

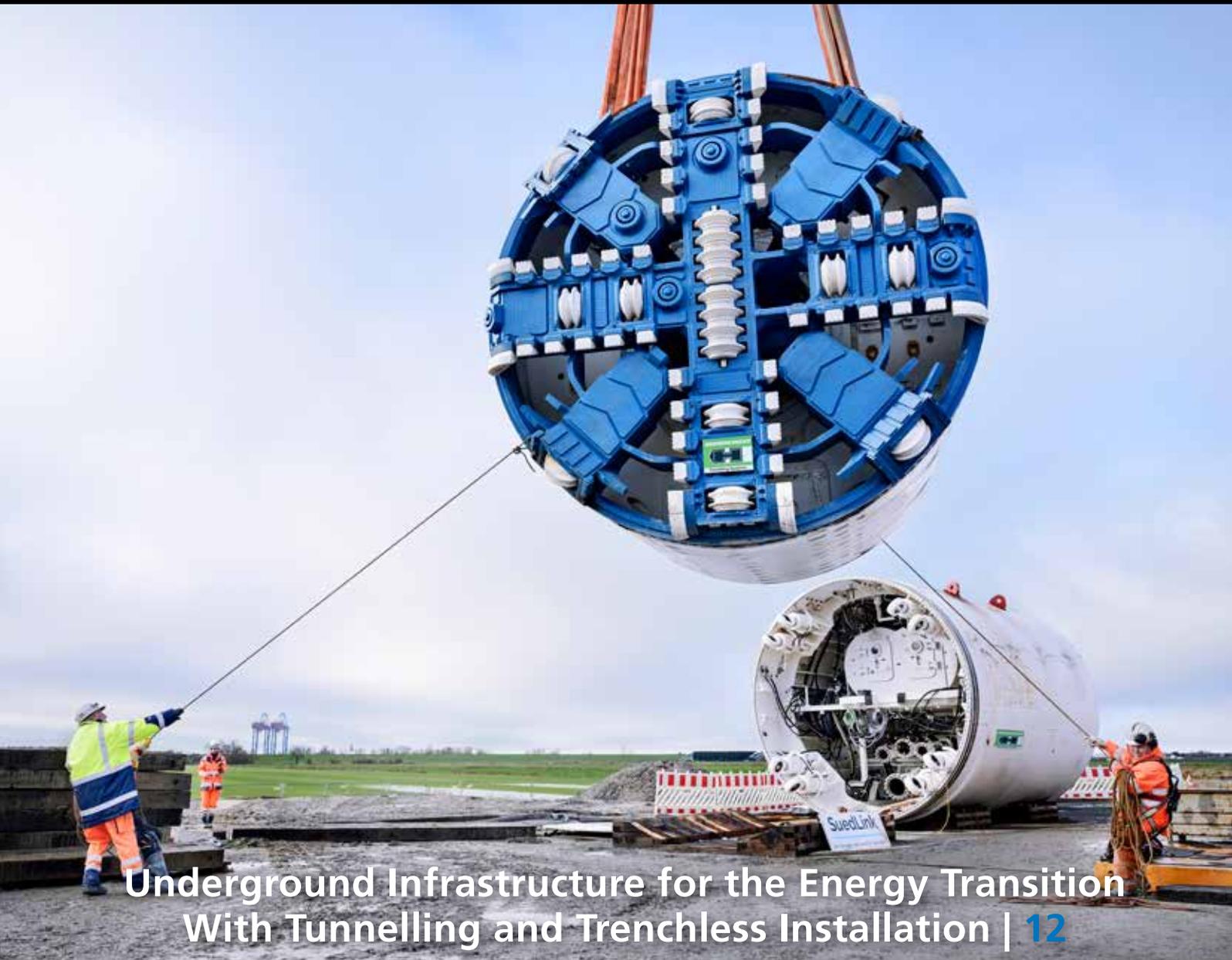


www.tunnel-online.info

tunnel

Offizielles Organ der STUVA · Official Journal of the STUVA

1
2025



**Underground Infrastructure for the Energy Transition
With Tunnelling and Trenchless Installation | 12**

**Forbach Pumped Storage Power Plant:
Breakthrough of the Energy Transfer Tunnel | 2**

AI-Supported Recycling of Spoil From Mechanised Tunnelling | 6
**Tunnel Sealing and Stabilisation With
Hybrid Injection System | 26**

tunnel 1/2025

Offizielles Organ der **STUVA**
www.stuva.de

Title

**Underground Infrastructure for the Energy Transition
With Tunnelling and Trenchless Installation**

Unterirdische Infrastrukturen für die Energiewende in
Tunnelbauweise und grabenloser Verlegung

Credit/Quelle: Günther Bayerl/Herrenknecht AG



Application of the innovative hybrid injection system HIS during a presentation in the Hagerbach Test Gallery in Switzerland

Einsatz des neuartigen Hybrid-Injektions-Systems HIS anlässlich einer Präsentation im VersuchsStollen Hagerbach in der Schweiz

Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

News / Nachrichten

2

Excavation Technology / Vortriebstechnik Underground Infrastructure for the Energy Transition With Tunnelling and Trenchless Installation

12

Unterirdische Infrastrukturen für die Energiewende
in Tunnelbauweise und grabenloser Verlegung

Marc Peters

Injection Technology / Injektionstechnik Safe Tunnel Sealing and Stabilisation With a New Hybrid Injection System

26

Sichere Tunnelabdichtung und -stabilisierung mit
neuartigem Hybrid-Injektions-System

*Meik Weickenmeier, Anton Reichert, Harald Schmitt,
Maurice Leise, Stephan Delarue, Roland Herr*

STUVA News / STUVA-Nachrichten

STUVA Conference 2025 in Hamburg

36

STUVA-Tagung 2025 in Hamburg

Youth Forum of the STUVA Conference 2023:

44

Trip Report by Award Winner Fabian Rauch

Junges Forum der STUVA-Tagung 2023: Reisebericht
des Nachwuchspreis-Gewinners Fabian Rauch

**Alfred Haack Honoured for His Life's Work
in Budapest**

47

Alfred Haack erhält Auszeichnung für sein
Lebenswerk in Budapest

**Dr.-Ing. Friedrich Krüger Celebrates His
80th Birthday**

48

Dr.-Ing. Friedrich Krüger feiert seinen 80. Geburtstag

Rubrik / Rubrik

**High-Performance Hybrid Cable for Mining
and Tunnelling**

50

High-Performance Hybrid-Kabel für den Berg- und
Tunnelbau

Dede Bülbül, Alfred F. Hradil

Information / Informationen

Event Calendar / Veranstaltungskalender

52

Imprint / Impressum

53

Safe Tunnel Sealing and Stabilisation With a New Hybrid Injection System

Sichere Tunnelabdichtung und -stabilisierung mit neuartigem Hybrid-Injektions-System

Pre-grouting and securing the tunnel face or the annular gap grouting of the segmental lining: anyone familiar with these challenges will also be familiar with the search for a safe injection process with environmentally friendly and technically mature construction materials, often even under time pressure. One solution could be the hybrid injection system from Webac-Chemie GmbH – a new injection system based on cement and reaction resin with German DIBt approval for groundwater applications.

Dr. MEIK WEICKENMEIER, Managing Director/Geschäftsführer,
Dr. ANTON REICHERT, Authorized Officer/Prokurist,
Dipl.-Ing. HARALD SCHMITT, Technical Manager Tunneling & Waterproofing/Technischer Leiter Tunnelbau & Abdichtungen,
MAURICE LEISE, Sales Representative/Vertriebsbeauftragter,
STEPHAN DELARUE, Application Engineer/Anwendungstechniker,
WEBAC-Chemie GmbH, Barsbüttel/Hamburg, Germany/Deutschland
Dipl.-Ing. ROLAND HERR, International Freelance Journalist/Internationaler Freier Journalist, Wetzlar, Germany/Deutschland

In tunnelling and mining, it is extremely important to be able to work very quickly and safely when reaching a fault zone, in the event of a water ingress or for planned stabilisation and sealing measures. Various methods and different injection agents are available - including those based on cement, ultra-fine binders, sand, bitumen, bentonite, reaction resin and water. Depending on the soil or rock conditions and the situation on site, the advantages and disadvantages must be carefully weighed up when choosing the right method and injection agent. Webac-Chemie GmbH has developed an innovative hybrid injection system (HIS) that combines the properties of cement and reaction resin. Since July 2024, this system is officially approved by the German Institute for Building Technology (DIBt).

1 Injection Systems in Tunnelling

Several injection systems with different materials and compositions have proven themselves for stabilising the rock and sealing against water. These include:

Polyurethane

Polyurethane resins are characterised by fast curing and high strength. The foaming behaviour in contact with water can be adjusted.

Silicate resins

They combine the strength of the mineral components with the elasticity of the organic components.

Vorausinjektionen und die Sicherung der Ortsbrust oder die Ringspaltverpressung der Tübbing-Innenschale: Wer kennt diese Herausforderungen nicht und sucht häufig sogar unter Zeitdruck nach einem sicheren Injektionsverfahren mit umweltverträglichen und technisch ausgereiften Baustoffen? Eine Lösung könnte das Hybrid-Injektions-System der Webac-Chemie GmbH sein – ein neues, auf Zement und Reaktionsharz basiertes Injektionssystem mit DIBt-Zulassung für Anwendungen im Grundwasserbereich.

Im Tunnel- und Bergbau ist es von größter Bedeutung, bei Erreichen einer Störzone, bei einem Wassereintritt oder bei geplanten Stabilisierungs- und Abdichtungsmaßnahmen sehr schnell und sicher arbeiten zu können. Dabei stehen verschiedene Verfahren und unterschiedliche Injektionsmittel zur Verfügung – unter anderem auf Basis von Zement, Feinstbindemittel, Sand, Bitumen, Bentonit, Reaktionsharz und Wasser. Abhängig von den Boden- bzw. Gebirgsverhältnissen und der Situation vor Ort sind bei der Wahl des richtigen Verfahrens und Injektionsmittels die Vor- und Nachteile gründlich abzuwägen. Die Webac-Chemie GmbH hat ein neuartiges Hybrid-Injektions-System (HIS) entwickelt, das die Eigenschaften von Zement und Reaktionsharz miteinander verbindet. Seit Juli 2024 hat dieses System die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt).

1 Injektionssysteme im Tunnelbau

Für die Stabilisierung des Gebirges und Abdichtung gegen Wasser haben sich einige Injektionssysteme mit unterschiedlichen Stoffen und Zusammensetzungen bewährt. Dazu gehören:

Polyurethane

Polyurethanharze zeichnen sich durch schnelle Aushärtung und hohe Festigkeit aus. Das Schaumverhalten bei Wasserkontakt kann eingestellt werden.

Silikatharze

Sie vereinen die Festigkeit der mineralischen Anteile mit der Elastizität der organischen Komponenten.

Acrylate injection gels

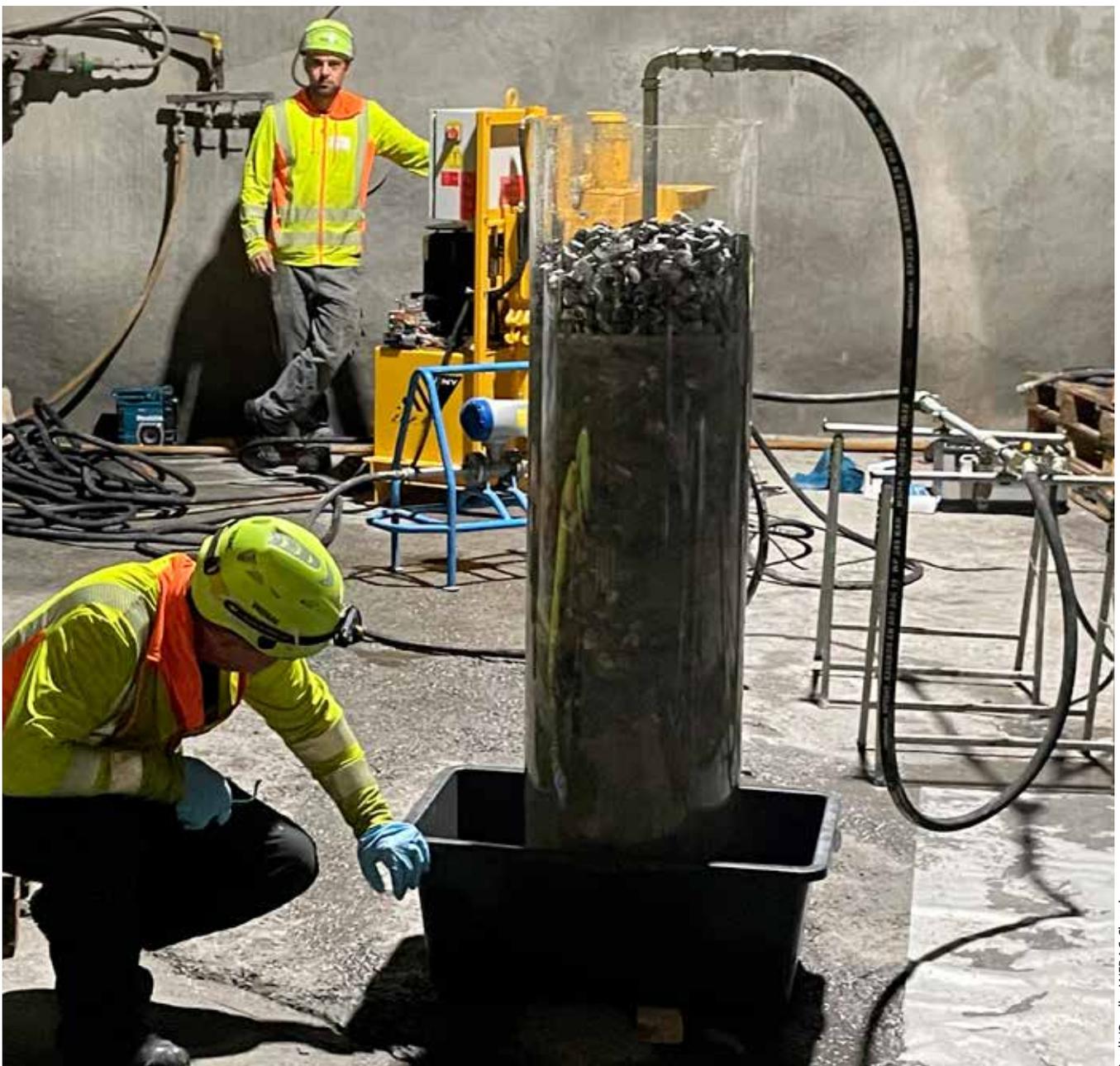
Acrylate injection gels are characterised by low viscosity and high elasticity for sealing and consolidation work in tunnel construction.

These systems can be optimally and individually adapted to the respective application with small quantities of additives, accelerators, foam modulators or retarders. The new hybrid injection system HIS, which combines the advantages of cement and reactive resin in one application, is outlined on the following pages.

Acrylat-Injektionsgele

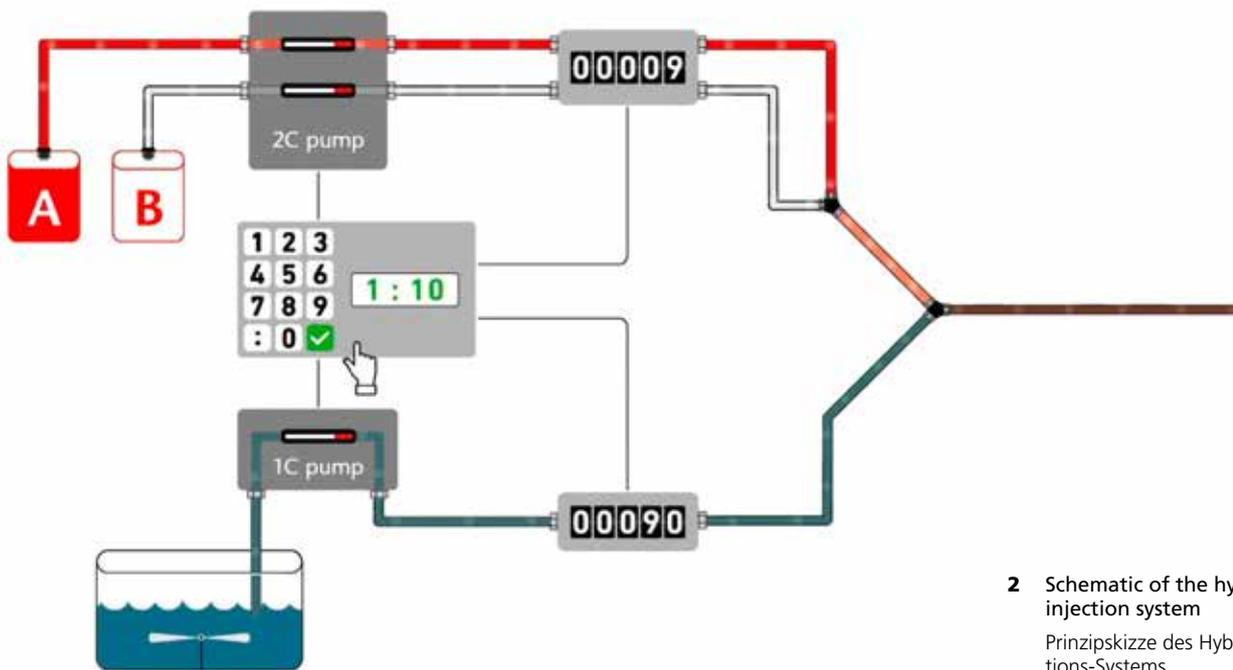
Acrylat-Injektionsgele zeichnen sich durch eine niedrige Viskosität und hohe Elastizität für Abdichtungs- und Verfestigungsarbeiten im Tunnelbau aus.

Diese Systeme lassen sich mit kleinen Mengen an Zusätzen, Beschleunigern, Schaummodulatoren oder Verzögerern optimal und individuell an die jeweilige Anwendung anpassen. Im Folgenden wird das neue Hybrid-Injektions-System (HIS) vorgestellt, das die Vorteile von Zement und Reaktionsharz in einer Anwendung zusammenführt.



Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

1 Application of the innovative hybrid injection system HIS during a presentation in the Hagerbach Test Gallery in Switzerland
Einsatz des neuartigen Hybrid-Injektions-Systems anlässlich einer Präsentation im VersuchsStollen Hagerbach in der Schweiz



Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

2 Schematic of the hybrid injection system

Prinzipskizze des Hybrid-Injektions-Systems

2 Innovative Hybrid Injection System

The new injection system consists of a two-component polyurethane-based resin (PU resin) and a cement suspension. Components A and B of the resin are mixed in equal volume proportions in a two-component pump. The resin is then added to the injection flow of the cement suspension in the respective mixing ratio (5:1 to 10:1 cement suspension to resin by volume). The material is injected through holes drilled through the structural component into the ground and hardens in the saturated and/or unsaturated ground (**Fig. 1**).

HIS is an injection system with a high cement content and is applied, modified with the reactive resin, in a single operation. It accelerates the bonding and hardening of the cement. The strength development of the cement is activated in the early stages thereby preventing wash-out. With these advantages, the hybrid injection system closes the gap between the cost-efficient pure cement injection and the technically highly effective reaction resin application. It can be used in tunnelling and mining for permanent sealing, rock and subsoil stabilisation, cavity filling, anchor bonding, tunnel face and pre-excavation consolidation, umbrella injection and in the event of water ingress.

The system can be adapted to different types of cement (in accordance with DIN EN 197-1 and DIN EN 197-5) using various additives (in accordance with DIN EN 934-2) and for all injection grouting applications. Cement leakage is radically reduced, the leaching of organic or inorganic ingredients is significantly minimised and the

2 Neuartiges Hybrid-Injektions-System

Das neue Injektionssystem besteht aus einem Zweikomponenten-Harz auf Polyurethanbasis (PU-Harz) und einer Zementsuspension. Die Komponenten A und B des Harzes werden zu gleichen Volumenanteilen in einer Zweikomponenten-Pumpe gemischt. Anschließend wird das Harz im jeweiligen Mischungsverhältnis (5:1 bis 10:1 Volumenanteile Zementsuspension + Harz) in den Injektionsstrom der Zementsuspension hinzudosiert. Das Material wird über Bohrungen durch das Bauteil in den Baugrund injiziert und härtet im gesättigten und/oder ungesättigten Boden aus (**Bild 1**).

HIS ist ein Injektionssystem mit hohem Zementanteil und wird, modifiziert mit dem Reaktionsharz, in einem Arbeitsgang angewendet. Es beschleunigt die Verklebung und Erhärtung des Zements. Dabei wird die Festigkeitsentwicklung des Zements in frühen Stadien aktiviert und ein Auswaschen verhindert. Mit diesen Vorteilen schließt das Hybrid-Injektions-System die Lücke zwischen der wirtschaftlichen reinen Zementverpressung und der technisch hochwirksamen Reaktionsharzanwendung. Es kann im Tunnel- und Bergbau eingesetzt werden zur dauerhaften Abdichtung, Gebirgs- und Untergrundstabilisierung, Hohlraumverfüllung, Ankerverklebung, Ortsbrust- und Vorfeldverfestigung, Schirminjektion sowie bei Wassereintritt. Das System lässt sich auf verschiedene Zementsorten (gemäß DIN EN 197-1 und DIN EN 197-5) unter Verwendung verschiedener Zusatzmittel (gemäß DIN EN 934-2) und für alle Anwendungen der Injektionsverpressung anpassen. Der Zementaustritt wird radikal reduziert, die Auswaschung von organischen oder anorganischen Inhaltsstoffen deutlich minimiert und die ökotoxikologische Auswirkung auf Boden und Wasser

ecotoxicological impact on soil and water is reduced on a long-term basis. As HIS can be used with CEM III types, the new system contributes to an improved carbon footprint of the injection work.

3 Functional Principle

All cements available on the construction site can be used. The mixture is prepared according to the requirements of the application and the desired properties, taking into account the w/c ratio and the possible use of superplasticisers, dispersion aids, segregation aids, accelerators or retarders.

The resin is the reactive component in the system for modifying the cement slurry. The two-component material, mixed in a volume ratio of 1:1, is added to the flowing cement slurry. The mixing ratios for the composition of the slurry and the resin are in the range of 10:1 to 5:1 by volume (Fig. 2).

The composite material is homogeneous and comparable in appearance to other modified cement slurries. The mix often leads to a thixotropic behaviour of the cement mortar, so that it thickens when the flow is stopped. The material hardens to a creamy consistency and is no longer washed out by water.

During the development of HIS, various types of cement such as Portland cement, CEM II and CEM III in accordance with DIN EN 197-1 and DIN EN 197-5 as well as various other cements were tested directly from construction sites around the world.

4 Pump Technology

When using the injection system, the familiar machine technology for cement injections can be used. The reaction resin is added via a second supply line with a separate pump and dosing system (Fig. 3).

The reaction resin is metered into the cement slurry injection stream in the desired mixing ratio by a two-component

nachhaltig verringert. Da HIS mit CEM III-Typen verwendet werden kann, trägt das neue System zu einer verbesserten CO₂-Bilanz der Injektionsarbeiten bei.

3 Funktionsprinzip

Alle auf der Baustelle verfügbaren Zemente können verwendet werden. Entsprechend den Anforderungen der Anwendung und den gewünschten Eigenschaften wird die Mischung unter Berücksichtigung des w/z-Werts und möglicher Verwendung von Fließmitteln, Dispersionshilfen, Entmischungshilfen, Beschleunigern oder Verzögerern hergestellt.

Das Harz ist in dem System die reaktive Komponente für die Modifizierung der Zementschlämme. Das im Volumenverhältnis 1:1 gemischte Zweikomponentenmaterial wird der fließenden Zementschlämme zugesetzt. Die Mischungsverhältnisse für die Zusammensetzung der Schlämme und des Harzes liegen nach Volumenanteilen im Bereich von 10:1 bis 5:1 (Bild 2).

Das Verbundmaterial ist homogen und im Aussehen mit anderen modifizierten Zementschlämmen vergleichbar. Der Aufbau führt häufig zu einem thixotropen Verhalten des Zementmörtels, sodass er sich verdickt, wenn der Fluss gestoppt wird. Das Material härtet zu einer cremigen Konsistenz aus und wird von Wasser nicht mehr ausgewaschen.

Bei der Entwicklung von HIS wurden verschiedene Zementsorten wie Portlandzement, CEM II und CEM III gemäß DIN EN 197-1 und DIN EN 197-5 sowie diverse andere Zemente direkt von Baustellen aus der ganzen Welt getestet.

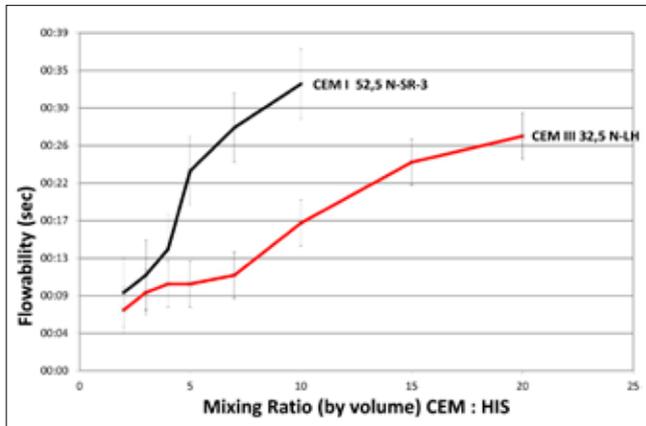
4 Pumpentechnik

Beim Einsatz des Injektionssystems kann die bekannte Maschinenteknik für Zementinjektionen verwendet werden. Über eine zweite Versorgungsleitung mit separater Pumpe und Dosierung wird das Reaktionsharz hinzugefügt (Bild 3).

Das Reaktionsharz wird durch eine Zweikomponenten-Injektionspumpe unter Verwendung eines statischen Mischelementes im gewünschten Mischungsverhältnis in den

3 Pump technology required for the hybrid injection system
Für den Einsatz des Hybrid-Injektions-Systems notwendige Pumpentechnik





Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

4 Reaction time of HIS depending on the mixing ratio
Reaktionszeit von HIS in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis

injection pump using a static mixing element and mixed homogeneously via a mixing tube including a static mixer. The delivery volumes of both pumps should be coordinated so that the planned mixing ratio of cement to reaction resin component can be maintained (5:1 to 10:1 volume parts cement to reaction resin). The strength and in particular the strength development are significantly influenced by the mixing energy and the mixing ratio. In addition, the cement slurry can be adjusted with superplasticisers and dispersants.

During short interruptions in work, the mixing head of the two-component high-pressure injection pump of the HIS can be cleaned with component A of the injection material. During longer interruptions and after completion of the work, the hoses and pistons of this pump are rinsed with a special cleaning agent.

The cement feed pump (piston or worm pump) and the hoses must be emptied after completion of the work. Rinsing with water is necessary until clear water emerges.

5 Research Results

The hybrid injection system accelerates the reaction time of different types of cement. It depends on the compatibility and interaction of the cement used with the resin as well as the mixing ratio between cement and resin. Due to the thixotropic behaviour, the standard methods (spreading dimension, flow behaviour) for characterising the slurries do not work. The following results of the study refer to a laboratory method with visual and qualitative estimation of flowability (**Fig. 4**).

The compressive strength was determined on standard cubes with an edge length of 40x40x160 mm. In order to be able to compare the results with each other, all mixtures were produced in a volume ratio of 5:1 (cement slurry to resin) with a w/c ratio of approximately 0.5. The

Zementslurry-Injektionsstrom zudosiert und über ein Mischrohr inklusive Statikmischer homogen vermischt. Die Förder volumina beider Pumpen sollten aufeinander abgestimmt sein, sodass das geplante Mischungsverhältnis von Zement zu Reaktionsharzkomponente eingehalten werden kann (5:1 bis 10:1 Volumenteile Zement zu Reaktionsharz). Die Festigkeit und insbesondere die Festigkeitsentwicklung werden wesentlich von der Mischenergie und vom Mischungsverhältnis beeinflusst. Zusätzlich kann die Zementslurry mit Fließ- und Dispergiernmitteln eingestellt werden.

Bei kurzen Arbeitsunterbrechungen kann die Reinigung des Mischkopfes der Zweikomponenten-Hochdruckinjektionspumpe des HIS mit der Komponente A des Injektionsmaterials erfolgen. Bei längeren Unterbrechungen und nach Abschluss der Arbeiten werden die Schläuche und Kolben dieser Pumpe mit einem speziellen Reiniger gespült.

Die Zementförderpumpe (Kolben- oder Schneckenpumpe) und die Schläuche sind nach Abschluss der Arbeiten zu entleeren. Eine Spülung mit Wasser ist so lange nötig, bis klares Wasser austritt.

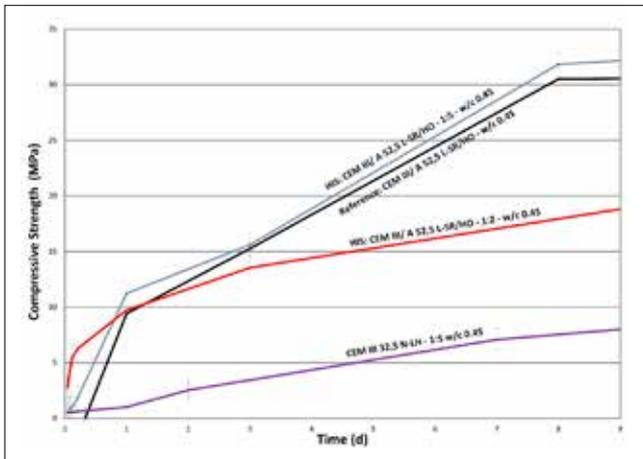
5 Forschungsergebnisse

Mit dem Hybrid-Injektions-System wird die Reaktionszeit verschiedener Zementsorten beschleunigt. Sie hängt von der Kompatibilität und Wechselwirkung des verwendeten Zements mit dem Harz sowie vom Mischungsverhältnis zwischen Zement und Harz ab. Aufgrund des thixotropen Verhaltens funktionieren die Standardmethoden (Ausbreitmaß, Fließverhalten) zur Charakterisierung der Schlämme nicht. Die folgenden Ergebnisse der Studie beziehen sich auf eine Labormethode mit visueller und qualitativer Abschätzung der Fließfähigkeit (**Bild 4**).

Die Druckfestigkeit wurde an Normwürfeln mit 40x40x160 mm Kantenlänge ermittelt. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden alle Mischungen im Volumenverhältnis 5:1 (Zementschlämme zu Harz) mit einem w/z-Wert von etwa 0,5 hergestellt. Die dargestellten Daten beziehen sich auf mindestens drei von maximal sechs Messungen.

Die Druckfestigkeit konnte frühestens nach zwei Tagen und beim CEM I 42,5 R mit der schnellsten Festigkeitsentwicklung nach 24 Stunden ermittelt werden. Langsam verfestigende Zemente, wie ein CEM I 52,5 N-SR3, benötigten einen längeren Zeitraum, um die erforderlicher Frühfestigkeit von Hybrid-Injektions-Systemen zu erreichen (**Bild 5**).

Die HIS-Druckfestigkeit konnte bei einigen Prüfkörpern bereits nach 30 Minuten erzielt werden. Bei einem Volumenverhältnis von 2:1 (Zement zu Harz) wurde bereits innerhalb von zwei Stunden eine Druckfestigkeit von 5 MPa erreicht. Diese schnelle Festigkeitsentwicklung von 5–10 MPa wurde am besten mit einem CEM III erreicht. Die weitere Festigkeitsentwicklung verlangsamte sich, da diese Zemente in der Regel längere Zeiten benötigen, um die Endfestigkeit zu erreichen (**Bild 6**).



Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

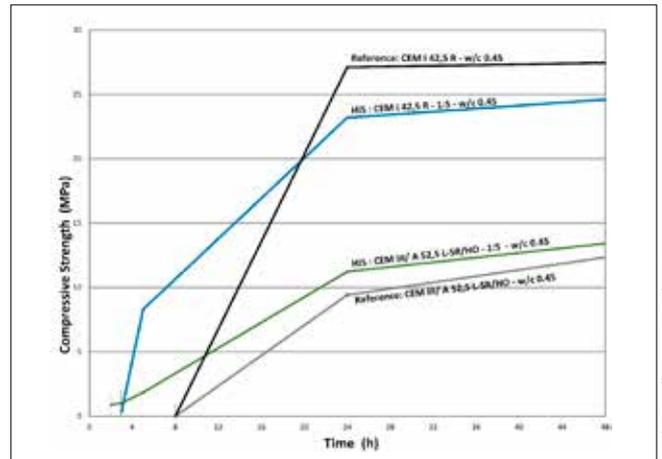
5 Early strength development of HIS using different CEM III cements

Frühfestigkeitsentwicklung von HIS unter Verwendung verschiedener CEM-III-Zemente

data shown refers to at least three of a maximum of six measurements.

The compressive strength could be determined after two days at the earliest and for CEM I 42.5 R with the fastest strength development after 24 hours. Slow-setting cements, such as a CEM I 52.5 N-SR3, needed a longer period of time to achieve the required early strength of hybrid injection systems (Fig. 5).

The HIS compressive strength was achieved in some test specimens after just 30 minutes. With a volume ratio of 2:1 (cement to resin), a compressive strength of 5 MPa was achieved within just two hours. This rapid strength development of 5–10 MPa was best achieved with a CEM III. The further strength development slowed down, as these cements generally require longer times to reach the final strength (Fig. 6).



Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

6 Compressive strength development of different CEM I and CEM III cements in comparison

Druckfestigkeitsentwicklungen unterschiedlicher CEM-I- und CEM-III-Zemente im Vergleich

Die entscheidenden Vorteile des Hybrid-Injektions-Systems liegen im Einfluss des Harzes bei der Frühfestigkeit und des Zements bei der Langzeiterhärtung. Dabei hat der Harzanteil in der Zementmatrix eine verdünnende Wirkung auf das System und senkt die endgültige Druckfestigkeit. Bei der Biegezugfestigkeit sind ähnliche Effekte festzustellen; allerdings weisen die Proben des Hybrid-Injektions-Systems eine höhere Biegezugfestigkeit auf als der reine Zement.

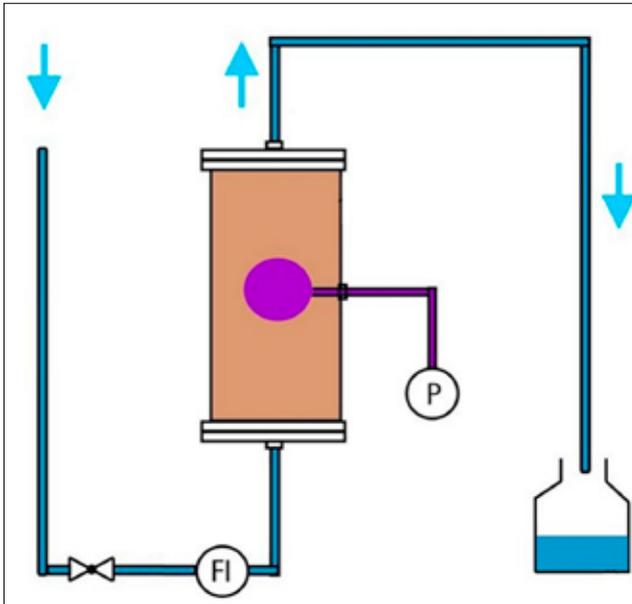
6 Umweltverträglichkeit

Injektionssysteme wie das HIS kommen stets mit Boden und Wasser in Kontakt, und es werden daher hohe Maßstäbe an deren Umweltverträglichkeit angelegt. Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) bescheinigt die problemlose Anwendung des Injektionsverfahrens und hält die Rahmenbedingungen dafür fest.

Companies & products

Present your company and your products here and benefit from excellent value for money!

Present your company and your products here and benefit from excellent value for money!



7 HIS column test according to DIN 19631
HIS-Säulenversuch nach DIN 19631

Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

The decisive advantages of the hybrid injection system relate to the influence of the resin on early strength and the cement on long-term hardening. The resin content in the cement matrix has a thinning effect on the system and reduces the final compressive strength. Similar effects can be seen in the flexural tensile strength; however, the samples of the hybrid injection system have a higher flexural tensile strength than the pure cement.

6 Environmental Compatibility

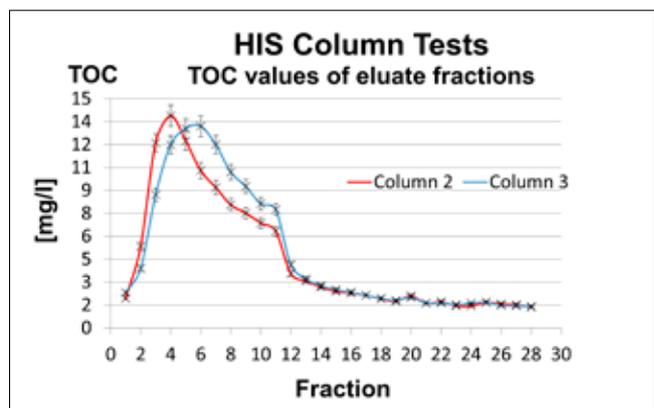
Injection systems such as HIS always come into contact with soil and water, and high standards are therefore applied to their environmental compatibility. The general building authority approval of the German Institute for Building Technology (DIBt) certifies the safe use of the injection process and specifies its framework conditions.

The analysis is based on the column test in accordance with DIN 19631. The test material is injected into a test specimen filled with sand, perpendicular to the water flow (Fig. 7a+b). During the hardening process, the water flows around the sand body and leachable/rinsable components are collected in the sampling bottle. For comparison purposes, equal quantities of injection material of the pure resin, the pure cement suspension and two HIS mixtures with a cement/resin ratio of 2:1 (HIS with high resin content) and 10:1 (HIS with low resin content) were injected into the column. For the test, an injection suspension of CEM I 42.5 R (w/c ratio 0.45) with 0.1 % superplasticiser and the resin in a mixing ratio of 5:1 by volume was used.

The eluates are analysed for parameters such as pH and TOC value (total organic carbon). Figure 8 shows the

Die Untersuchung basiert auf dem Säulenversuch nach DIN 19631. Das Prüfmaterial wird in einen mit Sand gefüllten Probekörper senkrecht zum Wasserstrom injiziert (Bild 7a+b). Während des Erhärtungsprozesses umströmt das Wasser den Sandkörper und auswaschbare/ausspülbare Bestandteile werden in die Probenahmeflasche aufgenommen. Um einen Vergleich anstellen zu können, wurden gleiche Mengen Injektionsmaterial des reinen Harzes, der reinen Zementsuspension und zwei HIS-Mischungen mit einem Zement/Harz-Verhältnis von 2:1 (HIS mit hohem Harzgehalt) und 10:1 (HIS mit niedrigem Harzgehalt) in die Säule injiziert. Für den Versuch wurde eine Injektionssuspension aus CEM I 42,5 R (w/z-Wert 0,45) mit 0,1 % Fließmittel und dem Harz im Mischungsverhältnis 5:1 nach Volumen verwendet.

Die Eluate werden auf Parameter wie pH- und TOC-Wert (Total Organic Carbon/gesamter organischer Kohlenstoff) untersucht. In Bild 8 sind die Maximalwerte des TOC-Werts für weitere Untersuchungen, insbesondere ökotoxikologische Tests,



8 TOC values of the eluate fractions from the HIS column test
TOC-Werte der Eluatfraktionen aus dem HIS-Säulenversuch

Credit/Quelle: WEBAC-Chemie

maximum TOC values for further tests, in particular ecotoxicological tests, special tests for aromatic amines and heavy metal analyses according to the cementitious base. In this early consolidation phase, additives from cementitious slurries are usually washed out to a large extent. Webac HIS, on the other hand, is only eluted in very small quantities of less than 15 mg/l (**Fig. 8**). In comparison, injection gels containing acrylate, which are frequently used for curtain injections, achieve maximum TOC values of 430 to 1250 mg/l.

The ecotoxicological tests also revealed only minor effects on biological systems such as algae or daphnia (water fleas) and no effects in further tests with maximum organic exposure and in the decay phase. The content of heavy metals in the eluates was determined using AAS (atomic absorption spectrometry) and ICP (optical emission spectrometry) methods. With the exception of chromium, all values are well below the impact limit values stipulated by the Federal/State Working Group on Water (LAWA) and therefore clearly fulfil the requirements of the Drinking Water Ordinance in Germany. Further

spezielle Tests auf aromatische Amine und Schwermetallanalysen entsprechend der zementhaltigen Basis dargestellt.

In dieser frühen Konsolidierungsphase werden Zusatzstoffe aus zementhaltigen Schlämmen in der Regel in großem Umfang ausgewaschen. Webac HIS dagegen wird in nur sehr geringen Mengen von weniger als 15 mg/l (**Bild 8**) eluiert. Im Vergleich dazu erreichen acrylathaltige Injektionsgele, die häufig bei Vorhanginjektionen eingesetzt werden, TOC-Maximalwerte von 430 bis 1250 mg/l.

Im Rahmen der ökotoxikologischen Versuche wurden außerdem nur geringe Auswirkungen auf biologische Systeme wie Algen oder Daphnien (Wasserflöhe) und keine Auswirkungen bei weiteren Versuchen mit maximaler organischer Belastung sowie in der Abklingphase festgestellt. Der Gehalt an Schwermetallen in den Eluaten wurde mit AAS- (Atomabsorptionsspektrometrie) und ICP-Methoden (optische Emissionsspektrometrie) bestimmt. Bis auf Chrom liegen alle Werte deutlich unter den von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) geforderten Wirkungsgrenzwerten und erfüllen somit klar die Anforderungen der Trinkwasserverordnung in Deutschland. Weitere Untersuchungen mit dem dynamischen

investigations using the dynamic surface leaching test in accordance with DIN CEN/TS 16637-2 with annelid worm species (*Enchytraeus albidus*) record the effect of pure eluates and clearly confirm the low impact on higher biological species.

The best results are achieved with CEM II or CEM III cements (in accordance with EN 197-1). It is also undisputed that the frequently used Portland cement has the greatest negative impact regarding the carbon footprint for cement.

With a Portland cement clinker content of 65 to 79 % for CEM II/B or 20 to 34 % for CEM III/B and the addition of granulated blast furnace slag, the carbon footprint is up to three times better than with pure Portland cement. The strength, in particular the early strength, is achieved by adding the reaction resin. It is classified according to EN 15804 in terms of its contribution to the system's carbon footprint. Reduced material consumption due to the faster reaction, less leaching and less waste also contribute to an environmentally friendly application of the hybrid injection system.

In the tests on the short and long-term elution behaviour of the HIS, it was demonstrated that both the cementitious component and the reactive resin component can be used safely and in an environmentally friendly manner.

7 Conclusion

Webac's hybrid injection system combines the mechanical strength of cement and the rapid curing properties of reactive resins. Small quantities of resin lead to the desired success with the types of cement normally used on construction sites. Compared to pure cement, it leads to a faster reaction and early development of the strength parameters, especially with CEM III types. Webac's HIS therefore fulfils an important requirement for reliable injection grouting. The spectrum of applications ranges from sealing against water ingress, stabilising the tunnel face and umbrella injections during TBM tunnelling to stabilising washed-out soil and excavated rock areas and fault zones all the way to annular gap grouting behind the segmental lining.

The early strength properties lead to effective application with small quantities of material and short interruptions to the work process. This is a great advantage for construction companies and workers. The optimised use of CEM III is significantly more cost-effective and reduces the impact on the environment. These cements are cheaper, contain lower proportions of Portland cement clinker and therefore have a significantly lower carbon footprint for grouting applications in tunnelling and mining.

Oberflächenauswaschungstest nach DIN CEN/TS 16637-2 mit Ringelwurmart (*Enchytraeus albidus*) erfassen die Wirkung von Rein-Eluaten und bestätigen eindeutig die geringen Auswirkungen auf höhere biologische Arten.

Die besten Ergebnisse werden mit den Zementen CEM II oder CEM III (gemäß EN 197-1) erreicht. Unbestritten ist auch, dass der häufig verwendete Portlandzement bei der Betrachtung des CO₂-Fußabdrucks den größten negativen Einfluss auf der Zementseite hat.

Bei einem Portlandzementklinker-Anteil von 65 bis 79 % bei CEM II/B bzw. 20 bis 34 % bei CEM III/B und dem Zusatz von Hüttensand ist die CO₂-Bilanz bis zu dreimal besser als bei reinem Portlandzement. Die Festigkeit, insbesondere die Frühfestigkeit, wird durch Zusatz des Reaktionsharzes erreicht. Es ist gemäß EN 15804 hinsichtlich seines Beitrags zum CO₂-Fußabdruck des Systems klassifiziert. Reduzierter Materialverbrauch aufgrund der schnelleren Reaktion, geringere Auswaschungen und weniger Abfälle tragen zusätzlich zu einer umweltfreundlichen Anwendung des Hybrid-Injektions-Systems bei.

In den Versuchen zum kurz- und langfristigen Elutionsverhalten des HIS wurde nachgewiesen, dass sowohl der zementhaltige Anteil als auch der Reaktionsharzanteil unbedenklich und umweltverträglich eingesetzt werden kann.

7 Fazit

Das Hybrid-Injektions-System von Webac kombiniert die mechanische Festigkeit von Zement und die schnellen Aushärtungseigenschaften von Reaktionsharzen. Geringe Mengen Harz führen dabei mit den bisher auf der Baustelle verwendeten Zementsorten zum gewünschten Erfolg. Es führt im Vergleich zu reinem Zement zu einer schnelleren Reaktion und frühzeitigen Entwicklung der Festigkeitsparameter, insbesondere bei CEM-III-Typen. Damit erfüllt Webacs HIS eine wichtige Voraussetzung für eine sichere Injektionsverpressung. Das Anwendungsspektrum reicht dabei etwa von der Abdichtung gegen Wassereintritt, der Stabilisierung der Ortsbrust und Schirminjektion beim TBM-Vortrieb über die Stabilisierung von ausgespülten Erd- und ausgebrochenen Felsbereichen sowie Störzonen bis hin zu Ringspaltverpressungen hinter der Tübbing-Innenschale.

Die frühen Festigkeitseigenschaften führen zu einer effektiven Anwendung mit geringen Materialmengen und kurzen Unterbrechungen des Arbeitsablaufs. Dies ist von großem Vorteil für Bauunternehmen und Verarbeiter. Dabei ist die optimierte Verwendung von CEM III deutlich wirtschaftlicher und entlastet die Umwelt. Diese Zemente sind preiswerter, enthalten geringere Portlandzementklinker-Anteile und weisen daher einen deutlich geringeren CO₂-Fußabdruck für Injektionsanwendungen im Tunnel- und Bergbau auf.