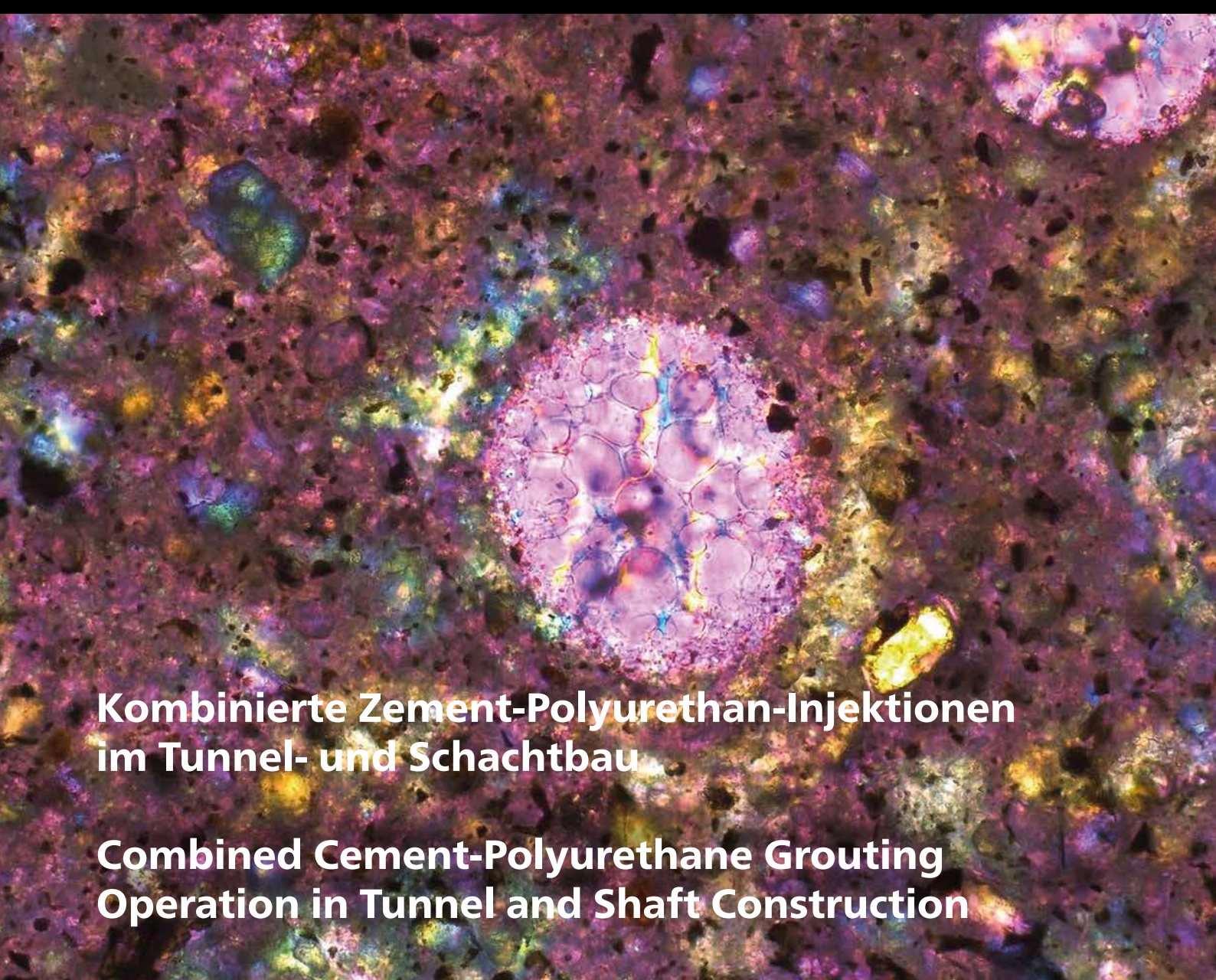




Pioniere der Bauabdichtung

A microscopic image showing a cross-section of a material, likely concrete or rock, with a central area of grout injection. The grout is a light, porous material, and the surrounding material is darker and more textured. The image is used as a background for the text.

**Kombinierte Zement-Polyurethan-Injektionen
im Tunnel- und Schachtbau**

**Combined Cement-Polyurethane Grouting
Operation in Tunnel and Shaft Construction**

**Rascor International AG
Gewerbestrasse 4
CH-8162 Steinmaur
Schweiz/Switzerland**

**+41 44 857 11 11
sales@rascor.com
www.rascor.com**

Pioniere der Bauabdichtung

rascor®

RASCOhybrid HMS317 Polyurethan im Verbund mit Zement – zusammen erfolgreich gegen Druckwasser!

- **Regulierbare Viskosität**
- **Flexible Reaktionszeit**
- **Gute Penetration des Baugrundes**
- **Hohe Wirtschaftlichkeit**

Rascor International AG
Gewerbstrasse 4
CH-8162 Steinmaur
Schweiz
sales@rascor.com
+41 44 857 11 11

Rascor Construction Chemicals GmbH
Ratsgasse 6
DE-97688 Bad Kissingen
Deutschland
badkissingen@rascor.com
+49 971 130 27 38



Combined Cement-Polyurethane Grouting Operations in Tunnel and Shaft Construction

Kombinierte Zement-Polyurethan-Injektionen im Tunnel- und Schachtbau

Cement-based or chemical grouting materials are the foremost choice to seal water-bearing areas in subsoil or rock efficiently. Anti-wash out resistant cement-based grout mixes and water-reactive grouting materials based on polyurethane are the preferred material for pre-excitation grouting. However, adequate equipment and material technology nowadays enable controlled processing of combined cement-polyurethane grout mixes, which withholds the benefits of both materials types.

Um wasserführende Bereiche im Baugrund effizient abzudichten, werden im Tunnel- und Schachtbau zementbasierte oder chemische Injektionsstoffe eingesetzt, die unter Druck in das Gebirge eingepresst werden. Für vorausseilende Injektionen kommen bevorzugt auswaschresistente zementgebundene Suspensionen bzw. wasserreaktive Injektionsstoffe auf Polyurethanbasis zur Anwendung. Der Einsatz einer entsprechenden Maschinen- und Gerätetechnik macht hier nun auch eine kontrollierte Verarbeitung von kombinierten Zement-Polyurethan-Suspensionen möglich.

HELMUT WANNENMACHER, Implenia Österreich GmbH, Salzburg, Austria/Österreich
Dr. THORSTEN KRATZ, Thyssen Schachtbau GmbH, Mülheim an der Ruhr, Germany/Deutschland
SVEND PASSMANN, Thyssen Schachtbau GmbH, Mülheim an der Ruhr, Germany/Deutschland
NORBU LIEBETRAU, Rascor International AG, Steinmaur, Switzerland/Schweiz

Introduction

Excavation of water-bearing formations in tunnelling and shaft construction can lead to short- or even long-term water and material ingress, with sometimes significant effects on structures and the environment [1–3]. Grouting works have proven to be efficient for sealing or consolidating the ground [4–6]. Cement-based or chemical grouting materials are injected into the surrounding ground under pressure to close existing water flow paths.

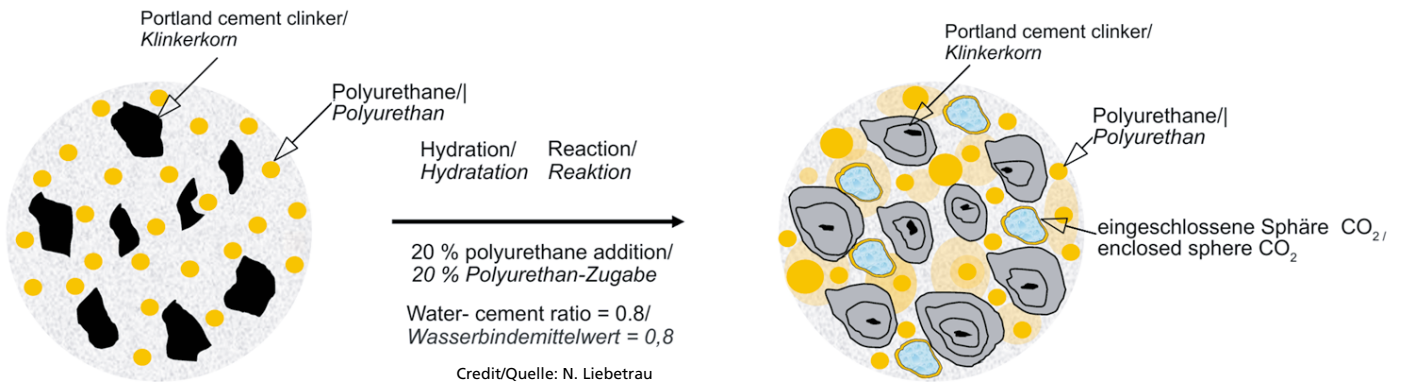
Einleitung

Die Durchörterung von wasserführenden Bereichen im Tunnel- und Schachtbau kann zu kurzfristigen wie auch langanhaltenden Wasser- und Materialeinbrüchen führen, mit teils signifikanten Einflüssen auf Bauwerk und Umwelt [1–3]. Die Ausführung von Abdichtungsmaßnahmen mittels Injektionen hat sich als effiziente Methode zur Abdichtung und Konsolidierung des Baugrundes erwiesen [4–6]. Hierzu werden zementbasierte oder chemische Injektionsstoffe unter Druck in das Gebirge eingepresst, um bestehende Fließwege zu verschließen. Vorab durchgeführte Injektionen im auszubrechenden Gebirge



1 Free discharge of standard cement suspension (left), free discharge of a combined cement-polyurethane suspension (right)
Freier Auslauf von Standard-Zement-Suspension (links), freier Auslauf einer kombinierten Zement-Polyurethan-Suspension (rechts)

Credit/Quelle: N. Liebetrau

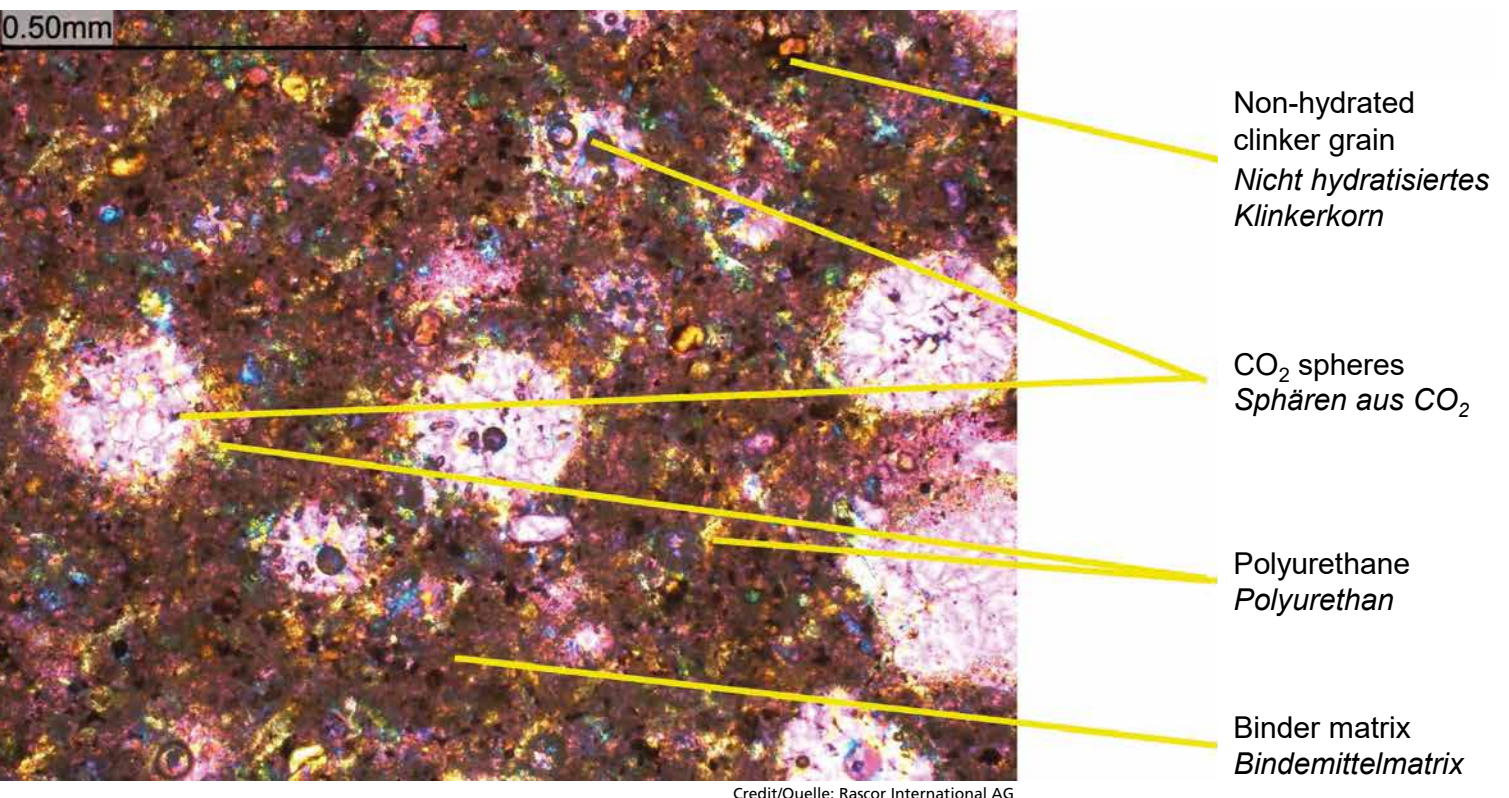


2 Schematic representation of the hydration phase of a combined cement-polyurethane suspension (based on Bayer, 1989)

Schematische Darstellung der Hydratationsphase einer kombinierten Zement-Polyurethan-Suspensionen (in Anlehnung an Bayer, 1989)

3 Microscopic image (polarisation image) of a combined cement-polyurethane suspension

Mikroskopische Darstellung (Polarisationsdarstellung) einer kombinierten Zement-Polyurethan Suspension



Injection measures carried out in advance are defined as pre-excavation grouting measures. Works within the immediate excavation or the supported area are classified as post grouting works [7]. Pre-excavation grouting measures utilise the advantage of non-flowing groundwater, provided that a minimum distance to the water-bearing zone is maintained. Conditions with significant groundwater pressure, challenge pre-excavation grouting works in terms of the drilling method, since the full or partially groundwater pressure must be relieved through the borehole itself. Post grouting work often involves a complex approach with active drainage measures, sectioning of grouting areas and multiple grouting rounds. The use of anti-washout cement-based grout mixes [8, 9] or water-reactive polyurethane-based grouting materials [10] has proven indispensable for the excavation progress without significantly influencing the groundwater table and without delay. However, the combination of the two entirely different product groups [11] could not be implemented until now. The usage of appropriate machinery and equipment enables the combination of cement-polyurethane grout mixes in tunnelling and shaft construction.

Stabilising Additives for Grouting

The essential prerequisite for successful grouting in groundwater is based on the postulation of stable grout mixes in contact with water and the calibration of an appropriate reaction time to prevent cement grout mixes or chemical grouting agent from dispensing in solution. The control of wash-out effects in a highly permeable ground, facing high flow rates. (e.g. lateral infiltration to the excavation area or other grouting holes) challenges the execution of the work. First experiences in handling stabilised, cement-bound grouting agents were gained with water glass (Joosten method) or bitumen emulsions by the middle of the twentieth century. However, the grouting works were always carried out under high pressure (> 100 bar) with sufficient rock overburden and without consideration of claquages [12]. The processing of chemical grouting materials based on polyurethane (PU) enabled a significant improvement in a sustainable and environmentally friendly application. However, the consideration of PU is mainly restricted to severe events due to comparable high costs [13].

The individual use of fast-reacting PU foams enables the creation of a growing plug in the immediate area. The application range of cement-based grout mixes for grouting works could even be extended with the ongoing development of underwater concrete and the necessary stabilising additives (Anti-Washout Agents "AWA") [9]. The admixture of corresponding additives for the

werden als vorausseilende Injektionen definiert. Injektionen im unmittelbaren Ausbruchsbereich oder im gesicherten Bereich werden als nachträgliche Injektionen klassifiziert [7]. Die vorausseilende Injektion erlaubt bei Einhaltung eines Mindestabstands zur wasserführenden Zone eine direkte Injektion im stehenden Grundwasser. Speziell bei signifikanten Bergwasserdrücken stellen vorausseilende Injektionen hohe Anforderungen an das Bohrverfahren, da zumeist der volle oder zumindest ein anteilmäßiger Bergwasserdruck durch die Bohrung selbst abgebaut werden muss. Nachinjektionen beinhalten häufig eine komplexe Herangehensweise mit aktiven Drainagemaßnahmen, Sektionierungen von Injektionsbereichen und gezielten mehrstufigen Injektionen. Für die Fortführung eines Tunnelvortriebs ohne maßgebliche Beeinflussung des Grundwasserstocks und ohne zeitliche Verzögerung hat sich der Einsatz von auswaschresistenten zementgebundenen Suspensionen [8, 9] bzw. der Einsatz von wasserreaktiven Injektionsstoffen auf Polyurethanbasis [10] als unerlässlich herausgestellt. Eine Verschneidung der unterschiedlichen Produktgruppen konnte aufgrund von maschinentechnischen Einschränkungen bis dato nicht gänzlich umgesetzt werden [11]. Unter Verwendung einer entsprechenden Maschinen- und Gerätetechnik wurde eine kontrollierte Verarbeitung von kombinierten Zement-Polyurethansuspensionen im Tunnel- und Schachtbau nun realisiert.

Stabilisierende Zusätze für Injektionen

Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Injektion im Grundwasser ist die Herstellung einer stabilen Suspension für zementgebundene Injektionsmittel bei Kontakt mit Wasser und die Einstellung der entsprechenden Reaktionszeit, um das Auswaschen einer Zementsuspension bzw. eines chemischen Injektionsmittels zu verhindern. Die Kontrolle des Auswaschens in einem stark durchlässigen Baugrund (z. B. Umläufigkeiten zum Ausbruchsbereich oder zu anderen Injektionsbohrlöchern) stellt vor allem bei hohen Fließraten eine hohe Anforderung an die Ausführung dar. Erste Erfahrungen im Umgang mit stabilisierten, zementgebundenen Injektionsmitteln konnten mit Wasserglas (Joosten-Verfahren) oder Bitumenemulsionen bereits zur Mitte des letzten Jahrhunderts erzielt werden. Die Injektionen wurden hierbei bei ausreichender Gebirgsüberlagerung immer unter hohem Druck ausgeführt (> 100 bar), ohne Rücksichtnahme auf Claquagen [12]. Mit fortschreitender Entwicklung der chemischen Injektionsstoffen auf Polyurethan-Basis (PU) wurde ein wesentlicher Fortschritt hinsichtlich eines nachhaltigen und umweltfreundlichen Einsatzes erzielt. Jedoch war und ist die Verwendung aus wirtschaftlichen Gründen häufig auf schwierige Havariefälle begrenzt [13].

Der gesonderte Einsatz von schnell reagierenden PU-Schäumen ermöglicht die Erzeugung eines Pfropfens im unmittelbaren Austrittsbereich. Mit der Entwicklung von Unterwasserbetonen und der nötigen Stabilisierungszusätzen (Anti-Washout Agents „AWA“) konnten die Einsatzgrenzen von Zementsuspensionen

cement-based grout mix is generally very low (0.5–3 %). Therefore, it requires an additional dosing pump, suitable to pump the additives at this low percentage to integrate the additives and to guarantee homogeneity and continuity of the grout mix. A reduction of the AWA content for improved workability comes at the expense of stability [8]. The addition of AWA to a cement slurry leads to the formation of long polymer chains, which results in a substantial increase in viscosity. As a consequence, the workability of the cement grout mix is limited to a few minutes. For this reason, AWA is only added via a valve at the borehole to reduce the potential risk of blockages in the grout line.

Based on existing considerations and preliminary trials towards the addition of polyurethane, a system allowing for an infinitely variable integration was developed. The specifications for processing the grout mix are a bleeding rate of 0% of the mixture, a processing time between 5 and 45 minutes (depending on the polyurethane

für Injektionen wiederum erweitert werden [9]. Die Beimischung entsprechender Zusätze mit meist geringer Dosierung (0,5–3 %) zu einer Zementsuspension erfordert den Einsatz speziellen zusätzlicher Dosierpumpen, um die Homogenität und kontinuierliche gleichmäßige Dosierung zu gewährleisten. Eine Reduktion des AWA-Gehaltes für eine verbesserte Verarbeitbarkeit geht zu Lasten der Stabilität [8]. Die Beimischung von AWA zu einer Zementsuspension führt zur Bildung langstieliger Polymerketten, die zu einer starken Erhöhung der Viskosität führen. Die Verarbeitbarkeit der Zementsuspension wird hierbei auf wenige Minuten begrenzt. Daher erfolgt die Zugabe von AWA erst am Bohrloch über eine Injektionsweiche, um ein potenzielles Risiko für Stopfer in der Injektionsleitung zu mindern.

Basierend auf bestehenden Überlegungen und Versuchen zur Beigabe von Polyurethanen wurde eine Systematik zur stufenlosen PU-Integration entwickelt. Die Vorgaben für die Verarbeitung der Suspension sind ein Absetzmaß von 0 % des Gemisches, eine Verarbeitungsdauer zwischen 5 und 45 Minuten



rascor®

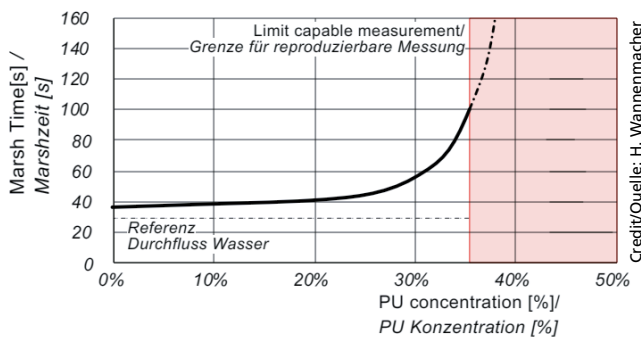
RASCOhybrid HMS317 Hybrid mortar system – Great flexibility and strength combined!

- Adjustable viscosity
- Flexible reaction time
- Good penetration of the substrate
- High economic efficiency

Rascor International Ltd
Gewerbestrasse 4
CH-8162 Steinmaur
Switzerland
sales@rascor.com
+41 44 857 11 11

Rascor Construction Chemicals GmbH
Ratsgasse 6
DE-97688 Bad Kissingen
Germany
badkissingen@rascor.com
+49 971 130 27 38





4 Influence of PU concentration on the Marsh funnel time
Einfluss der PU-Konzentration auf die Marshzeit

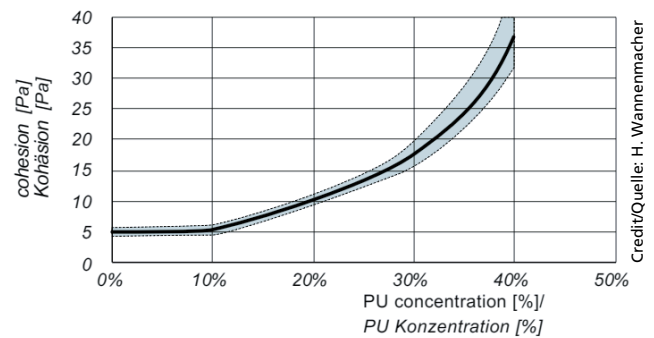
concentration) and standard equipment, except for the controls for the different units.

Reaction Characteristics of Combined Cement-Polyurethane Grout Mixes

Polyurethanes are synthetic materials that have been used in grouting technology since about 1960 [14, 15]. The two-component polyurethane is formed by an exothermic polyaddition reaction of polyol (A-component) and isocyanate (B-component). In the presence of water, carbon dioxide and urea are formed in combination with the isocyanate as a side reaction. As a result, the carbon dioxide is formed directly in the polyurethane structure and causes the polyurethane to expand. The PU withholds considerable high importance for grouting works due to their diversity and expanding material behaviour. Cement refers to the inorganic binders and consist of cement clinker, blast furnace slag (only in blast furnace cement) and sulphate. When the cement reacts with the mixing water, a water-containing plastic compound (cement paste) is formed. Primary solidification occurs during the hydration phase, creating a basic initial structure and a final hardening [16].

When polyurethane is added to a cement grouting mix, the polyurea dehydrates the water from the cement paste. The reduction of the water and heat generation by the proportion of PU acts as an accelerator and thickener on the cement grout mix. The reaction acceleration causes a shorter hydration phase and leads to a stabilising effect on the combined cement-PU grouting mix at the same time.

The PU is embedded in the cement grouting mix during the hydration phase and forms an initial structure due to the progressive polyaddition reaction, which stabilises the wash-out effects of the grouting mix. The quality of the combined products is the adequate dispersion and homogenisation of the initial products during the mixing process. **Figure 2** schematically shows the emplacement of PU within the cement paste.



5 Influence of PU concentration on cohesion
Einfluss der PU-Konzentration auf die Kohäsion

(in Abhängigkeit von der Polyurethan-Konzentration) und die Verwendung von Standardequipment, mit Ausnahme der Steuerung der unterschiedlichen Einheiten.

Die Reaktionsweise von kombinierten Zement-Polyurethan-Suspensionen

Polyurethane sind Kunststoffe, die in der Injektionstechnik seit ca. 1960 eingesetzt werden [14, 15]. Das Zwei-Komponenten Polyurethan wird durch eine exotherme Polyadditionsreaktion von Polyol (A-Komponente) und Isocyanat (B-Komponente) gebildet. Im Beisein von Wasser bildet sich in Kombination mit dem Isocyanat als eine Nebenreaktion Kohlendioxid und Harnstoff. Das Kohlendioxid entsteht direkt im Polyurethan-Gefüge und bewirkt ein Schäumen des Polyurethans. Für die Injektionstechnik haben die PU-Schäume aufgrund ihrer Vielfalt und der expandierenden Eigenschaft einen hohen Stellenwert. Zemente gehören zu den anorganischen Bindemitteln und bestehen im Wesentlichen aus Zementklinker, Hüttensand (nur im Falle des Hochofenzementes) und Sulfatträger. Als Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser entsteht eine wasserhaltige plastische Verbindung (Zementleim). Während der Hydrationsphasen kommt es zu einer Erstarrung, zur Bildung eines Grundgefüges und letztendlich zur vollständigen Erhärtung [16].

Bei der Zugabe eines Polyurethans zu einer Zementsuspension entzieht der Polyharnstoff dem Zementleim einen Teil des Wassers. Die Reduktion des Wassers und die Wärmebildung durch den Anteil des PUs wirken als Beschleuniger und Verdicker auf die Zementsuspension. Die Reaktionsbeschleunigung bewirkt eine kürzere Hydrationsphase und führt gleichzeitig zu einer stabilisierenden Wirkung auf die kombinierte Zement-PU-Suspension. Das PU lagert sich in der Hydrationsphase in der Zementsuspension ein und bildet durch die fortschreitende Polyadditionsreaktion ein frühzeitiges Gerüst aus, welches sich stabilisierend auf ein Auswaschen der Suspension auswirkt. Wesentlich für diesen Prozess ist die ausreichende Dispergierung und Homogenisierung der Ausgangsprodukte während des Mischprozesses. **Bild 2** zeigt schematisch die Einlagerung des PU in den Zementleim.

Figure 3 shows a microscopic representation of the spheres of polyurethane, the porous structures formed by the CO₂ and clinker grains. The size of the spheres is related to the added amount of polyurethane. As a reaction of the polyurea with water, the chemical gas formation influences the size of the spheres.

Properties of a Combined Cement-Polyurethane Grout Mix

Grouting within a high water-bearing zone requires low water–binder (w/b) ratios. Combined polyurethane/cement grout mixes show good applicability concerning mixing with w/b ratios in the range of 0.6 to 0.9 [-]. Following the comparatively highly viscous character of the grout mix, the workability and the resistance to washing out are the crucial factors in determining the properties. For this purpose, site and laboratory tests were carried out using standard equipment (Marsh funnel, filter press and plate viscometer, according to Lombardi). The tests to determine the rheological and mechanical properties were carried out with a w/b ratio of 0.8. The polyurethane was also with 0, 10, 20, 30 and 40 vol.% (**Fig. 4**).

Determination of Workability – Flowability

The Marsh funnel allows for a rapid determination of the rheological properties of a grout mix[17]. The determination of the Marsh time was carried out utilising a Marsh funnel with an inner diameter of 4.76 mm of the outlet tube[18]. The flow properties of the combined cement-polyurethane grout mix show only a slight increase in Marsh funnel time (approx. 4–5 seconds) up to an initial concentration of approx. 25 %. With increasing PU concentration, however, the Marsh funnel time of a combined cement-polyurethane grout mix increases significantly. Limitations of the machine technology currently allow for a processability of a concentration of approximately 35 %. Anyhow, the risk of blockages in standard grouting lines becomes apparent when the concentration exceeds 30 %.

Bild 3 zeigt eine mikroskopische Darstellung der Sphären aus Polyurethan, CO₂ und der Klinkerkörner. Die Größe der Sphären zeigt hierbei eine klare Abhängigkeit zur Zugabemenge des Polyurethans. Die Gasbildung als Reaktion des Polyharnstoffs mit dem Wasser beeinflusst die Größe der Sphären.

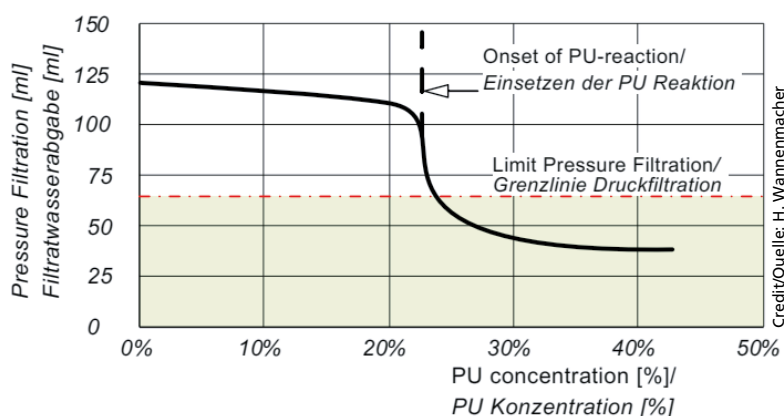
Eigenschaften einer kombinierten Zement-Polyurethan-Suspension

Die Injektion in stark wasserführenden Zonen bedingt die Anwendung von geringen Wasserbindemittel-Werten (W/B-Werten). Kombinierte Polyurethan/Zementsuspensionen zeigen eine gute Anwendbarkeit hinsichtlich der Vermischung mit W/B-Werten im Bereich von 0,6 bis 0,9 [-]. Entsprechend des vergleichsweise hochviskosen Charakters der Suspension, steht bei der Ermittlung der Eigenschaften vor allem die Verarbeitbarkeit und die Resistenz gegen ein Auswaschen im Vordergrund.

Hierzu wurden Baustellenversuche und Versuche im Labor mittels Standardgerätschaften (Marshtrichter, Filterpresse und Plattenviskosimeter nach Lombardi) ausgeführt. Die Versuche für die Bestimmung der rheologischen und mechanischen Eigenschaften wurden allesamt mit einem W/B-Wert von 0,8 [-] ausgeführt. Die Beigabe des Polyurethananteils wurde mit 0, 10, 20, 30 und 40 Vol.-% variiert (**Bild 4**).

Bestimmung der Verarbeitbarkeit – Fließfähigkeit

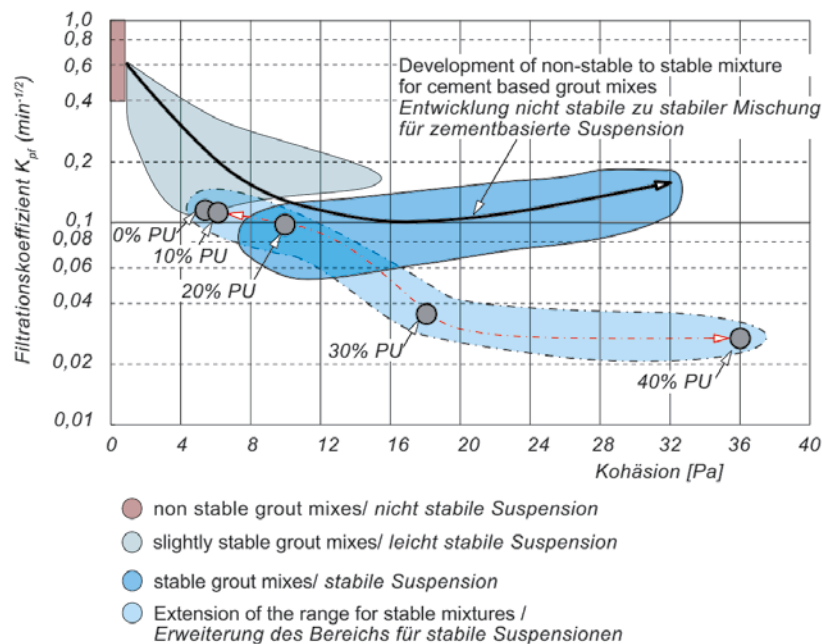
Der Auslaufversuch mittels Marshtrichter erlaubt eine rasche Bestimmung der rheologischen Eigenschaften [17]. Die Bestimmung der Marshzeit erfolgte hierbei mit einem Auslaufstutzen des Marshtrichters mit einem Innendurchmesser von 4,76 mm [18]. Die Fließeigenschaften der kombinierten Zement-Polyurethan-Injektionen zeigen bis zu einer initialen Konzentration von ca. 25 % nur einen geringen Anstieg der Marshzeit (ca. 4–5 Sekunden). Mit steigender PU-Konzentration nimmt dann jedoch die Marshzeit einer kombinierten Zement-Polyurethan Suspension stark zu. Maschinentechnische Limitationen erlauben derzeit eine Verarbeitbarkeit einer Konzentration von ca. 35 % ebenso zeigt sich ab einer Konzentration von 30 % ein Risiko für Stopfer in Standard-Injektionsleitungen.



6 Influence of PU concentration on filtrate water discharge
Einfluss der PU-Konzentration auf die Filtratwasserabgabe

7 Evaluation of the stability of combined cement-polyurethane suspensions (based on de Paoli, 1992)

Auswertung der Stabilität von kombinierten Zement-Polyurethan-Suspensionen (in Anlehnung an de Paoli, 1992)



CreditQuelle: H. Wannemacher

Determining the Stability of the Grout Mix

The determination of the grout mix stability concerning wash-out is done by comparing the cohesion and the filtration coefficient. The formulation of the grout mix assumes a high cohesion with a low filtration in interaction with the processability. The cohesion is determined according to Lombardi [19] using a plate cohesimeter. Cohesion increases measurably from an addition of 10% polyurethane. From an addition of > 10%, adhesion to the plate rises significantly. The scattering of the measurements in the upper range of polyurethane addition > 30% is volatile. However, it shows an increased scattering of the cohesion to indicate the partly heterogeneous processing of the high PU content and the associated reaction (see Fig. 5).

The determination of the filtrate water release provides information about the sedimentation process of the solids in a grout mix and the filtration (squeezing out) of water into the surrounding ground [20, 21]. The tests were carried out immediately after mixing the grout mix according to the specifications of DIN 4126 [18].

For this purpose, the grout mix is first poured into a standardised cylinder, (400 ml). At the lower end of the cylinder a free filter surface is located, through which the water of the grout mix is pressed out with a filtration pressure of about 7.0 bar in 7.5 minutes. The amount squeezed out corresponds to the filtrate water output in millilitres (see Fig. 6).

From a concentration of approx. 20% polyurethane, an abrupt influence of the polyurethane on the filtrate water release becomes apparent. The filtrate water release is highly variable throughout the test, with a strongly stagnating character as the test progresses. Therefore,

Bestimmung der Stabilität der Suspension

Die Bestimmung der Suspensionsstabilität hinsichtlich Auswaschens erfolgt durch den Vergleich der Kohäsion und des Filtrationskoeffizienten. Die Formulierung der Suspension geht von einer hohen Kohäsion bei einer geringen Filtration im Wechselspiel zur Verarbeitbarkeit aus. Die Bestimmung der Kohäsion erfolgt gemäß Lombardi [19] mittels eines Plattenkohäsimeters. Die Kohäsion nimmt messbar ab einer Zugabe von 10 % Polyurethan zu. Ab einer Zugabe von > 10 % nimmt das Anhaften an der Platte markant zu. Die Streuung der Messungen im oberen Bereich der Polyurethan-Zugabe > 30 % ist volatil und zeigt eine erhöhte Streuung der Kohäsion als Indiz der teils heterogenen Verarbeitung des hohen PU-Anteils und der damit verbunden Reaktion (siehe Bild 5).

Die Bestimmung der Filtratwasserabgabe gibt Aufschlüsse über den Sedimentationsvorgang der Feststoffe einer Suspension und die Filtration (Auspressen) von Wasser in das umgebende Gebirge [20, 21]. Die Versuche wurden unmittelbar nach Anmischen der Suspension nach den Vorgaben der DIN 4126 [18] ausgeführt. Dazu wird zunächst die Suspension in einen genormten Zylinder (400 ml) gegeben. Am unteren Ende des Zylinders befindet sich eine freie Filterfläche, durch die das Wasser der Suspension mit einem Filtrationsdruck von etwa 7,0 bar in 7,5 Minuten abgepresst wird. Die ausgepresste Menge entspricht der Filtratwasserabgabe in Millilitern (siehe Bild 6).

Ab einer Konzentration von ca. 20 % Polyurethan zeigt sich ein abrupter Einfluss des Polyurethans auf die Filtratwasserabgabe. Die Filtratwasserabgabe zeigt sich über die Dauer des Versuchs höchst variabel, mit stark stagnierendem Charakter mit Fortlauf des Versuchs. Die Filtratwasserabgabe allein ist noch nicht aussagekräftig für die Bewertung der Widerstandsfähigkeit einer Suspension gegen Druckfiltration. De Paoli [22] führt hierzu den Filtrationskoeffizienten (pressure filtration

the filtrate water release alone is not yet meaningful for evaluating the resistance of a grout mix to pressure filtration. De Paoli [22] provides the filtration coefficient (pressure filtration coefficient) "KPF" for this purpose. The pressure filtration coefficient is calculated as the product of the quotient of the squeezed volume and the initial sample volume and a constant depending on the test duration ($k_{7.5 \text{ min}} = 0.378$).

While the grout mix with a low PU content ($< 10\%$) are still in the intermediate range of a slightly stable mixture and a stable mixture, the mixes with a higher polyurethane content are far below the ideal curve of a stable cement grout mixture and thus represent an extension of the range of stable mixes established by de Paoli (see Fig. 7).

Mechanical Properties and Strength Development

The onset of setting defines a limit value for the workability of a grout mix as soon as it is not moved. According to Kainrath [23], the onset of the setting of the cement grout mix was determined when the shear stress of 100 Pa was reached for the cement grout mix. However, the addition of PU to the cement grout mix changes the inherent setting behaviour of the grout mix. It poses a risk of damaging the test equipment so that the values were determined with a simple tilt test. Solidification begins as soon as the material in a container can be tilted by 90° without material loss. The onset of solidification is highly dependent on the PU concentration and falls to less than 10 minutes when 40 % PU is added to the grout mix (see Fig. 8). Since the onset of solidification in this range is also highly volatile, a grout mix of 30% or more can undoubtedly lead to a reaction and blockage of the lines. The proportion of polyurethane within the grout mix shows a considerable influence on strength development. The ratio of enclosed spheres of polyurethane and pores of CO_2 leads to a significant reduction in strength compared to a pure cement grout mix. For a 40%

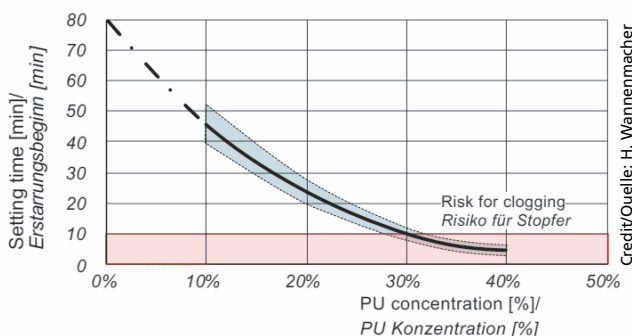
coefficient) „KPF“ vor. Der Druckfiltrationskoeffizient berechnet sich als Produkt des Quotienten des ausgepressten Volumens und des initialen Probenvolumens und einer Konstante in Abhängigkeit der Probendauer ($k_{7.5 \text{ min}} = 0,378$).

Liegen die Suspensionen mit geringen PU-Anteil ($< 10\%$) noch im Zwischenbereich einer leicht stabilen Mischung und einer stabilen Mischung, so liegen die Mischungen mit einem höheren Polyurethangehalt weit unterhalb des Idealverlaufs einer stabilen Zementsuspensionsmischung und stellen somit eine Erweiterung des von de Paoli aufgestellten Bereichs der stabilen Mischungen dar (siehe Bild 7).

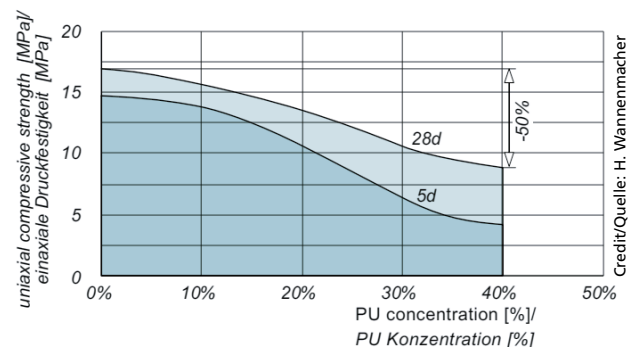
Mechanische Eigenschaften und Festigkeitsentwicklung

Der Erstarrungsbeginn definiert einen Grenzwert für die Verarbeitbarkeit einer Suspension, sobald diese nicht bewegt wird. Der Erstarrungsbeginn der Zementsuspension wurde entsprechend Kainrath [23] bei dem Erreichen einer Schubspannung von 100 Pa für die Zementsuspension ermittelt. Die Zugabe von PU zu der Zementsuspension verändert jedoch das inhärente Erstarrungsverhalten der Suspension und es besteht ein Risiko, die Versuchsaapparaturen zu beschädigen, sodass die Werte mit einem einfachen Kippversuch ermittelt wurden. Der Erstarrungsbeginn liegt vor, sobald sich das Material in einem Becher ohne Materialverlust um 90° kippen lässt. Der Erstarrungsbeginn ist hierbei extrem abhängig von der PU-Konzentration und fällt auf unter 10 Minuten bei einer Zugabe von 40 % PU zur Suspension (siehe Bild 8). Da der Erstarrungsbeginn in diesem Bereich sich zudem stark volatil zeigt, kann eine Suspension ab 30 % durchaus zu einer Reaktion und einem Verstopfen der Leitungen führen.

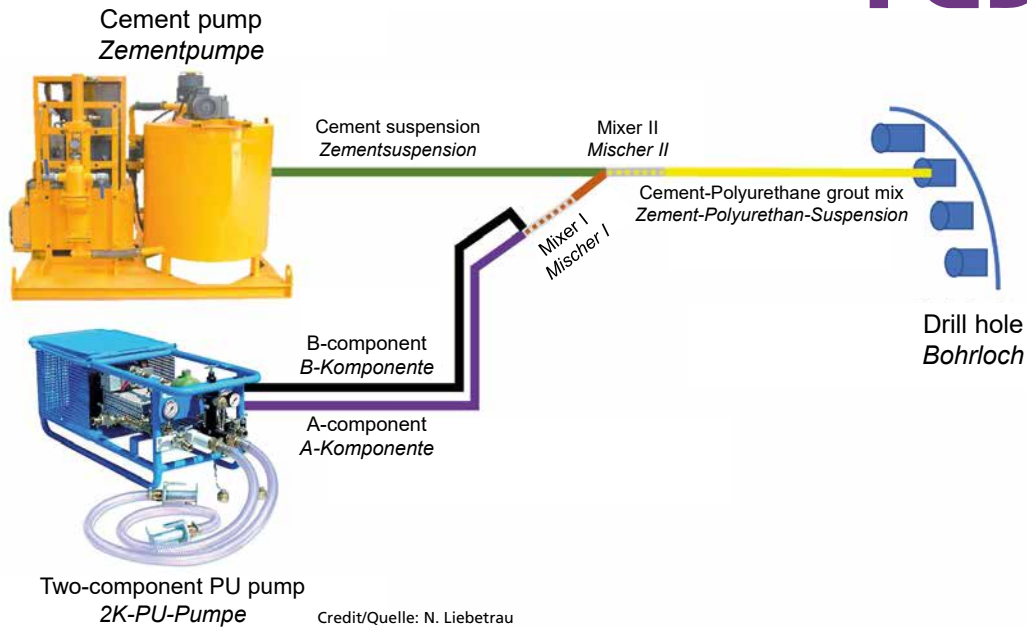
Der Anteil von Polyurethan innerhalb der Suspension zeigt einen starken Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung. Der Anteil der eingeschlossenen Sphären aus Polyurethan und Poren aus CO_2 führen zu einer deutlichen Reduktion der Festigkeit gegenüber einer reinen Zementsuspension. Für eine 40-prozentige Polyurethan-Zement-Suspension beträgt der Abfall der Festigkeit ca. 50 % (Bild 9). Die Festigkeitsreduktion ist aufgrund der primären abdichtenden Intention nur von untergeordneter Bedeutung.



8 Influence of the PU concentration on the onset of the solidification
Einfluss der PU-Konzentration auf den Erstarrungsbeginn



9 Influence of PU concentration on strength development
Einfluss der PU-Konzentration auf die Festigkeitsentwicklung



10 Injection unit consisting of cement and polyurethane pump connected by a bypass system
Injektionseinheit aus Zement- und Polyurethan-Pumpe, die durch ein ByPass-System verbunden sind

polyurethane-cement grout mix, the decrease in strength amounts to approximately 50% (see Fig. 9). The strength reduction is only of secondary importance due to the primary sealing purpose.

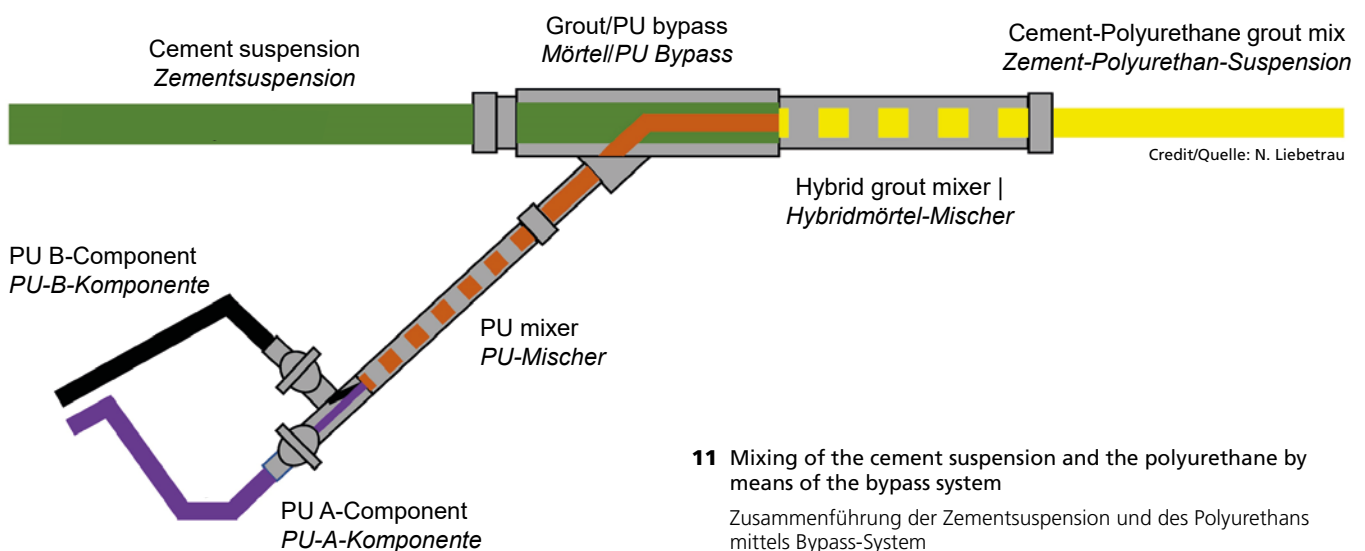
Grouting System for Processing a Cement-Polyurethane Grout Mix

A standardised grouting system can be used to process a cement-polyurethane grout mix, whereby the processability must be tested employing flow tests and free discharge tests. The grouting system consists of a grouting unit for the cement and a separate grouting unit for the polyurethane, including a bypass system, with a control unit, if demanded (see Fig. 10).

The grouting unit for processing the cement grout mix consists of the grouting pump, a colloidal mixer and an agitator. In addition, an integrated data acquisition system for measuring the flow rate and pressure at the

Injektionsanlage zur Verarbeitung einer Zement-Polyurethan-Suspension

Die Verarbeitung einer Zement-Polyurethan-Suspension kann grundsätzlich mit einer standardisierten Injektionsanlage ausgeführt werden, wobei die Überprüfung der Verarbeitbarkeit mittels Fließversuchen und freien Auslaufversuchen erprobt werden muss. Die Injektionsanlage setzt sich aus einer Injektionseinheit für den Zement und einer separaten Injektionseinheit für das Polyurethan, sowie einem Bypass-System gegebenenfalls mit einer Steuerungseinheit zusammen (siehe Bild 10). Die Injektionseinheit zur Verarbeitung der Zementsuspension besteht aus der Injektionspumpe sowie vorgeschaltetem Kolloidalmischer und Rührwerk. Eine integrierte Datenerfassung für die Messung von Durchflussmenge und Druck am Ausgang der Pumpen ist für jede Flusslinie erforderlich. Die Steuereinheit ist mit der Datenerfassung der einzelnen Pumpen verbunden. Eine Erweiterung der Steuereinheit ist für eine dynamische Verarbeitung von unterschiedli-



11 Mixing of the cement suspension and the polyurethane by means of the bypass system
Zusammenführung der Zementsuspension und des Polyurethans mittels Bypass-System

pumps is required for each flow line. The control unit is connected to a data acquisition system of the individual pumps. For dynamic processing of different PU proportions within a grout, an extension of the control unit is required [24].

A separate polyurethane pump is used for PU processing (here: 2-component polyurethane). The two-component polyurethane (components A and B) is sucked in via two separate suction lines and fed to the bypass (mixer I+II) via two separate pressure hoses. Two pressure gauges at the 2-component polyurethane pump facilitate the control of the acting feeding.

The bypass system consists of two mixing systems and a bypass (see Fig. 11). In Fig. 6, the cement line (green) is marked. The PU is formed by mixing the A-component (violet) of polyol and B-component (black) of isocyanate through a static mixer (mixer I), which is fed downstream through a bypass to the cement line. The final cement-polyurethane grout mix is generated by a second static mixer (mixer II). Finally, a standard hose connects the grout line to the packer, through which the borehole is pressurised.

Attempt to Quantify Cement-Polyurethane Grout Mix on the Grouting Process

In small-scale tests, the properties of the cement-polyurethane grout mix show improved characteristics about filtration and initial stability. However, conclusions on the improved properties in the implementation can only be drawn by actual grouting works. Lombardi [25] suggests the q/p method for controlling grouting works. The q/p method compares the flow rate q [l/min] with the grouting pressure p [bar] over time. The q/p value is independent of the steering of the grouting work.

The evaluation of q/p values of advance sealing grouts shows a range of values at the beginning of the grout from 1.5 to approx. 3.0 [l/min/bar]. The steady reduction of the q/p value indicates saturation of the defects of a rock mass. Accordingly, the slope of the q/p value can be used to conclude the effectiveness of the grout. According to Lombardi, sufficient saturation of the ground is achieved when the q/p value reaches a level of < 0.2 [l/min/bar].

Example 1 in Figure 12 shows the process of pre-excavation grouting with a temporal addition of 20 % PU immediately after filling the borehole and reaching the maximum q/p value. the addition of polyurethane introduces a relatively steep gradient of the q/p ratio. Upon reaching a pressure plateau at a reduced flow rate, a stagnation of the q/p curve occurs. The lower gradient as an expression of the minor q/p curve ratio leads to a

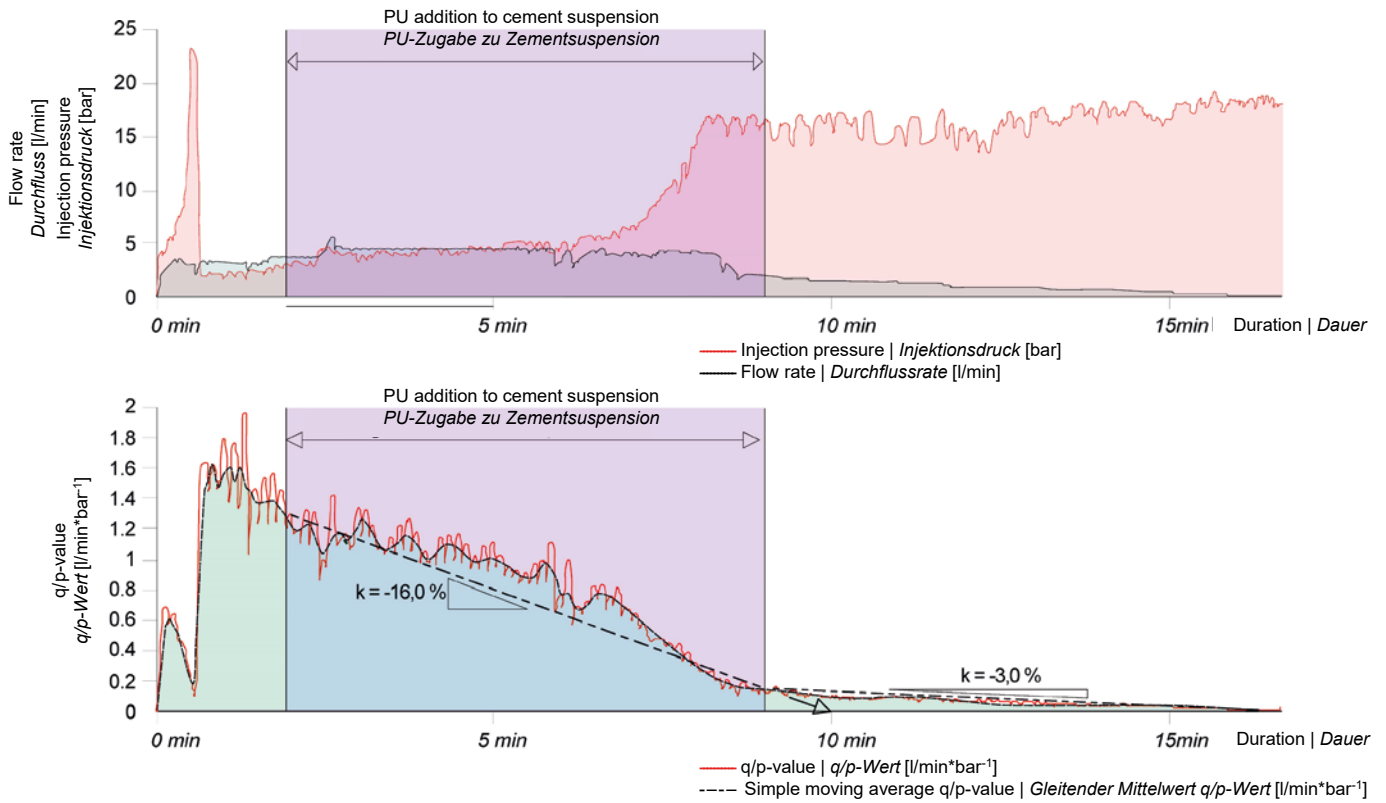
chen PU-Anteilen innerhalb einer Injektion erforderlich [24]. Für die PU-Verarbeitung (hier: 2-K-Polyurethan) kommt eine gesonderte Polyurethan-Pumpe zum Einsatz. Über zwei separate Saugleitungen wird das zweikomponentige Polyurethan (Komponente A und B) angesaugt und über zwei getrennte Druckschläuche dem Bypass (Mischer I+II) zugeführt. Darüber hinaus ist eine Kontrolle der auftretenden Förderdrücke durch zwei Manometer an der 2K-Polyurethan-Pumpe erforderlich. Das Bypass-System besteht aus zwei Mischsystemen und einem Bypass (siehe Bild 11). In Bild 6 ist die Zementleitung (grün) gekennzeichnet. Durch die Mischung von A-Komponente (violett) aus Polyol und B-Komponente (schwarz) aus Isocyanat mittels Statikmischer (Mischer I) entsteht das PU, das nachgeschaltet durch einen Bypass der Zementleitung zugeführt wird. Die Fertigstellung der Zement-Polyurethan-Suspension erfolgt durch einen zweiten Statikmischer (Mischer II). Ein gemeinsamer Injektionsschlauch schließt am Packer an, über welchen das Bohrloch injiziert wird.

Versuch einer Quantifizierung von Zement-Polyurethan-Suspension auf Auswaschverhalten, Injektionsdauer und Injektionsvolumen

Die Eigenschaften der Zement-Polyurethan Suspension zeigen im kleinräumigen Versuch verbesserte Eigenschaften hinsichtlich der Filtration und der initialen Stabilität. Eine Quantifizierung der verbesserten Eigenschaften in der Ausführung kann lediglich im direkten Vergleich der Injektion selbst erfolgen. Lombardi [25] schlägt für die Steuerung einer Injektion die q/p-Methode vor. Die q/p-Methode vergleicht das Verhältnis der Durchflussrate q [l/min] mit dem den Injektionsdruck p [bar] über die zeitliche Entwicklung der Injektion. Der q/p-Wert stellt sich hierbei unabhängig der Steuerungsgröße (Druck oder Durchflussrate) der Injektion ein.

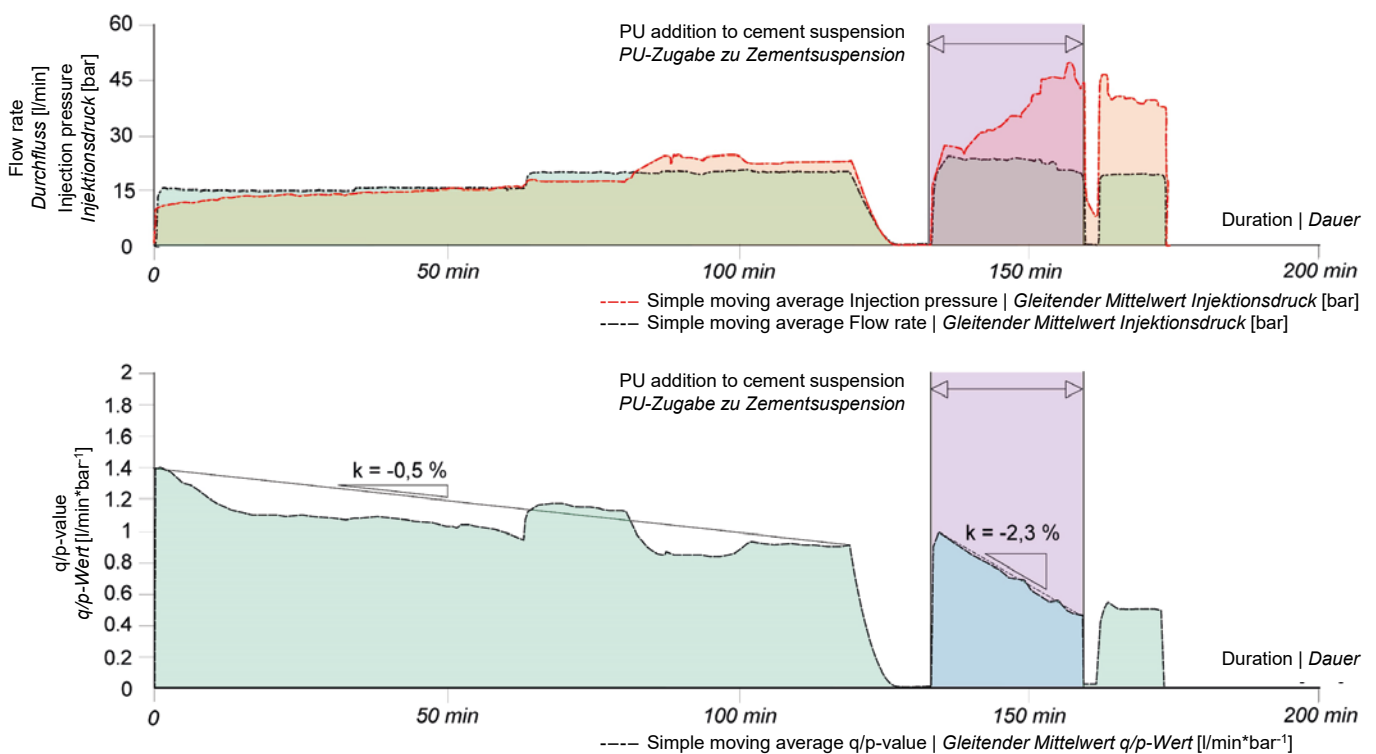
Die Auswertung von q/p-Werten von vorausseilenden Injektionen zeigt einen Wertebereich zu Beginn der Injektion von 1,5 bis ca. 3,0 [l/min/bar]. Die stetige Reduktion des q/p-Wertes deutet auf eine Sättigung der Hohlräume eines Gebirges hin. Entsprechend kann über die Steigung des q/p-Wertes ein Rückschluss auf die Effektivität der Injektion getroffen werden. Eine ausreichende Sättigung des Baugrundes ist gemäß Lombardi bei Erreichen einer Kenngröße des q/p-Wertes von $< 0,2$ [l/min/bar] erreicht.

Das Beispiel 1 in Bild 12 zeigt den Injektionsverlauf einer vorausseilenden Injektion mit einer temporären Zuschaltung von 20 % PU unmittelbar nach dem Füllen und dem Erreichen des maximalen q/p-Wertes. Durch die Zugabe des Polyurethans kann ein relativ steiler Ast des q/p-Verlaufs dokumentiert werden. Nach dem Erreichen eines Druckplateaus bei reduziertem Durchfluss ist eine Stagnation des q/p-Verlaufs ersichtlich. Die geringere Steigung als Ausdruck des geringeren q/p-Verlaufs führt zu einer Verlängerung der Injektion von ca. 7 Minuten bei einem Eintrag von ca. 7 Litern in das Bohrloch.



12 Example 1 – Injection data recording of a cement-polyurethane suspension incl. a graph of the q/p value

Beispiel 1 – Injektionsdatenaufzeichnung einer Zement-Polyurethan-Suspension inkl. einer Ausweisung des q/p-Werts Credit/Quelle: H. Wannemacher



13 Example 2 – Injection data recording of a cement-polyurethane suspension incl. a graph of the q/p value

Beispiel 2 – Injektionsdatenaufzeichnung einer Zement-Polyurethan-Suspension inkl. einer Ausweisung des q/p-Werts Credit/Quelle: H. Wannemacher

prolongation of the grouting operation of approximately 7 minutes with a corresponding volume of approx. 7 litres. Example 2 in **Figure 13** also shows an example of pre-excavation grouting with a temporary addition of 10 % polyurethane upon exceedance of a defined volume.

After an initial drop in the q/p value, a relatively flat plateau forms with a slight increase in saturation. After reaching a defined volume limit, a polyurethane addition to the cement grouting mix was triggered. The combined cement-polyurethane grout mix's increased viscosity leads to an immediate pressure increase and a corresponding decrease in the q/p ratio. After a defined saturation has been reached, a standard cement suspension was used again. After a defined saturation has been reached, the repeating switch towards a standard grout mix results in a horizontal plateau of the q/p value without an increase in of saturation. In this particular case, it is relatively difficult to quantify a possible reduction in grouting time through the anticipatory use of a cement-polyurethane grout mix. Nevertheless, it can be assumed that a decrease of about one hour would have been possible in this case by increased use of the cement-polyurethane grout mix and early addition of the polyurethane to avoid segregation of the cement grout mix.

The influence of cement-polyurethane grout mix on wash-out behaviour was further investigated within the framework of free discharge tests. In the free discharge test, the period or the grout volume for the complete displacement of a line filled with water is measured. Here, it is essential to assess the segregation of the grout mix until the grout mix flows entirely out of the pipe. Using pure cement grout mix, large-volume segregation with almost 100% segregation of the grout mix until complete substitution is observed. However, when using cement-polyurethane grout mixes, the segregation drops to less than 10%.

Summary and Outlook

When excavating challenging ground areas (e.g. high inflow rates and high water pressure) in tunnelling and shaft construction, pre-excavation grouting is often the method of sealing and consolidating water-bearing area. To date, cement-based or chemical grouting agents have usually been applied.

The comparatively cheap cement grouting mix has a low wash-out stability, implying that grouting success can only be achieved with a corresponding increase in time and material to compensate for wash-out effects, especially in high inflow rates and potential lateral infiltration. On the other hand, PU-based grouting materials, which guarantee a comparable better degree of sealing,

Beispiel 2 in **Bild 13** zeigt ebenfalls den Injektionsverlauf einer vorausseilenden Injektion mit einer temporären Zuschaltung von 10 % Polyurethan nach Erreichen einer Grenzmenge ohne augenscheinliche Sättigung des Systems.

Nach einem ersten Abfallen des q/p -Wertes bildet sich ein relativ flaches Plateau mit einem geringen Sättigungszuwachs aus. Nach Erreichen eines definierten Grenzwertes an Volumen wurde eine Polyurethanzugabe zur Zementsuspension ausgelöst. Die erhöhte Viskosität der kombinierten Zement-Polyurethan Suspension führt zu einem unmittelbaren Druckanstieg und einem entsprechenden Abfallen des q/p -Wertes. Nach einem definierten Erreichen einer Sättigung wurde wiederum auf eine Standard-Zementsuspension umgestellt. Dadurch stellt sich ein horizontales Plateau ohne weitere Ausbildung einer Sättigung aus. Eine Quantifizierung einer möglichen Reduktion von Injektionszeiten durch einen vorzeitigen Einsatz einer Zement-Polyurethan Suspension gestaltet sich in diesem Fall relativ schwierig. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass durch einen erhöhten Einsatz der Zement-Polyurethan-Suspension und eine frühzeitige Zugabe des Polyurethans zur Vermeidung einer Entmischung der Zementsuspension durchaus eine Reduktion von ca. einer Stunde in diesem Fall möglich gewesen wäre.

Der Einfluss von Zement-Polyurethan-Suspensionen auf das Auswaschverhalten wurde im Rahmen von freien Auslaufversuchen weiterführend untersucht. Im Rahmen des freien Auslaufversuchs wird die Zeitspanne respektive das Injektionsvolumen für die vollständige Verdrängung einer mit Wasser gefüllten Leitung gemessen. Wesentlich ist hierbei die Begutachtung der Entmischung der Suspension bis zu dem vollständigen Ausfließen der Suspension aus der Leitung. Bei Verwendung von reiner Zementsuspension ist eine großvolumige Entmischung mit nahezu einer 100 % Entmischung der Suspension bis zur vollständigen Substitution des Wassers mit dem Injektionsgut zu beobachten. Bei Verwendung von Zement-Polyurethan-Suspensionen fällt die Entmischung auf weniger als 10 % ab.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Tunnel- und Schachtbau sind bei der Durchörterung von anspruchsvollen Gebirgsbereichen (z. B. hohe Zuflussraten und hoher Wasserdruck) vorausseilende Injektionen zur Abdichtung und Konsolidierung des nachfolgenden Ausbruchsbereich häufig das Mittel der Wahl. Bis dato finden in der Regel zementbasierte oder chemische Injektionsmittel Verwendung. Die vergleichsweise günstigen Zementinjektionen weisen eine geringe Auswaschstabilität auf, wodurch insbesondere bei hohen Zuflussraten und Umläufigkeiten schlussendlich nur mit hohem Zeit- und Materialaufwand ein Injektionserfolg generiert werden kann. Hingegen kommen Injektionsmittel auf PU-Basis, die einen bessere Abdichtung gewährleisten, aufgrund der hohen Kosten nur in Havariefällen zum

are only used in emergency cases due to the high costs involved. Furthermore, stabilising additives "AWA" are only used to a limited extent due to their technically demanding handling and limited applicability in grouting technology.

The presented test results and experiences from grouting works show that cement-polyurethane-based grout mixes overcome the disadvantages of the individual base materials. Therefore, as a sum of the base materials, a grout mix with an increased field of application for the sealing of water-bearing areas in tunnelling and shaft construction could be developed. The gradual adjustment of the mix ratios allows for a constant adaptation to the grouting and thus an efficient application.

Einsatz. Stabilisierungszusätze "AWA" werden aufgrund der technisch anspruchsvollen Handhabung und der geringen Anwendbarkeit in der Injektionstechnik nur im begrenzten Maß eingesetzt.

Die dargelegten Versuchsergebnisse und Erfahrungen aus ausgeführten Injektionen zeigen, dass Injektionsmittel auf Zement-Polyurethan-Basis die Nachteile der singulären Ausgangsstoffe egalisiert. Als Summe der Ausgangsstoffe konnte ein Injektionsstoff mit erhöhtem Einsatzgebiet zur Abdichtung von wasserführenden Bereichen im Tunnel und Schachtbau entwickelt werden. Die stufenlose Anpassung der Mischungsverhältnisse erlaubt eine stete Anpassung an die Injektion und damit eine effiziente Ausführung der Maßnahme.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] C. Zangerl, E. Eberhardt, and S. Loew, "Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock: Numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms," *Hydrogeol. J.*, vol. 11, no. 1, pp. 162–173, 2003.
- [2] T. Strozzi, R. Delaloye, D. Poffet, J. Hansmann, and S. Loew, "Surface subsidence and uplift above a headrace tunnel in metamorphic basement rocks of the Swiss Alps as detected by satellite SAR interferometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, no. 6, pp. 1353–1360, 2011.
- [3] H. Wannenmacher, A. Hosseini, D. Wenner, A. Rahbar, and Z. Shahroki, "Water Ingress and Reduction Measures in the Headrace Tunnel at the Uma Oya Multipurpose Project," in *Hydro 2017*, 2017.
- [4] H. Stille, *Rock Grouting Theory and Applications*, no. september. Stockholm: BeFo, 2015.
- [5] K. F. Garshol, *Pre-Excavation Grouting*, 4th editio. BASF Construction Chemicals Europe Ltd., 2011, 2011.
- [6] H.-O. Hognestad, "Pre-Excavation Grouting in Rock Tunneling Definition of injection " the introduction of a material with," in *Grouting Fundamentals 2019*, 2019, pp. 1–76.
- [7] H. Wannenmacher, "Post Excavation Grouting in Tunnel Construction," in *Grouting Fundamentals & Current Practice 40th Annual Short Course: 1st European Edition*, 2019, pp. 1–24.
- [8] B. Jähnchen, "Untersuchungen zum Verhalten Anti-Wash-Out stabilisierter Zementsuspensionen," Hochschule Wismar, 2008.
- [9] N. Gursaud, M. Chuaqui, D. Lees, W. Lam, and F. Hu, "Intake Shaft Grout Curtain for the Niagara Tunnel Project," *Proc. Fourth Int. Conf. Grouting Deep Mix.*, pp. 903–913, 2012.
- [10] N. Liebetrau, "Polyurethaninjektionen in heiße Druckwasserquellen beim Straßentunnel Vadlaheidi in Island," in *Forum Injektionstechnik 2016*, 2016.
- [11] T. Najder, "Iceland Sealing Water Ingress," 2020. [Online]. Available: <http://najder.se/engineering/wp-content/uploads/2019/03/Iceland-Sealing-water-.....pdf>.
- [12] P. Konz, "Sickerwasserströmungen im Hauptdolomit der Engadiner Kraftwerke," *SBZ*, vol. 42, 1969.
- [13] A. A. de Oliveira Filho, G. T. Belitardo, E. Büchi, and A. Vigl, "San Francisco HEP Headrace Tunnel - TBM Success under the Presence of Pressurized Water in Faulty Deep Rock," *Geomech. und Tunnelbau*, vol. 1, no. 6, pp. 552–557, 2008.
- [14] H. Andersson, "Chemical Rock Grouting," Chalmers, Göteborg, 1998.
- [15] M. Bodo, *Additive kompakt*, 1. Auflage. 2009.
- [16] F. Locher, *Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Verlag Bau+Technik, 2015.
- [17] A. Kainrath and W. Hornich, "Rheologische und mechanische zementgebundenen Injektionsstoffen Eigenschaften von," 2016.
- [18] DIN, "4126 Nachweis der Standsicherheit von Schlitzwänden," 2013.
- [19] G. Lombardi, "The role of cohesion in cement grouting of rock," Lausanne, 1985.
- [20] M. Chuaqui and D. A. A. Bruce, "Mix Design and Quality Control Procedures for High Mobility Cement Based Grouts," Toronto, 2003.
- [21] B. Haslehner, "Digital quality management for conducting quality checks of injection grouts," Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 2017.
- [22] B. De Paoli, B. Bosco, R. Granata, and D. A. Bruce, "Fundamental Observations on Cement Based Grouts," in *ASCE Conference on Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, 1992, pp. 474–485.
- [23] A. Kainrath, "Permeation Grouting in Granular Soils," Technische Universität Wien, 2017.
- [24] Groundfynk, "Manual Groundfynk Box Vs.1," Vienna, 2020.
- [25] G. Lombardi, "Selecting the grouting intensity," *International Journal on Hydropower and Dams*, vol. 3, no. 4. pp. 62–66, 1996.

Rascor International AG
Gewerbestrasse 4
CH-8162 Steinmaur
Schweiz/Switzerland

+41 44 857 11 11
sales@rascor.com
www.rascor.com