

Beilage IV (B)

Baubewilligung Semmering-Basistunnel neu  
GZ. 298/11 Analyse und fachliche Stellungnahme für die Berufung

~~Beilage 2~~  
Veröffentlichung  
Polyamid-Abdichtungsverfahren

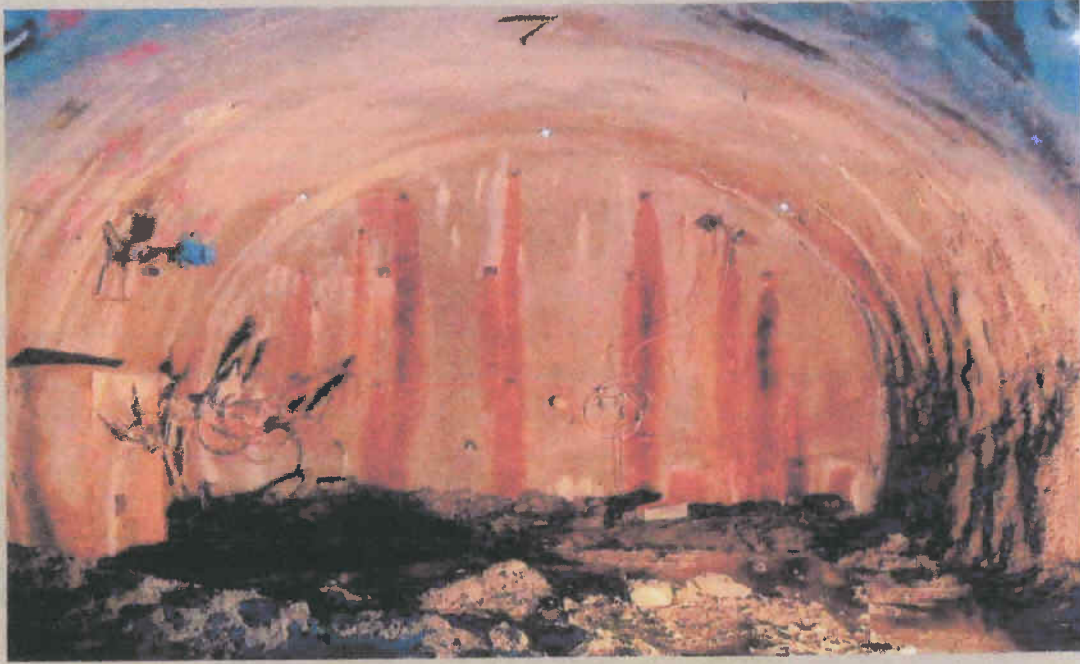
# -GEOLEX-

ZEITSCHRIFT FÜR TILFBAU UND TILFBAURECHT

www.geolix.de | Organ des cbtr

Ausgabe  
1102

## Die Polyamid-Injektion Eine Neuentwicklung in der Injektionstechnik



**insond** / SPEZIAL TIEFBAU

Überreicht durch  
Insond GmbH,  
Neumarkt a. Wallersee,  
Österreich

**ZUBLIN**  
SPEZIAL TIEFBAU

SONDERDRUCK

ICONEON

Klaus Weber: Die Polyamid-Injektion -  
Eine Neuentwicklung in der Injektionstechnik

## Die Polyamid-Injektion

Eine Neuentwicklung in der Injektionstechnik  
Klaus Weber

*In diesem Beitrag wird ein neuartiges Injektionsverfahren vorgestellt, bei dem erhitztes, flüssiges Polyamid als Injektionsmittel verwendet wird. Das injizierte Polyamid härtet mit der Abkühlung im Boden schnell aus und schließt Klüfte und Hohlräume kraftschlüssig und wasserdicht. Ein wesentlicher Vorteil der neuartigen Polyamid-Injektion liegt in der vollständigen Umweltverträglichkeit des Injektionsmaterials. Die Polyamid-Injektion hat große Entwicklungspotentiale und eröffnet ein weites Feld von neuen Injektionsanwendungen im gesamten Bereich der Geotechnik - sowohl im Fels- als auch im Lockergestein.*

### 1 Einführung

Die moderne Injektionstechnik hat im Tunnelbau, im Spezialtiefbau und bei der Bauwerkserhaltung breite Anwendungsfelder und bietet hochspezialisierte Verfahrenstechniken zur Lösung der häufig sehr schwierigen Problemstellungen, bei denen die Randbedingungen in der Regel nicht definiert sind. Der Injektionserfolg wird maßgeblich durch eine "feinfühlige" Injektionstechnik bestimmt, die auf handwerklicher Erfahrung und auf ingenieurmäßig erforschten Modellen aufbaut. Andererseits ist das Injektionsergebnis im wesentlichen von den Randbedingungen abhängig, die durch die weitgehend unbekannt Klüfte und Poren des Bodens mit seinen Wasserwegigkeiten vorgegeben sind. Vor diesem Hintergrund gab es insbesondere bei der Gerätetechnik und bei der Erfassung, Auswertung und Interpretation der Injektionsdaten in den vergangenen Jahren wesentliche Fortschritte, die den vermehrten Injektionsaufgaben im Untertagebau und in der Geotechnik Rechnung trugen. Bei Injektionen (Poren-, Hohlraum-, Abdichtungs-, Verfestigungs-, Hebungs-, Verdrängungs-, Stabilisierungs-, Klufteinjektionen usw.) wird fließfähiges Injektionsmaterial unter Druck in die Hohl-

räume eingebracht. Abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung werden Zementsuspensionen, Zement-Bentonitsuspensionen, Feinstzementsuspensionen, Weichgele, Harze, PU-Schäume oder Silane injiziert.

Die nachfolgend vorgestellte Neuentwicklung in der Injektionstechnik betrifft das Injektionsmaterial. Als Injektionsgut wird geschmolzener, gering viskoser Kunststoff verwendet, der gezielt in Klüfte und Poren des Bodens verpresst wird, dort abkühlt und dabei wieder in den festen Aggregatzustand übergeht. Insbesondere bei der Injektion von stark wasserführenden Klüften und Fehlstellen wurde das patentierte Verfahren bereits erfolgreich baupraktisch angewandt. Entwickler dieses neuartigen Verfahrens ist die Insond GmbH, eine Beteiligungsgesellschaft der Ed. Züblin AG.

### 2 Verfahrensbeschreibung der Polyamid-Injektion

#### 2.1 Verfahrensprinzip

Bei der Polyamid-Injektion wird der Übergang des Aggregatzustandes eines Polyamid-Kunststoffs von fest nach flüssig beim Aufschmelzen und zurück von flüssig nach fest beim

Erhärten des Materials injektionstechnisch genutzt. Der bei einer Temperatur von etwa 200 °C verflüssigte Kunststoff wird in die Klüfte und Hohlräume des Baugrundes injiziert und erhärtet dort.

Neben der Injektionsrate und dem Injektionsdruck, die auch bei der klassischen Injektionstechnik wesentliche Parameter darstellen, ist bei der Polyamid-Injektion insbesondere die Temperatur die entscheidende Einflussgröße. Die Temperatur steht in funktionaler Wechselbeziehung mit der Materialviskosität, die unmittelbaren Einfluss auf das Injektionsverhalten, den Injektionsverlauf und die gesamte Injektionstechnik hat.

Zwischen dem heißen, in Klüfte und Hohlräume injizierten Polyamid und dem anstehenden Boden bestehen komplexe thermodynamische Interaktionen. Vor allem wasserführende Bodenschichten und Wasserströmungen in Klüften bestimmen maßgeblich die Abkühlung und die Erhärtung des flüssigen Polyamids.

Die derzeit vorhandenen Erfahrungen und Kenntnisse wurden rein empirisch gewonnen und bestätigen die Funktionalität des neuartigen Injektionsverfahrens. In Bild 1 ist

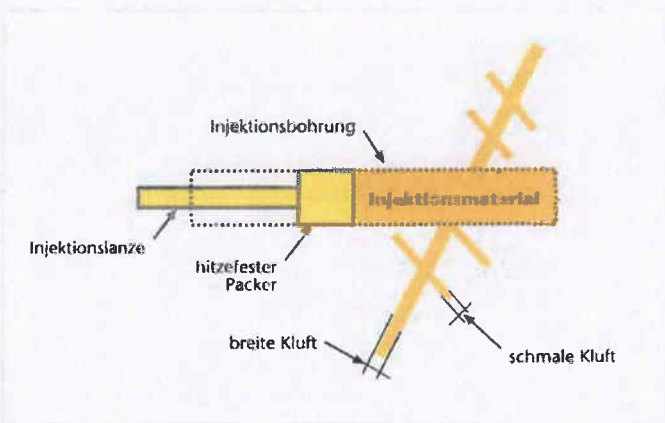


Bild 1: Modell der Polyamid-Injektion in einem Klufsystem



B

Aufsätze

die modellhafte Wirkungsweise der Polyamid-Injektion in einem Klufsystem dargestellt.

Das heiße Polyamid wird über eine hitzebeständige Injektionslanze in die Injektionsbohrung und in die angeschlossenen Klüfte gepresst. Der Kontakt zum Gestein hat eine sofortige Temperaturabnahme und eine Erhöhung der Viskosität des Injektionsmaterials zur Folge. Dabei hat das Polyamid bei großer Kluftbreite eine kleine spezifische Oberfläche (= Verhältnis der benetzten Gesteinsfläche zur Polyamidmenge), so dass das Injektionsmaterial nur wenig Wärmeenergie abgeben kann und sich die Viskosität nur langsam erhöht. Die Injektionsreichweite ist in diesem Fall groß. Hingegen hat das Polyamid bei kleinen Kluftbreiten eine große spezifische Oberfläche und kühlt dementsprechend schneller ab - was mit einer höheren Viskosität einher geht und zu kleineren Injektionsreichweiten führt.

Die Effekte werden bei vorhandenem Wasser und vor allem bei Wasserströmungen überlagert. Je mehr thermische Energie vom flüssigen Polyamid an strömendes Wasser abgegeben werden kann, desto schneller erhöht sich die Materialviskosität und erstarrt das Injektionsmaterial. Daraus ergibt sich eine bevorzugte Eignung der Polyamid-Injektion für Abdichtungsmaßnahmen, insbesondere bei Abdichtungen gegen strömendes Wasser im Tunnelbau und im Spezialtiefbau.

Schließlich wird auf einen baubetrieblichen Vorteil der Polyamid-Injektion hingewiesen, der im geringen Aufwand zur Reinigung der Injektionsanlage besteht. Bei der Verarbeitung von Bindemitteln ist ein zeitaufwendiges, regelmäßiges Waschen und Reinigen der gesamten Mischanlage, der Pumpen und der Injektionsschläuche erforderlich. Auch bei außerplanmäßigen Injektionsunterbrechungen müssen beispielsweise bei einer Zementinjektion umfangreiche Reinigungs-

arbeiten durchgeführt werden. Das in der Schmelzeinheit, in der Injektionspumpe oder in Injektionsschläuchen bei Arbeitsunterbrechungen erstarrte Polyamid wird bei Fortsetzung der Arbeiten lediglich wieder thermisch verflüssigt. Eine zwingende Entleerung und Reinigung der gesamten Injektionsanlage ist nicht erforderlich.

### 2.2 Gerätetechnik

Bei der Polyamid-Injektion unterscheidet sich die erforderliche Gerätetechnik in wesentlichen Punkten von der bekannten Ausrüstung zur Injektion von Bindemitteln, Harzen oder Gelen.

Alle Gerätebausteine und insbesondere Dichtungen und Manschetten müssen hitzebeständig sein. Das zentrale Geräteelement ist die Schmelzeinheit, in der das Polyamid erhitzt wird und die eine ausreichend dimensionierte Schmelzleistung haben muss, um einen stetigen Injektionsvorgang sicherzustellen. Die zur Zeit verwendete Schmelzvorrichtung hat eine Schmelzleistung von etwa 400 l/Std.

Der aufgeschmolzene Kunststoff wird mit drehzahlregulierten Zahnradpumpen gefördert, die ein pulsationsfreies und konstantes Injizieren bis zu einem maximalen Injektionsdruck von derzeit etwa 100 bar ermöglichen.

Alle Schlauchverbindungen - von der Schmelzeinheit zur Injektionspumpe und weiter bis zur Injektionslanze - bestehen aus thermisch hochwertig isolierten Heizleitungen mit eingebauten Temperaturfühlern.

Durch die verwendeten Heizleitungen wird die Förderung des flüssigen Polyamids ohne Energieverluste bis zur Injektionslanze gewährleistet. Die gesamte Geräteeinheit, die insgesamt eine Leistungsaufnahme von 40 kW hat, ist mit Sensoren zur Erfassung der Injektionsparameter (Pumprate, Injektionsmenge) und der Materialtemperatur ausgestattet.

### 2.3 Injektionsmaterial

Das Injektionsmaterial ist ein wasserunlöslicher Schmelzstoff auf Polyamidbasis, der erhitzt und in flüssigem Aggregatzustand verarbeitet wird. Nach dem Injektionsvorgang härtet das Material durch den Abkühlungsprozess aus. Schädliche Nebenprodukte werden dabei nicht frei. Das injizierte Polyamid ist umweltverträglichkeitsgeprüft und ökologisch und toxikologisch als unbedenklich einzustufen. Eine Grundwasserunreinigung ist ausgeschlossen. Diesbezüglich sei erwähnt, dass Polyamid auch bei der Herstellung von Geotextilien als organische Grundsubstanz Verwendung findet. Die Lieferung des Polyamids erfolgt in Block- oder in Chip-Form.

Die mechanischen Eigenschaften von festem Polyamid sind ebenfalls temperaturabhängig. Bei der natürlichen Umgebungstemperatur hat das verwendete Polyamid eine hohe Festigkeit und zeigt bei Scherbeanspruchung ein elastisches beziehungsweise ein elastoplastisches Verhalten.

Mit dem Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand wird Polyamid pumpfähig und damit injizierbar. Das erhitzte, flüssige Polyamid ist keine Suspension, die durch Aufschwemmung feinstverteilter fester Stoffe in einer Flüssigkeit charakterisiert ist und das latente Problem einer Entmischung während der Injektion birgt, sondern eine einphasige, stabile Lösung, deren rheologische Eigenschaften temperaturabhängig sind und damit eben auch über die Temperatur anwendungsspezifisch modifiziert und gesteuert werden können.

Diese Stabilität der Lösung ist von großem, injektionstechnischem Vorteil. Durch das einphasige Polyamid ergibt sich der weitere, vor allem gerätetechnische Vorteil, dass keine Topfzeiten zu beachten sind, wie dies bei mehrkomponentigen Injektionsharzen und -gelen der Fall ist.

3

Klaus Weber: Die Polyamid-Injektion -  
Eine Neuentwicklung in der Injektionstechnik

Das nach der Injektion aushärtende Polyamid hat adhäsive Eigenschaften und bildet mit dem anstehenden Gestein einen festen Verbund. Diese "Klebwirkung" erhöht die Festigkeit der Polyamid-Boden-Matrix.

Des weiteren zeigt Polyamid ein geringes Quellvermögen, das aus der Aufnahme und Bindung von Wasser resultiert. Diese hygroskopische Eigenschaft, die mit einer Volumenzunahme von 1 bis 3 Vol.-% verbunden ist, bewirkt eine zusätzliche Verspannung des Materials im Kluft- und Porenraum des Bodens und damit eine weitere Verfestigung des injizierten Bodens. Je nach spezifischen Anforderungen oder bei einer gewünschten Anpassung der mechanischen Eigenschaften kann das Grundmaterial mit geeigneten Zuschlagsstoffen und Füllern vielfältig modifiziert werden. Die beschriebenen Grundeigenschaften und die temperaturabhängige Rheologie des Materials ermöglichen eine individuelle Anpassung der Injektionstechnik an die jeweilige Aufgabenstellung.

3 Anwendungsbereiche der Polyamid-Injektion

3.1 Allgemeines

In der Vergangenheit konnte die prinzipielle Eignung des neuen Injektionssystems bei unterschiedlichen Aufgabenstellungen in großmaßstäblichen Laborversuchen untersucht und erfolgreich nachgewiesen werden. Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen wurden dabei unmittelbar bei der Entwicklung der Gerätetechnik und bei Materialanpassungen fortlaufend berücksichtigt. Daraus ergab sich eine solide Grundlage für die ersten bereits ausgeführten, baupraktischen Anwendungen.

Die Polyamid-Injektion ist grundsätzlich auch in den Anwendungsbereichen der klassischen Injektionstechnik einsetzbar. Ein Schwerpunkt liegt bei Anwendungen, mit denen der Baugrund verfestigt wird und

die mechanischen Eigenschaften des Injektionsmittels maßgeblich werden. Hierzu gehören:

- Poreninjektionen im Lockergestein zur Erhöhung der Festigkeit und der Steifigkeit des Baugrunds
- Verdrängungsinjektionen zur Kompensation von Setzungen bzw. zur Erzeugung von Hebungen
- Injektionen zum kraftschlüssigen Verschluss von Fugen, Klüften und Hohlräumen (Felsinjektion, Mauerwerksinjektion)

Der zweite Anwendungsschwerpunkt betrifft Injektionen zur Abdichtungen gegen zuströmendes Wasser und den damit im Lockergestein häufig einhergehenden kritischen Bodeneintrag. Exemplarische Beispiele sind hierzu:

- Verpressen von Gebirgsklüften beim Tunnel- und Stollenbau
- Abdichtung von Bauwerksfugen (Tunnelauskleidung, Bodenplatte, Kellerwände)
- Fugenabdichtungen bei Verbauwänden (Pfahlwände, Spundwände, Schlitzwände)
- Schließen von Fehlstellen in Dichtungsohlen (Unterwasserbetonsohle, Düsenstrahlsohle)
- Abdichtung von Ankerköpfen und Erdnägeln

Der derzeitige Einsatzbereich des neuen Injektionsverfahrens besteht in der Abdichtung von undichten

Fehlstellen bzw. wasserführenden Klüften. Die nachfolgend beschriebenen Beispiele sind Pilotanwendungen, bei denen große Wasserzutritte mit der Polyamid-Injektion in kurzer Zeit gestoppt werden konnten.

3.2 Anwendung im Tunnelbau: Erkundungsstollen Brixlegg Ost

Der Erkundungsstollen Brixlegg Ost im österreichischen Inntal ist Teil der ersten Baumaßnahmen der Eisenbahnzulaufstrecke für den Brennerbasistunnel (Eisenbahnachse München-Verona). Etwa 220 m vor dem Durchschlag des 2,5 km langen Stollens musste der bergmännische Vortrieb wegen einer Störungszone mit Lockergesteinscharakter und Wasserdrücken bis 6 bar gestoppt werden. Das Bild 2 zeigt die gesicherte Ortsbrust des Erkundungsstollens nach der Einstellung der Vortriebsarbeiten.

Mit einer daraufhin durchgeführten Zementinjektion war weder eine für den weiteren Vortrieb ausreichende Abdichtung noch eine statisch wirksame Gebirgsverbesserung zu erzielen. Anschließend Planungen einer Manschettenrohrinjektion mit Preventern und/oder Vereisung wurden schließlich wieder verworfen. In der Folge wurde in dem in hydrogeologischen Sicht sehr anspruchsvollen und umweltpolitisch sehr sensiblen



Bild 2: Ortsbrust mit Spritzbetonsicherung vor der Polyamid-Injektion



Aufsätze

Umfeld eine Polyamid-Injektion vorgesehen, die im Juni 2002 nach detaillierten technischen und wasserrechtlichen Prüfungen des Bauherrn und der Umweltschutzbehörden ausgeführt werden konnte.

Dabei wurde das auf etwa 200 °C erhitzte, flüssige Polyamid über Setzkolben aus hitzebeständigem Material in die 2,50 m tiefen Injektionsbohrungen gepresst. Dies erfolgte bei insgesamt zwölf Injektionsbohrungen im Schutz von Standrohren, die präventiv vorab in der Spritzbetonschale der Ortsbrust kraftschlüssig gesetzt wurden. Bild 3 zeigt die Injektionsvorrichtung, die in vergleichbarer Form auch bei den bekannten Injektionstechniken zur Anwendung kommt. Der Packer des Setzkolbens ist eine Sonderanfertigung aus hitzebeständigem Material.

Bereits nach kurzer Injektionsdauer konnten die wasserführenden Hohlräume und Klüfte im Injektionsbereich geschlossen und der Wasserzutritt vollständig gestoppt werden. Aufbauend auf der erfolgreich durchgeführten Polyamid-Injektion plant der Bauherr derzeit die weitere Vorgehensweise zur Fertigstellung des Erkundungsstollens.

3.3 Anwendung im Lockergestein: Baugrube am Flughafen München

Am Flughafen München wurde unmittelbar neben einer bestehenden Spundwand eine weitere Spundwandbaugrube im quartären Kies geplant und hergestellt. Der Anschlussbereich zwischen der bestehenden und der neu eingebauten Spundwand wurde planmäßig mit einer Düsenstrahlsäule abgedichtet. Die horizontale Abdichtung der Baugrube erfolgte über eine Unterwasserbetonsohle. Im Zuge des Baugrubenaushubs wurde allerdings zwischen Düsenstrahlsäule und bestehender Spundwand eine Fehlstelle im Anschlussbereich zur Unterwasserbetonsohle festgestellt, über die Wasser und Kiesboden in die Baugrube ein

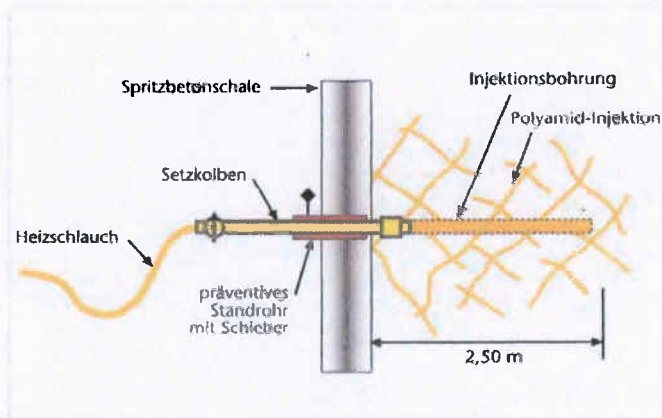


Bild 3: Polyamid-Injektion beim Erkundungsstollen Brixlegg Ost

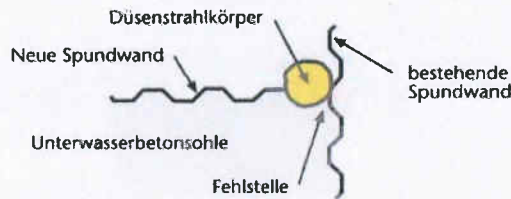


Bild 4: Spundwandanschluss und Lage der Fehlstelle

drang, so dass unmittelbarer Handlungsbedarf bestand. Die Situation im Grundriss ist in Bild 4 skizziert.

Die ersten, unmittelbaren Abdichtungsversuche mit einfachen mechanischen Mitteln waren erfolglos, und auch die folgenden Injektionen mit verschiedenen Bindemittelsuspensionen und schließlich mit Polyurethan-Harzen, die nach dem Injizieren aufschäumen, konnten die Wasserschüttung mit etwa 12 l/s nicht stoppen.

Mit der in der Folge durchgeführten Polyamid-Injektion wurde schließlich nach einer Gesamtinjektionsdauer von etwa zwei Stunden eine Abdichtung der Leckage erreicht.

Die Injektion des flüssigen, etwa 200 °C heißen Polyamids erfolgte im ersten Schritt über Injektionslanzen, die unmittelbar im sichtbaren Wasserzutrittsbereich und unterhalb der aktuellen Aushubkote zwischen Düsenstrahlkörper und Spundwand im Anschlussbereich zur Unterwasserbetonsohle eingerammt wurden.

Unmittelbar zu beobachtende Injektionserfolge mit einer teilweise abrupten Abnahme der Wasserschüttung waren vor allem während Injektionspausen zu beobachten. Es zeigte sich in der Folge, dass das Erstarrungsverhalten des Polyamids über die Pumprate und über Pumpspausen maßgeblich gesteuert werden konnte. Die Erklärung hier

Klaus Weber: Die Polyamid-Injektion -  
Eine Neuentwicklung in der Injektionstechnik

für ist in der Unterbrechung des fortlaufenden Energieeintrags zu vermuten, der bei laufender Injektion einerseits als thermische Energie in Form von heißem Polyamid und andererseits als kinetische Energie über die Injektionspumpe erfolgt. In Bild 5 ist die Düsenstrahlsäule zwischen den Spundwänden vor und nach der Polyamid-Injektion dargestellt.

Im linken Bild ist die provisorische Abdichtung mit Mörtel und Bau- stahlgewebe, sowie die gesetzte Abschlauchung erkennbar. Das rechte Bild zeigt die Situation nach der Polyamid-Injektion. Oberhalb der provisorischen Abdichtung ist ausgetretenes, erstarrtes Polyamid erkennbar.

Im weiteren Verlauf der Injektion trat hochviskoses Polyamid aus dem Leckagebereich aus und erstarrte schließlich. Bild 6 zeigt eine gewonnene Probe des injizierten Kiesbodens.

Es ist zu erkennen, dass nahezu das gesamte Porenvolumen des locker gelagerten Kieses mit dem bernsteinfarbenen Polyamid aufgefüllt wurde. Des weiteren hat die gewonnene Injektionsprobe die zu erwartende hohe Scherfestigkeit der Polyamid-Kies-Matrix bestätigt. In einem zweiten Schritt wurde der Anschlussbereich zwischen Düsenstrahlsohle und bestehender Spundwand auf der gesamten Höhe injiziert. Diese Fuge war durch die inzwischen fortgeschrittenen Bautätigkeiten und den daraus resultierenden Spundwandverformungen leicht wasserführend. Mit der sukzessiven, von unten nach oben durchgeführten Polyamid-Injektion konnte der Wasserzutritt in dieser Fuge problemlos gestoppt werden.

**4 Potential der Polyamid-Injektion und Ausblick**

Die vorgestellten, ersten Einsatzbeispiele der Polyamid-Injektion beim Erkundungsstollen Brixlegg Ost und bei der Baugrube am Flughafen München zeigen die hohe Leis-

tungsfähigkeit des Injektionssystems. Vor allem die bei den baupraktischen Anwendungen gewonnen Erkenntnisse werden bei den weiteren Entwicklungen der Polyamid-Injektion berücksichtigt. Die Entwicklungsschwerpunkte liegen dabei in den drei Bereichen Gerätetechnik, Materialentwicklung und Injektionstechnik. Mit den folgenden Beschreibungen werden auch die zukünftigen Potentiale der Polyamid-Injektion deutlich.

**4.1 Gerätetechnik**

Bei der derzeit verwendeten Gerätetechnik ergibt sich durch die begrenzte Schmelzleistung der Schmelzeinheit eine Kapazitätsgrenze für die Polyamid-Injektion. Der Bau leistungsfähigerer Schmelzeinheiten ist allerdings problemlos möglich und stellt lediglich eine maschinenbautechnische Aufgabe dar. Gleiches gilt für die derzeit verfügbare Pumpentechnik und die Leistungsfähigkeit der Injektionspumpen.

Mit der Entwicklung leistungsfähigerer Geräte mit größerer Schmelzkapazität und höherer Pumpleistung werden auch Polyamid-Injektionen für großflächige Abdichtungen und Bodenverbesserungen möglich. Analog zur Gerätetechnik bei der konventionellen Injektionstechnik werden zukünftig Vorratsbehälter,

Schmelzeinheiten, Injektionspumpen, Injektionssensorik und die gesamte Datenverarbeitung als robuste Geräteeinheit in Form eines vollständigen Injektionscontainers zur Verfügung stehen.

**4.2 Materialentwicklung**

Ein weiterer wesentlicher Entwicklungsbereich betrifft die Optimierung des Injektionsmaterials. Durch spezifische Detailanpassungen im Chemismus des Polyamids werden die optimalen Materialien für die unterschiedlichen Aufgabenstellungen einer Polyamid-Injektion empirisch ermittelt.

Beispielsweise ist die Funktionalität zwischen Materialtemperatur und Viskosität steuerbar, so dass Abdichtungen auch bei großen Kluftweiten und großem Wasserandrang durch ein schnelles Erhärten des Materials möglich werden. Für Abdichtungszwecke ist auch die spezifische Anpassung des Schmelzpunktes und die maximal mögliche Materialtemperatur noch weiter zu untersuchen.

In der weiteren Folge sind systematische Untersuchungen des mechanischen Verhaltens des Polyamids beziehungsweise der Polyamid-Bodenmatrix vorgesehen. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse sind weitere Einsatzmöglichkeiten der

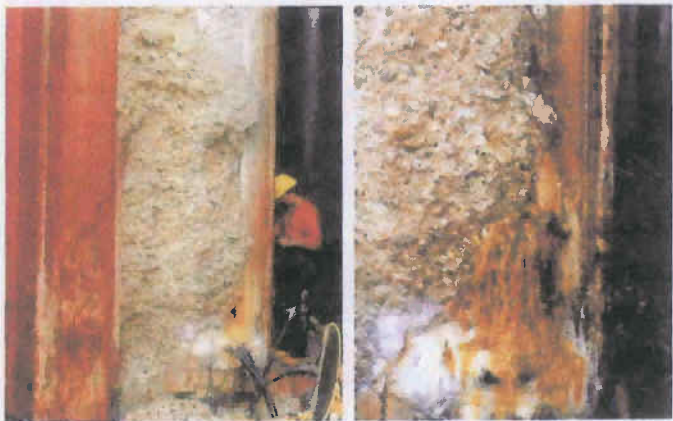


Bild 5: Düsenstrahlkörper zwischen den beiden Spundwänden, vor (links) und nach (rechts) der Polyamid-Injektion

