

# Injektionsplanung und Vertragsgrundlagen bei Wasserkraftanlagen – Druckstollen und Druckschächten

Paul Bonapace

*TIWAG - Tiroler Wasserkraft AG, Innsbruck, Österreich*

**KURZFASSUNG:** Im Tiroler Oberland werden seit 2012 bei verschiedenen Kraftwerksprojekten unterirdische Druckstollen und Druckschächte im Durchmesserbereich von 3 m bis 14 m und mit Innendruckbelastungen von 10 bar bis 100 bar neu errichtet. Bei diesen Kraftwerksanlagen wird die Auskleidung mit Stahl oder Beton ausgeführt. Um einen dauerhaften Betrieb zu gewährleisten, wird auf einen zuverlässigen Verbund mit dem Gebirge großer Wert gelegt. Die kraftschlüssige Verbindung der Auskleidung mit dem umliegenden Gebirge wird mit Hilfe von Injektionsmaßnahmen sichergestellt. Es werden zumindest mehrstufige Gebirgsinjektionen über systematische Bohrlochinjektionen durchgeführt. Nach dem Einbau der Auskleidung aus Beton oder Stahl werden zumeist auch Kontakt- und Spaltinjektionen (in gepanzerten Abschnitten) bzw. Kontakt- und Vorspanninjektionen (in Bereichen mit Betonauskleidung) ausgeführt. Das Injektionskonzept für diese verschiedenen Injektionsarten, das auch als Grundlage für den Bauvertrag dient, wird im Beitrag näher erläutert.

## 1 EINLEITUNG

Durch den Vortrieb eines Druckstollens oder Druckschachtes wird das Gebirge zumeist aufgelockert und hat einiges an Potential für ein technisch dichtes, dauerhaftes, höchst tragfähiges Verbundsystem mit der Auskleidung eingebüßt. Es ist daher ein Ziel der Injektion die ursprüngliche Steifigkeit, Dichtheit und Tragfähigkeit des Gebirgstragringes, die der Bemessung der Stollen und Schächte zugrunde liegen, wieder herzustellen. Mit Injektionen wird außerdem die für den Einbau der Panzerung erforderliche Trockenlegung der Stollen und Schächte erleichtert. In den flachen Stollen wird der herstellungsbedingte Firstspalt zwischen Auskleidungsbeton und Ausbruch verfüllt. Im Falle einer Betonauskleidung wird mit Hochdruckinjektion eine Vorspannung erzeugt, die unter Betriebsdruck die rechnerische Rissfreiheit im Auskleidungsbeton sicherstellt. Bei einer Stahlpanzerung wird, um den Kraftschluss zwischen Panzerung und Hinterfüllbeton herzustellen, der Temperatur- und Schwindspalt zwischen Hinterfüllbeton und Stahl verpresst.

Die beschriebenen Injektionsmaßnahmen werden mit unterschiedlichen Injektionsverfahren, die vorgesehene Injektionsziele erfüllen sollen, durchgeführt. Die Planung dieser

Injektionsmaßnahmen wird am Beispiel des Neubauprojekts für den Druckschacht des Kaunertalkraftwerks (KD) der TIWAG näher beschrieben.

## 2 INJEKTIONSKONZEPT

### 2.1 *Injektionsmaßnahmen*

Um eine ausreichende Bettung der Auskleidung sicherzustellen, sowie die Abdichtung und Tragfähigkeit des umliegenden Gebirges zu verbessern, sind beim Referenzprojekt Gebirgsinjektionen, Kontaktinjektionen und Spaltinjektionen vorgesehen.

Mit den Gebirgsinjektionen werden die ursprünglichen gebirgsmechanischen Eigenschaften wiederhergestellt und eine Reduktion der Durchlässigkeit des Gebirges erreicht. Außerdem wird durch die Herstellung des vollflächigen Kontaktes zwischen Gebirge und Spritzbetonsicherung (oder Tübbingauskleidung) bei Innendruckbelastung die Tragfähigkeit des Gebirges aktiviert. Die Gebirgsinjektion wird über Bohrlöcher in mehreren Phasen als sogenannte Dichtschott-, Primär-, Konsolidierungs- und Zusatzinjektion noch vor Einbau der endgültigen Auskleidung durchgeführt.

Für die Herstellung des kraftschlüssigen Kontaktes zwischen Ausbruchsicherung und Betonauskleidung wird die Kontaktinjektion (i.e. Firstspaltinjektion oder Blockhinterlegung) ausgeführt. Sie erfolgt mittels Packer über Verpressöffnungen in der Firste.

Für die Herstellung der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Stahlpanzerung und Hinterbetonierung oder zwischen Dichtfolie und Abdichtungsträger, wird als dritte Injektionsmaßnahme die Spaltinjektion ausgeführt. Wird diese dritte Injektionsmaßnahme genutzt, um eine Druckvorspannung der Betonauskleidung zu erzielen, spricht man von Vorspanninjektion. Sie erfolgt je nach Auskleidungstyp weitgehend über Manschetteneinjektionsschläuche und untergeordnet über Injektionsstutzen. Auch das Verpressen der Bergwasserabschlauchungen und Drainagen erfolgt im Zuge der Spaltinjektion.

### 2.2 *Injektionsanlage*

Beim Referenzprojekt wird eine sehr einfache Injektionsanlage verwendet, die ohne Aufwand manuell nachjustierbar ist. Die Anlage besteht aus zwei Einheiten mit Injektionspumpen, Turbomischer, Rührwerk und Registriersystem, die nahe dem Einpressort aufgestellt sind. Die Suspension wird im Turbomischer angerührt und nach Bedarf ins Rührwerk abgelassen. Dort wird die Mischung in Bewegung gehalten, bis sie von den Pumpen über Hydraulikschläuche und Packer in die Bohrlöcher oder mittels passenden Anschlüssen in die Manschettenschläuche gepresst wird.

Für die Gebirgsinjektion werden mechanische Packer mit für die Verpressöffnungen (Bohrloch oder Injektionsöffnung im Tübbing) passenden Durchmessern verwendet. Jede Anlage ist mit einer automatischen Durchflussmessung ausgestattet. Die Daten werden digital in das Registriersystem übertragen, mehrmals täglich vom Aufzeichnungscomputer auf einen USB-Stick übertragen und im Baubüro ausgewertet.

### 2.3 *Injektionsgut*

Das Injektionsgut muss nicht nur Stabilität gewährleisten, sondern ist beim Referenzprojekt auch auf den hohen Sulfatgehalt des Gebirges einzustellen. Als Bindemittel wird erhöht-sulfatbeständiger Portlandzement verwendet. Besonderes Augenmerk wird bei den Labortests nicht nur auf den Blaine-Wert des Bindemittels, sondern auch auf seine Sieblinie ( $d_{85}$ ,  $d_{95}$ ) gelegt. Auf Grundlage der Labortests wird eine Suspension mit geringerem W/B-Wert und Verflüssiger für geeignet empfunden, um die hohe Anforderung an das Absetzmaß auch vor Ort verlässlich zu erreichen. Diese Rezepturen werden in den Planungsunterlagen als Richtrezeptur empfohlen:

Tabelle 1. Richtrezepturen für Injektionsgut

|                                        |                      | Normalzement-<br>suspension   | Mikrozement-<br>suspension       |
|----------------------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Bindemittel                            | [-]                  | CEM I 42,5 R-SR 0<br>C3A-frei | Dyckerhoff<br>Microdur ultrafein |
| Blaine-Wert                            | [cm <sup>2</sup> /g] | 4.180                         | -                                |
| Rohdichte                              | [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.504                         | -                                |
| Sieblinie                              | [µm]                 | 26 (d <sub>85</sub> )         | 9,5 (d <sub>95</sub> )           |
| W/B                                    | [-]                  | 0,7                           | 0,95                             |
| Verflüssiger (BASF Glenium<br>SKY 707) | [% Susp]             | 0,4                           | 1,5                              |
| Absetzmaß nach 2 Stunden               | [%]                  | 5                             | -                                |
| Marshzahl                              | [s]                  | 30 – 35                       | 40 – 45                          |
| Druckfestigkeit (24h)                  | [N/mm <sup>2</sup> ] | 1,2                           | -                                |

## 2.4 Injektionsversuche

Injektionsversuche werden ausgeführt, um die grundsätzlichen Injektionsparameter festzulegen und Auswirkungen der geplanten Injektion auf das Gebirge beurteilen zu können. Als erste Maßnahme werden im Referenzgebirge WD-Tests mit unterschiedlichen Druckstufen (5, 10, 15, 20, 25 bar) durchgeführt. Dabei sollte sich zeigen, wann das Gebirge aufzureißen beginnt und schlagartig größere Wassermengen in den Gebirgskörper eindringen. Mit Hilfe der WD-Tests werden Lugeon-Werte ermittelt und die Heterogenität des Gebirges beurteilt. In weiterer Folge werden Versuchsfelder von rd. 20 m Länge für Gebirgsinjektionen ausgewählt. Die Stollenlaibung wird im vorgesehenen Raster von unten nach oben verpresst und der Injektionserfolg wiederum mit WD-Tests überprüft. Dabei sollte festgestellt werden, ob sich nach der Injektion, abhängig vom gewählten Druck oder GIN-Wert („Grout Intensity Number“ nach Lombardi), die Durchlässigkeit des Gebirges verändert. Ziel ist es, das ausgewählte Injektionsgut auf seine Eignung zu überprüfen und den max. Injektionsdruck, sowie den GIN-Wert für die Gebirgsinjektion (Konsolidierungs- und Abdichtungsinjektion) so festzulegen, dass ein Aufreißen des Gebirges vermieden wird.

## 3 GEBIRGSINJEKTION

Die Gebirgsinjektionen erfolgten noch vor dem Einbau der Auskleidung über Bohrlochinjektionen durch die Spritzbetonschale, oder wie im Falle des Referenzprojekts durch den Tübbingausbau des mittels Schildmaschine vorgetriebenen Schrägschachts. Grundsätzlich werden für einen Querschnitt mit rd. 5 m Durchmesser Injektionssterne mit 4 Bohrlöchern am Umfang gewählt, die im Abstand von 3 m um 45° verdreht angeordnet sind. Das Injektionskonzept sieht vier Injektionsphasen vor. Bei jeder nachfolgenden Injektionsphase wird das Injektionsraster immer weiter verdichtet:

1. Phase – Dichtschotts (D) werden mit dem Ziel, ein unkontrolliertes Vorlaufen des Injektionsgutes in Längsrichtung zu verhindern und den Stollen oder Schacht in einzelne Injektionsabschnitte zu unterteilen, über einen Doppel-Injektionsstern mit 5 m Bohrlochtiefe alle rd. 50 m angeordnet und mit einem Injektionsdruck von  $p_{\max} = 15$  bar verpresst. Kann die Gefahr einer allzu weiten Längsläufigkeit ausgeschlossen werden, wird auf diese Dichtschotts verzichtet.

2. Phase – Die Primärinjektion (P) wird mit dem Ziel ausgeführt, vorhandene Hohlräume zwischen Spritzbetonschale/Tübbing und Gebirge mit geringem Druck von  $p_{\max} = 5$  bar zu verfüllen. Primärinjektionen werden mit einer Bohrlochtiefe von rd. 1 m ausgeführt, damit auch die mit Spießschirmen durchhörte Stollenumgebung sicher mit Injektionsgut verfüllt wird.

3. Phase – Die Konsolidierungsinjektion (K) wird mit dem Ziel ausgeführt, Klüfte in der unmittelbaren Umgebung des Hohlraumes zu verpressen und die gebirgsmechanischen Eigenschaften zu verbessern. Sie erfolgt im Referenzprojekt mit einem Injektionsdruck von  $p_{\max} =$

15 bar und einer maximalen Injektionsmenge von 150 l/Bohrlochmeter. Konsolidierungsinjektionssterne werden mit einer Bohrlochtiefe von 3 m und gegenüber den Primärinjektionen längsversetzt ausgeführt.

4. Phase – Wird das Injektionsziel in einem Bohrloch nicht erreicht, werden über 4 weitere Bohrlöcher mit 3 m Länge Zusatzinjektionen (Z) mit einem Injektionsdruck von  $p_{\max} = 15$  bar und einer maximalen Injektionsmenge von 150 l/m um dieses Bohrloch herum ausgeführt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Injektionsziel in allen Bohrlöchern erreicht ist.

Zu Beginn der Injektion wird der Injektionsdruck in jedem Bohrloch langsam bis zum Maximalwert gesteigert, wobei anfänglich der max. Durchfluss mit 10 l/min begrenzt wird. Erst nach Erfahrungen mit entsprechenden Injektionsgutaufnahmen kann der Durchfluss auf bis zu 15 l/min erhöht werden. Zum Abschluss der Injektion gelten grundsätzlich für alle Gebirgsinjektionsphasen dieselben Abbruchkriterien:

- Injektionserfolg bei 5-minütigem Halten des maximalen Injektionsdrucks ( $p = p_{\max}$ )
- Injektionsabbruch bei Erreichen der maximalen Injektionsmenge ( $V = V_{\max}$ )

Für die Konsolidierungs- und Zusatzinjektion wird zusätzlich das Erreichen der GIN-Kurve als Abbruchkriterium eingeführt. Das Grundprinzip der GIN-Methode besteht darin, dass nicht nur der Injektionsdruck ( $p$ ) und die Menge ( $V$ ), sondern auch die Intensität der Injektion ( $p \cdot V = \text{GIN-Wert} = 500$  beim Referenzprojekt) begrenzt ist. Der Durchfluss und der Injektionsdruck werden in diesem Fall soweit reduziert, bis bei Erreichen des GIN-Wertes der Durchfluss quasi Null ist. Dadurch wird verhindert, dass sich große Injektionsmengen mit hohem Injektionsdruck überlagern, und ein Aufsprengen des Gebirges vermieden. Als Injektionserfolg wird in diesem Fall zumindest das Erreichen des halben Maximaldruckes gewertet. Wird die Injektion unterhalb dieses Wertes abgebrochen, werden Zusatzinjektionen angeordnet. Jede Injektionsphase ist durch die Volumenbegrenzung gut planbar und weit reichende „Endlosinjektionen“ an einzelnen Injektionsanschlüssen werden dadurch vermieden.

## 4 KONTAKTINJEKTION

### 4.1 Firstspaltinjektion

Die Kontaktinjektion wird auch als Firstspaltinjektion oder Blockhinterlegung bezeichnet. Sie dient dem Verschließen des Absatzspaltes zwischen dem Auskleidungsbeton und der Ausbruchsicherung, der vornehmlich in der Firste von flachen Stollen auftritt. Darüber hinaus werden Betonierfugen geglättet und Betonierneester an der Hinterseite der Auskleidung verfüllt. Daher wird die Kontaktinjektion im Referenzprojekt im Firstbereich der flachen Stollen, aber nicht im schrägen Druckschacht ausgeführt. Vertraglich gesehen gehört die Kontaktinjektion zu den Betonarbeiten und wird dort zumeist eingerechnet. Im Ablauf jedoch ist die Kontaktinjektion kaum von der Spaltinjektion zu trennen und wird auch genauso detailliert geplant.

Bei den betonausgekleideten Stollen wird das Injektionsgut über Injektionsöffnungen in die Kontaktfuge an der Hinterseite der Auskleidung gepresst. Im Regelfall sind entlang der Firste konische oder zylindrische Injektionsöffnungen mit rd. 50 mm Durchmesser im Längsabstand von rd. 3 m angeordnet.

Im Falle von gepanzerten Stollen werden Manschetteninjektionsschläuche in einer Schleife entlang der Firste des Ausbruchquerschnitts angeordnet. Die mit Hüllschläuchen umwickelten Ventilöffnungen werden an den Hochpunkten der Ausbruchsicherung fixiert, damit das Injektionsgut auch austreten kann. Beide Enden der Injektionsschläuche werden nebeneinander an Öffnungen in der Panzerung angeschlossen, damit die Injektion am Rückfluss des Injektionsguts überprüft werden kann.

Der Injektionsvorgang wird im Regelfall mit Normalzement durchgeführt. Nur bei keiner initialen Aufnahme von Injektionsgut wird auf Mikrozeementinjektion umgestellt. Injektionsöffnungen werden auf einer Länge von mind. 200 m mit Packer und Kugelhahn bestückt. Bei Injektionsaustritt in benachbarten Injektionsöffnungen wird der Kugelhahn geschlossen und der

Injektionsdruck gesteigert. Der maximale Injektionsdruck für die Kontaktinjektion beträgt 5 bar. Die Injektion gilt als beendet, wenn der vorgesehene Injektionsdruck von 5 bar gemäß Druck-/Mengenschreiber erreicht ist und die Injektionsgutaufnahme unter 0,5 l/min für mindestens 5 Minuten absinkt. Der Druck an der Pumpe kann für die Kontaktinjektion als Injektionsdruck gewertet werden, wenn der Standort der Pumpanlage nicht allzu weit vom Einspeisepunkt der Injektion entfernt ist. Injektionsaustritte an der Oberfläche der Betonauskleidung oder in Betonierfugen werden mit Fortschreiten der Injektion abgedichtet. Nach dem Aushärten des Verpressgutes und dem Entfernen der Packer wird der verbleibende Teil der Injektionsöffnungen mit schwindkompensiertem Mörtel verfüllt und die Öffnungen in der Panzerung mit Stopfen verschlossen.

## 4.2 Fugenausbildung

Es gibt verschiedene Arten von Fugenabdichtung, die bei der Kontakt- oder Spaltinjektion Verwendung finden. Bei der Tübbingauskleidung im Druckschacht wird beim Referenzprojekt eine Kombination aus Ringspaltmörtel und Fugendichtungsband zur Abdichtung eingesetzt. Bei den Ortbetonabschnitten werden Injektionsschläuche (e.g. SikaFuko mit 6 mm Injektionskanal) in den Blockfugen eingebaut. Diese werden vor Beginn der Kontaktinjektion mittels Verdämmung und Kunstharz (e.g. SikaDur 52, Typ N) verfüllt. Bei einer einfacheren Fugenabdichtung z.B. mittels Dichtungsband, muss ein größerer Abdichtungsaufwand während der Injektion in Kauf genommen werden.

## 5 SPALTINJEKTION

### 5.1 Verpressen der Bergwasserdrainagen

Die Bergwasserableitungen werden vorlaufend im Zuge der Spaltinjektion verpresst, da andernfalls entweder die Drainagen ungewollt verschlossen werden, oder kein ausreichender Druck für die Spaltinjektion aufgebaut werden kann. Sie werden mit demselben Druck verpresst, der auch für die Spaltinjektion vorgesehen ist. Zumindest wird jener Druck aufgebracht, der es erlaubt, das Injektionsgut bei der höher gelegenen Ableitung in den Stollen oder Schacht zu beobachten. Injektionsöffnungen werden rd. 200 m weit vorlaufend mit Packer bestückt. Bei Injektionsaustritt an der nächst höher gelegenen Injektionsöffnung wird dort der Kugelhahn geschlossen und der Injektionsdruck gesteigert. Es ist zu beachten, dass ab Verschluss der untersten Ausleitung, der Bergwasserdruck in den Drainageleitungen schnell ansteigt und diese gegen den Bergwasserdruck verpresst werden müssen. Die Injektion einer Bergwasserableitung gilt als beendet, wenn der vorgesehene Pumpendruck wie bei der Kontaktinjektion für die definierte Zeit gehalten wird. Die Injektion der Bergwasserableitung sollte möglichst ohne Unterbrechung in die Vorspanninjektion/Spaltinjektion übergehen (Injektion frisch in frisch).

### 5.2 Vorspanninjektion der Betonauskleidung

#### 5.2.1 Auslegung

Die Berechnung von Druckstollenauskleidungen aus Beton infolge der Innendruckbelastung wird anhand des analytisch-grafischen Verfahrens nach Seeber durchgeführt. Diese setzt eine dichte Auskleidung voraus, an welcher der Innendruck als hydrostatischer Druck angreift. Die Bemessung der Betonauskleidung erfolgt nach der Theorie des dickwandigen Rohres. Der Innendruck wird anteilig von der Auskleidung und vom Gebirge in Abhängigkeit der jeweiligen Steifigkeiten aufgenommen. Die unbewehrte Betonauskleidung kann wegen der geringen Zugfestigkeit des Betons nur einen kleinen Innendruck aufnehmen. Durch die Vorspanninjektion wird sichergestellt, dass die Auskleidung im Betriebszustand weitgehend spannungsfrei bleibt, oder unter leichter

Druckvorspannung steht. Eine Entlastung des Innendrucks durch den Bergwasserdruck wird bei der Auslegung nicht berücksichtigt.

Nach Seeber kann der Betonring für den Lastfall Injektionsdruck auf etwa 75 % – 85 % der Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Injektion belastet werden. Das übersteigt den im Hochbau üblichen Rahmen der Betondruckfestigkeit, ist aber für eine ausreichende Deformation des Querschnitts zur dauerhaften Vorspannung unabdingbar. Die technische Antwort ist daher ein empirisches Herantasten an die berechneten Grenzen durch Monitoring. Berechnet wird

- die dauerhaft vorhandene Injektionsvorspannung unter Berücksichtigung des Temperatur-, Schwind- und Kriechverhaltens bei der keine Radialzugspannungen in der Betonauskleidung zu erwarten sind,
- der maximale Injektionsdruck und die maximale Ovalisierung mit denen die Auskleidung belastet werden kann (idealerweise am 3-dimensionalen Modell mit den tatsächlich gemessenen Wanddicken anhand eines vergleichenden Oberflächenscans vor und nach dem Einbau der Betonauskleidung), sowie
- ein erforderlicher Injektionsdruck und eine erforderliche durchschnittliche Radialverformung, die während der Vorspanninjektion gemessen werden sollten, um den Injektionserfolg für eine dauerhaft rissfreie Betonauskleidung nachzuweisen.

### 5.2.2 *Detailausführung und Einbau*

Für die Vorspanninjektion werden Manschetteninjektionsschläuche im Abstand von rd. 3 m als Ringschläuche über den Umfang des Spritzbetongewölbes / der Felsoberfläche verlegt. Diese bestehen aus einem ½ Zoll PE Schlauch, der alle 1,5 Meter mit einem Schlauchventil (Manschette aus EPDM, Shorehärte A 70°, 15 cm lang mit 10 Bohrungen, Durchmesser 4 mm im Schlauch) ausgestattet ist. Die Injektionsschläuche werden jeweils mittels vorgefertigten Schlauchdurchführungen (Formstücke) durch eine eventuell vorhandene Dichtfolie geführt. Im Bereich der Durchführungen werden die Schläuche dicht verklebt und mit Schlauchklemmen fixiert.

Die Injektionsschläuche werden in Hüllschläuchen (PVC-Folie, Dicke 0,15 mm, Umfang 600 mm) verlegt. Die Hüllschläuche werden in 20 cm Abständen perforiert und ebenflächig mitsamt den Injektionsschläuchen alle 1,5 Meter befestigt. Die offenen Enden der Hüllschläuche werden mit Dichtungsband an die Injektionsschläuche geklebt und verschlossen.

Falls im Sohlbereich keine Injektionsschläuche angeordnet sind (wegen z. B. Betonfertigteilen oder Schwerverkehr), werden dort vertikale Injektionsstutzen in ähnlichem Abstand vorgesehen. Jeder Injektionsstutzen besteht aus einem ½ Zoll Rohr, das an einem Folienlappen (rd. 300 mm x 300 mm) endet, damit sich das Injektionsgut initial verteilen kann.

Gemeinsam mit den Injektionsschläuchen werden Injektionssperren im Längsabstand von rd. 10 m (eine Injektionssperre je Betonierabschnitt) an der Spritzbetonschale / Felsoberfläche befestigt, damit sich das Injektionsgut nicht ungehindert in Längsrichtung verteilen kann. Als Injektionssperren werden Vlieswulste (rd. 200 mm breit) vollumfänglich und satt anliegend an die Spritzbetonschale angeschossen.

### 5.2.3 *Injektionsablauf*

Die Einpressarbeiten für die Vorspanninjektion selbst werden zwingend im Durchlaufbetrieb, möglichst ohne Unterbrechung, in eine Richtung fortschreitend, ausgeführt, da die Vorspannwirkung davon wesentlich abhängt. Die Injektionsanschlüsse werden vor Ausführung der Vorspanninjektion mind. 200 m weit vorlaufend mit Kugelhähnen bestückt. Diese werden während der Injektion zur Beurteilung des Injektionsfortschrittes offen gehalten und bei Austritt von Zementsuspension sukzessive verschlossen, um Injektionsdruck aufbauen zu können. Vor dem Verpressen wird der Wasserdruck an wasserführenden Injektionsanschlüssen gemessen und ein Injektionsdruck gewählt, der den gemessenen Druck übersteigt. Der gewählte Injektionsdruck wird durch den von der Auskleidung bestimmten zulässigen Injektionsdruck begrenzt.

Die Injektion beginnt mit dem Verpressen der Sohle. Dieser Injektionsvorgang erfolgt gemeinsam mit dem Verpressen der Bergwasserableitungen vorlaufend zur Vorspanninjektion im Gewölbe, damit größere Mengen an Injektionsvolumen den Fortschritt der Vorspannung nicht allzu sehr aufhalten. Der Vorlauf des Verpressens der Bergwasserableitungen und der Sohlinjektion zu der im Gewölbe durchgeführten Vorspanninjektion kann abhängig von den Injektionsmengen 1 bis 10 Blocklängen betragen. Der maximale Pumpendruck für die Sohlinjektion beträgt rd. 5 bar weniger als der für die Vorspanninjektion vorgesehene Maximaldruck, damit sich der Injektionsfluss nicht in die Gegenrichtung kehrt. Die Injektion jeder Bergwasserableitung und eines jeweiligen Sohlinjektionsstutzen gilt als beendet, wenn der vorgesehene Pumpendruck erreicht ist, und soll möglichst ohne Unterbrechung in die Vorspanninjektion des Gewölbes übergehen (frisch in frisch). Allfällig noch vorhandene Injektionsaustritte an der Oberfläche der Betonauskleidung oder über Betonierfugen müssen mit fortschreitendem Injektionsvorgang abgedichtet werden.

Der initiale Injektionsvorgang für die Vorspanninjektion im Gewölbe wird bei trockenen Injektionsanschlüssen mit Mikrozzement durchgeführt. Nach dem Verpressen einer bestimmten Suspensionsmenge pro Schlauch (begrenzt mit z. B. 200 l) wird die Injektion auf Normalzement umgestellt. Bei wasserführenden Injektionsanschlüssen, oder solchen, die leicht durchgängig sind, kann die Injektion sofort mit Normalzement begonnen werden. Die Injektion beginnt mit dem Füllen zweier aufeinander folgender Ringschläuche. Bei Injektionsaustritt am anderen Ende wird der Kugelhahn geschlossen und der Injektionsdruck gesteigert. Der initiale Druck kann für geringe Injektionsmengen und kurze Zeit auf einen festgelegten Aufreißdruck (der ein Vielfaches des gewählten Enddrucks beträgt) gesteigert werden bis Injektionsgut zu fließen beginnt. Bei sehr geringen Durchflussraten wird der Schlauch regelmäßig gespült und die Injektionspumpe gegebenenfalls auch am anderen Ende des Injektionsschlauches angeschlossen.

Es kann vorkommen, dass Austritte des Injektionsguts bei offenen Packern bis zu 200 m vor der Injektionsstelle erfolgen. Eine solche Übertrittsstelle muss ohne die Injektion zu unterbrechen geschlossen oder abgedichtet werden. Sind Injektionsschläuche von Übertritten betroffen, werden diese regelmäßig mit Wasser gespült, um ein vorzeitiges Verstopfen zu vermeiden. Eine längere Unterbrechung etwa infolge von Leitungsstopfern oder eines Pumpenausfalls muss durch entsprechende Vorkehrungen vermieden oder schnellstens behoben werden. Wenn die Injektion trotzdem unterbrochen werden muss, wird der Injektionsschlauch mit Wasser gespült, sowie eine geringe Menge Wasser eingepresst (rd. 5 l), um den Nahbereich der Manschetten freizulegen, damit die Injektion zu einem späteren Zeitpunkt fortgesetzt werden kann. Beim Fortsetzen der Injektion nach initialem Aushärten des Injektionsguts wird, wie beim Beginn eines neuen Injektionsvorgangs, zuerst mit Mikrozzementsuspension injiziert.

Bis eine Reaktion der Betonauskleidung in Form von geringen Verformungen gemessen wird, kann der Injektionsdruck bei 15 bis 20 bar liegen und eine hohe Durchflussrate von 10 bis 15 l/min zugelassen werden. Zusätzlich zur Druckmessung am Manometer beim Injektionsanschluss und an der Pumpe, wird in regelmäßigen Abständen über die „Passive Injektionsdruckmessung“ der wirksame Injektionsdruck ermittelt (Injektionspumpe abstellen, 20 s warten, Druckabfall ablesen), um den Injektionsverlauf zwischenzeitlich abschätzen zu können. Das Ziel der Vorspanninjektion ist es, die festgelegte Mindestradialverformung in jedem Injektionsabschnitt zu erreichen. Für eine herkömmliche Spaltinjektion (ohne Vorspannungskriterium) reicht es, den festgelegten maximalen Injektionsdruck nach Unterschreiten einer Suspensionsaufnahme von 0,5 l/min mindestens 5 Minuten zu halten. Wenn die Injektion beim letzten der aufeinander folgenden Ringschläuche beendet ist, wird der Injektionsanschluss auf den nächsten freien Ringschlauch umgestellt, ohne die bereits angeschlossenen Injektionen zu unterbrechen (überlappender Injektionsfortschritt).

Die eingepressten Injektionsmengen (Mengenschreiber), der Injektionsdruck und der Durchfluss werden bei der Vorspanninjektion aufgezeichnet und für jeden einzelnen Injektionsabschnitt ausgewertet. Um sicher zu gehen, dass die Vorspannung der Stollenauskleidung überall wirksam ist, werden injektionsbegleitend Verformungsmessungen durchgeführt. Dabei wird die mittlere Radialverformung und die Ovalisierung in mehreren Querschnitten (idealerweise mit einem Oberflächenscanner) gemessen. Die Wiederholungsgenauigkeit der Deformationsmessung sollte bei rd. 0,1 mm liegen, die Messdaten alle 10 min. zur Verfügung stehen. Beim Erreichen der festgelegten Radialverformung wird die Vorspanninjektion erfolgreich beendet. Bei Erreichen der maximal zulässigen Ovalisierung wird die Injektion abgebrochen und individuell bewertet.

### 5.3 Spaltinjektion der Panzerung

#### 5.3.4 Auslegung

Die Auslegung der Panzerung beruht auf der Bemessung für ein Stahlrohr, das in Fels gebettet ist. Der Raum zwischen Stahlpanzerung und Felssicherung wird mit Beton hinterfüllt. Der verbleibende Schwindspalt zwischen Panzerung und Beton wird mit Injektionsgut verpresst. Die Felsbettung des Verbundsystems Stahl-Beton-Fels wird nach Seeber mit einem im Großversuch (Radialpresse) bei Betriebsbelastung ermittelten Verformungsmodul  $V_f^*$  berücksichtigt. Für die Bemessung wird bis zu 60 % der Dehngrenze des Rohrstahts ausgenützt. Der Stahl darf beim Referenzprojekt auch ohne Berücksichtigung der Felsbettung rechnerisch nicht plastifizieren. In der Berechnung wird sicherheitshalber ein Spaltmaß von  $(0,001 * \text{Rohrradius } r)$  vor der Spaltinjektion und immerhin noch  $(0,0003 * r)$  nach der Spaltinjektion berücksichtigt. Die Dicke der Panzerung wird auf Grundlage von Innendruck und Bergwasserdruck bestimmt. Zusätzlich wird untersucht, ob der zulässige Injektionsdruck in einer sinnvollen Größenordnung (z.B.  $\geq 10$  bar) liegt.

#### 5.3.5 Detailausführung und Einbau

Die Spaltinjektion zwischen Panzerung und Hinterfüllbeton erfolgt über Manschettenschläuche. Bei jedem 9 m bis 15 m langen Rohrschuss werden vier Injektionsschläuche spiralförmig an der Rohraußenseite angebracht. Diese werden nach einer Vierteldrehung am Rohrumfang über verschraubbare Injektionsöffnungen jeweils am Ende des Rohrschusses wieder an  $\frac{1}{2}$  Zoll Öffnungen in der Rohrwand angeschlossen. Wie bei der Vorspanninjektion bestehen die Injektionsschläuche aus  $\frac{1}{2}$  Zoll PN 16 Schläuchen, die alle 1,5 Meter mit Schlauchventilen versehen sind. Jeder Injektionsschlauch ist nahe dem Schlauchventil mit einer Befestigungsglasche aus Stahl an die Rohrwand geklebt, um beim Betonieren in Position gehalten zu werden. Eine zusätzliche Firstöffnung in der Panzerung am Ende eines jeden Rohrschusses dient als Kontrollöffnung, über welche der Injektionsfortschritt beobachtet wird.

#### 5.3.6 Injektionsablauf

Die Injektion wird blockweise durchgeführt, d.h. alle vier Schläuche werden jeweils mit einer eigenen Pumpe druckbeaufschlagt. Dabei wird der Druck bei allen vier Pumpen möglichst gleichzeitig erhöht. Je nach Beulfestigkeit der Panzerung werden beim Referenzprojekt Injektionsdrücke bis zu 25 bar erreicht. Der Injektionserfolg wird über 5 min. Haltedauer des vorgesehenen Maximaldruckes bei Durchfluss  $< 0,5$  l/min. nachgewiesen.

Bei trockenen Injektionsanschlüssen wird die Injektion wiederum mit Mikrozement begonnen. Nach größeren Suspensionsaufnahmen ( $> 200$  l/Injektionsschlauch) erfolgt die Umstellung auf Normalzement. Wird für den zu injizierenden Bereich insgesamt jedoch eine geringe Aufnahme prognostiziert (z.B. in Bereichen mit dichter Tübbing-Vorauskleidung) so kann die gesamte Injektion mit Mikrozement durchgeführt werden. Mikrozement bringt gegenüber einer Normalzementsuspension den Vorteil, dass ein vollständiges Verfüllen des Spaltes mit geringerem Druck möglich ist.

Unter den Sohlbereich der Panzerung wird aufgrund der Einbausituation (Auflagersättel, Hohlstellen etc.) mehr Zementsuspension eingebracht als in Firste und Kämpfer. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Injektionsdauern von 1 h bis 7 h pro Injektionsanschluss.

## 6 FAZIT

Auf Grundlage einer 100 jährigen Erfahrung mit der Erhaltung, wird bei der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) ein umfassendes Injektionsprogramm beim Bau von Triebwasserwegen bevorzugt durchgeführt, das im Falle des Neubaus des Druckschachtes für das Kaunertalkraftwerk, aus Gebirgsinjektion, Kontaktinjektion, Spaltinjektion der Panzerung und Vorspanninjektion der

Betonauskleidung besteht. Trotz des großen Aufwands macht sich die Injektion für den Betreiber der Kraftwerksanlagen durch eine Erhöhung der Dichtheit der Druckstollen, geringen Erhaltungsaufwand im Betrieb und lange Lebensdauer des Auskleidungssystems bezahlt.

## LITERATUR

- Bonapace, P. 2014. *Injektionsarbeiten beim Neubau des Druckschachts für das Kaunertalwerk – Erfahrungsberichte*, BHM, 159. Jg. (2014) Heft 12, S. 481-489, Springer Verlag: Wien.
- Lombardi, G. & Deere, D. 1993. *Grouting design and control using the GIN principle*, Water Power & Dam Construction, June 1993, pp. 15-22.
- Seeber, G. 1999. *Druckstollen und Druckschächte*, ENKE, Georg Thieme Verlag.