgO-NaWG mixtures, this effect can be compensated for by increasing the waterglass content.

As mixtures only contain magnesium oxide as a solid, there can be no separation of coarse and fine particles in the suspension. Index tests with formulations containing other types of additives and aggregates have shown, however, that these mixtures are robust when it comes to sedimentation stability.

In the case of suspensions, the viscosity is influenced not only by the fluidity of the "carrier fluid" but also by the number of collisions between the particles. The latter will initially increase linearly with the volume share of particles present and will then

Sachverhalte und die beim Einsatz von Wasserglas gesammelten Erfahrungen mündeten in einer Modifikation der Injektionsstrategie sowie der Entwicklung einer neuen Baustofffamilie.

Wird reaktives Wasserglas vorlaufend zum Magnesiabinder verpresst, so kann das Wasserglas als Schmierfilm fungieren und durch Anlösereaktionen die Fließwege temporär erweitern. Am Kontakt der Injektionsmittel bildet sich zudem durch die Reaktion des Wasserglases mit der Magnesiumchloridlösung des Magnesiabinders eine Silikatgelschicht, die es erlaubt, höhere Drücke des Magnesiabinders zu realisieren. Die Folge ist ein besseres Erschließen und Auffüllen von Rissen und Porenräumen, wie die Anwendungsbeispiele belegen. Das Abpressen von Lösung aus dem Magnesiabinder kann jedoch auf diese Weise nicht vermieden werden. Dies war der Grund, noch einen Schritt weiterzugehen und die Anmischlösung der Magnesiabinder gegen Natronwasserglas (NWG) auszutauschen.

6 Die Entwicklung der MgO-NWG-Mischungen

Bereits Labortests ergaben, dass Wassergläser mit Magnesiumoxid, Magnesiumhydroxid und amorphen Silikaten reagieren, aber diese Reaktionen so langsam sind, dass die Verarbeitungszeiten einen Einsatz als Injektionsmittel ermöglichen. Zudem wurde festgestellt, dass zahlreiche Möglichkeiten bestehen, die Eigenschaften dieser Mischungen zu steuern. Neben der Rezepturzusammensetzung ist diesbezüglich die Verfügbarkeit unterschiedlich reaktiver Bindemittel und die Vielzahl an Wasserglassorten hervorzuheben, sowohl bezüglich der gelösten Alkalien als auch der Dichte und Viskosität. Schwerpunkt der Untersuchungen waren Mischungen mit Magnesiumoxid und Natronwasserglas (NWG), da der Einsatz von NWG und von Magnesiabindern mit MgO die Grundlage erfolgreich durchgeführter Injektionsprogramme war und MgO-NWG-Mischungen stofflich ein Bindeglied reiner Wassergläser und MgO-haltiger Magnesiabinder sind.

Bei der Baustoffentwicklung wurden die in maßgeblichen Dokumenten aufgeführten Anforderungen an Injektionsmittel berücksichtigt (10, 11, 12). Da Wasserglas selbst ein stabilisierendes oder abdichtendes Injektionsmittel ist, besteht jedoch im Gegensatz zu Baustoffen, die mit Salzlösung oder Wasser angemischt werden, keine Anforderung an das Baustoffbluten. Es kann vielmehr sogar von Vorteil oder erforderlich sein, blutende oder stark blutende Mischungen zu verpressen, insbesondere wenn neben den Fließwegen der Suspension ein größeres Volumen nicht partikelzugänglicher Hohlräume zu injizieren ist. So steigt mit sinkendem Feststoffanteil die Menge an Wasserglas, die in feine Risse, Rissspitzen und/oder Poren eindringen kann. Im Salzversatz kann Baustoffen auch durch Kapillarkräfte Lösung entzogen werden. Bei MgO-NWG-Mischungen kann dieser Effekt durch einen erhöhten Wasserglasanteil kompensiert werden.

Da Mischungen nur Magnesiumoxid als Feststoff enthalten, können sich Grob- und Feinanteile der Suspension nicht entmischen. Indexversuche von Rezepturen mit weiteren Zusatzstoffen und Gesteinskörnung zeigten aber, dass diese Mischungen in Bezug zur Sedimentationsstabilität robust sind.

Die Viskosität wird bei Suspensionen neben dem Fließvermögen der „Trägerflüssigkeit“ von der Anzahl der Zusammenstöße der Partikel beeinflusst. Die Anzahl der Zusammenstöße steigt

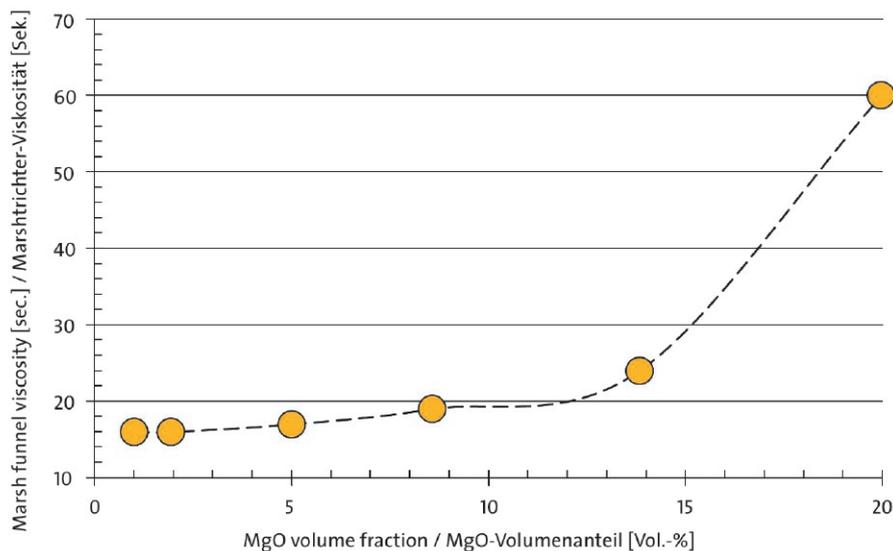


Fig. 5. Outflow times of MgO-NaWG suspensions from the Marsh funnel (discharge aperture \varnothing 8 mm, cf. DIN EN 445). The represented range of the MgO volume fraction corresponds to a mass fraction of maximum 40%. The density of the waterglass is 1.35 g/cm³.
 Bild 5. Ausfließzeiten aus dem Marshtrichter (Auslauföffnung \varnothing 8 mm, vgl. DIN EN 445) von MgO-NWG-Suspensionen. Die dargestellte Bandbreite des MgO-Volumenanteils entspricht einem Massenanteil von maximal rd. 40%. Die Dichte des Wasserglases betrug 1,35 g/cm³.
 Source/Quelle: BGE TECHNOLOGY GmbH

multiply disproportionately after a certain threshold is reached. As Figure 5 shows, this correlation also exists for MgO-NaWG suspensions, where the flow times from the Marsh funnel are comparable to the measured values for the magnesia binders being used as injection media (cf. Figure 1).

When the solid/solution ratio is identical, the MgO-NaWG mixtures are more viscous than classic injection media. This find-

dabei mit dem Volumenanteil der Partikel zunächst linear und ab einem Grenzwert überproportional an. Dieser Zusammenhang gilt nach Bild 5 auch für MgO-NWG-Suspensionen, wobei die Fließzeiten aus dem Marshtrichter vergleichbar mit den Messwerten der als Injektionsmittel eingesetzten Magnesiabinder sind (vgl. Bild 1).

Bei identischem Feststoff-/Lösungsverhältnis sind die MgO-NWG-Mischungen im Vergleich zu klassischen Injektionsmitteln höher viskos. Dieser Befund ist plausibel, weil Wassergläser im Vergleich zu Wasser oder Salzlösungen viskoser sind. Praktische Erfahrungen zeigen aber, dass diese höhere Viskosität der MgO-NWG-Mischungen für den Einsatz als Injektionsmittel nicht grundsätzlich zu Schwierigkeiten führt. In Analogie zu den klassischen Baustoffen besteht aber trotzdem die Notwendigkeit, dass größere Hohlräume oder Wegsamkeiten zunächst sorgfältig zu verfüllen bzw. zu injizieren sind, damit die erforderlichen Injektionsdrücke aufgebracht werden können.

Mit dem Ziel, die Injektion von Salzversatz und das Abpressen von Lösung zu untersuchen, erfolgten Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab. Im Labor wurden MgO-NWG-Mischungen in Salzgruse unterschiedlicher Körnungen eingepresst. Bei den geringen Injektionsdrücken konnten Festkörper mit einem Durchmesser und einer Höhe von rd. 5 cm hergestellt werden. Realitätsnahe Rahmenbedingungen konnten im Technikum unter In-situ-Bedingungen realisiert werden. Bei diesen Versuchen wurden MgO-NGW-Gemische mit einer Handkolbenpumpe über eine Injektionslanze in Salzgrusmischungen verpresst. Nach dem Entfernen des Druckbehälters wurde loser Salzgrus entfernt, sodass die Injektionskörper bemustert werden konnten. Bild 6 zeigt ein Beispiel, wobei dem Injektionsmittel ein Pigment zugegeben wurde. Die Farbvariationen beruhen auf dem unterschiedlichen Eindringvermögen des Baustoffs, da eine Schichtung nicht vollständig vermieden werden konnte.

Die Befunde der Untersuchungen belegen in eindrucksvoller Weise einen sehr großen Anwendungsbereich der MgO-NWG-Mischungen. So kann bei entsprechender Feinheit des Magnesiumoxids bei Poreninjektionen der gesamte Bereich vom Grobschluff bis Mittelkies injiziert werden (Bild 7).

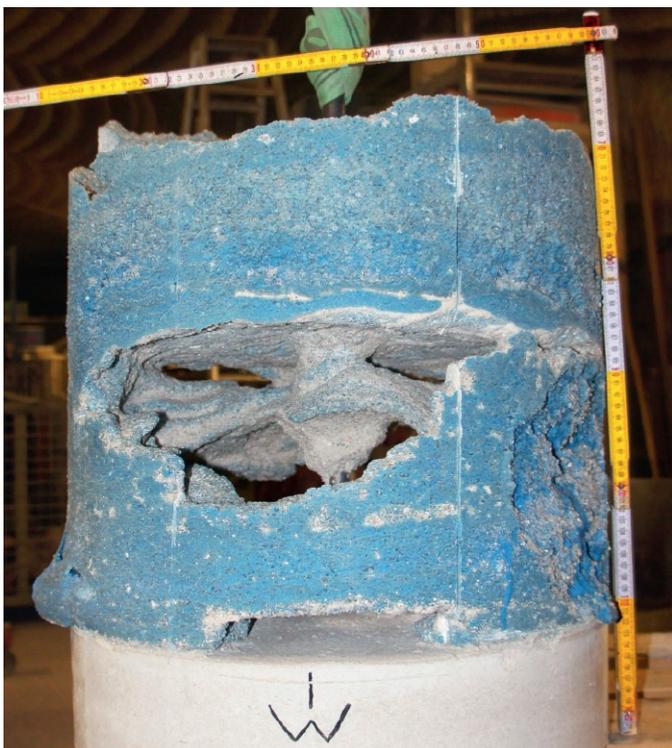


Fig. 6. Reinforced injection body as the result of a pilot-scale test to inject crushed salt (compaction density 1.52 g/cm³, porosity 30% by vol.) with MgO-NaWG mixtures. The non-injected areas of salt were removed by mechanical means.

Bild 6. Verfestigter Injektionskörper als Resultat eines Technikumsversuchs zur Injektion von Salzgrus (Einbaudichte 1,52 g/cm³, Porosität 30 Vol.-%) mit MgO-NWG-Mischungen. Nicht injizierte Salzgrusbereiche wurden mechanisch entfernt. Photo/Foto: BGE TECHNOLOGY GmbH

ing is logical because waterglass is more viscous than water or saline solutions. Practical experience has shown, however, that the higher viscosity level of MgO-NaWG mixtures does not generally cause difficulties when they are used as injection media. Nevertheless, as with classic building materials, it is still necessary to ensure that the larger cavities or flow paths are carefully filled or injected first so that the required injection pressures can then be applied.

Tests were carried out on both a laboratory and semi-technical scale in order to investigate the grouting of salt backfill and the solution separation process. The laboratory tests involved the injection of MgO-NaWG mixtures into crushed salt of different grain size. Solid bodies of about 5 cm in diameter and height were obtained at the low injection pressures used. Realistic parameters were also achieved on a pilot scale under in-situ conditions. For these tests, MgO-NaWG mixtures were introduced into crushed salt mixtures using an injection lance and piston pump. After the pressure vessel had been detached, residual free salt was removed so that the injection body could be sampled. Figure 6 shows one example where a pigment was added to the injection medium. The colour variations are associated with the different penetration rates of the material, as it was not possible to prevent some degree of layering.

The results of the tests clearly demonstrated that MgO-NaWG mixtures have a very wide field of application, which means that when carrying out pore injection work with magnesium oxide of appropriate particle fineness, it is possible to treat the entire spectrum from coarse silt to medium-grained gravel (Figure 7).

According to the optimised injection strategy, the mixtures can also be used in conjunction with magnesia binders. This means that disaggregated areas of rock and backfill can be stabilised and sealed quickly and efficiently. It also provides for the possibility of injecting in one continuous process not only the larger pores and fissures but also those cavities that are only accessible to solutions. This in turn will reduce both the duration and the cost of the injection programme.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Müller-Hoeppe, N.; Schmidt, H.: Construction engineering: Grouting measures in damaged rock salt. In: Roberts, L.; Mellegard, K.; Hansen, F., Mechanical Behaviour of Salt VIII, Taylor & Francis Group, 2015, pp. 147–151.
- (2) Eichler, K. und 11 Mitautoren: Fels- und Tunnelbau. Kontakt & Studium, Band 592, 2000, expert verlag.
- (3) DIN EN 445: Einpressmörtel für Spannglieder – Prüfverfahren. Ausgabedatum Januar 2008.
- (4) Engelhardt, H.-J.; von Borstel, L. E.: The behaviour of sodium silicate solutions (water glass) in the saline environment and their use in salt mining. Z. Dt. Ges. Geowiss., 165, 2014, S. 115–122, Stuttgart.
- (5) Kus, R.: Technical and Economic Possibilities for Permanent Limitation of Water Inflow to Mine Workings. In: Kicki, J.; Sobczyk, J. (Hrsg.) International Mining Forum 2004, New Technologies in Underground Mining Safety in Mines, pp. 242–256.
- (6) US Army Corps of Engineers: Engineering and Design. Chemical Grouting. Engineer Manual EM 1110-1-3500, 1995.
- (7) Bruce, D. A.; Littlejohn, G. St.; Naudts, A. M. C.: Grouting Materials for Ground Treatment: A Practitioner's Guide. Geotechnical Special Publications, Januar 1997, pp. 306–334.

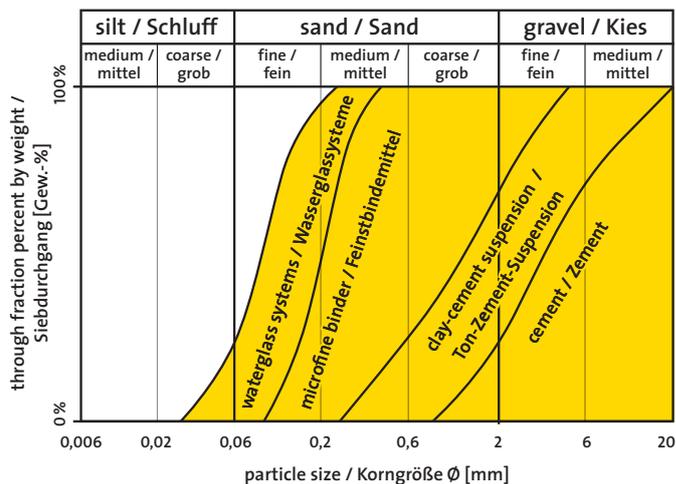


Fig. 7. Range of application of MgO-NaWG suspensions for pore injection operations. The mixtures can be used over the classic application range of waterglass, cement and microfine-cement suspensions.

Bild 7. Anwendungsbereich von MgO-NaWG-Suspensionen bei Poreninjektionen. Die Mischungen sind einsetzbar in den klassischen Anwendungsbereichen der Wassergläser, Feinstzement- und Zement-Suspensionen.

Gemäß der optimierten Injektionsstrategie sind die Mischungen auch im Verbund mit Magnesiabindern einsetzbar. Aufgelockerte Gebirgsbereiche und Versatzkörper können somit effizient und zügig stabilisiert und abgedichtet werden. Zudem ergibt sich damit die Möglichkeit, größere Risse und Poren sowie nur lösungszugängliche Hohlräume in einem Zug zu injizieren. Auf diese Weise können der Zeitbedarf und die Kosten des Injektionsprogramms reduziert werden.

- (8) Funehag, J.: Guide to grouting with silica sol – for sealing in hard rock. BeFo Rock Engineering Research Foundation, Report 118, 2012.
- (9) Moos, A.: Die Erdöllagerstätten am Salzstock von Ödesse. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft (84) 1932, S. 465–480.
- (10) Bergbau – Zementinjektionen. Vorläufiges Merkblatt für Zementeinpressungen im Bergbau, Fassung 1969. Beton, 20, 1970, S. 19–22.
- (11) DIN EN 12715: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) Injektionen. Ausgabedatum Oktober 2000.
- (12) Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG): Kommentar zur EN 12715. Injektionen. Salzburg, 2016.

Authors / Autoren

Dr rer. nat. Hans-Joachim Engelhardt, Thomas Meyer, Holger Schmidt, BGE TECHNOLOGY GmbH, Peine, Matthias Heydorn, Jonas Weber, BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Schachtanlage Asse, Remlingen