Kurt Kogler
Johann Hechenbichler
Patrick Gabriel

DOI: 10.1002/geot.201800069

# Grouting measures in dam construction

# Injektionsmaßnahmen im Talsperrenbau

Grouting measures in dam construction are of increasing importance in Europe, where many of the largest dams were constructed during the 1950s and 1970s. Nowadays, these dams often have to resist higher loads then they were originally designed for, and changes of reservoir management have increased loads on the structures in many cases. For this reason, many plant operators have decided to adapt dam structures for present-day use, to increase sustainability and guarantee serviceability. At the same time, the construction of new dams requires comprehensive planning as well as full cooperation between all areas of civil engineering and grouting technology. Grouting works are key elements of dam structures, which are usually not directly visible from the surface and therefore seldom perceived by the public. This paper gives an insight into the possibilities of grouting measures in dam construction and a brief overview of objectives of grouting measures and their assignment to components of dams as well as grouting measures for waterproofing curtains, pressure tunnels, pressure shafts, surge tanks and porous mass concrete.

*Injektionsmaßnahmen im Talsperrenbau gewinnen durch die erforderlich gewordene Ertüchtigung von bestehenden Anlagen wieder zunehmend an Bedeutung in Europa. Durch moderne Methoden der Speicherbewirtschaftung (Pumpspeicherwerke) und daraus resultierende hohe dynamische Lasten über die Lebensdauer der Anlagen wurde es notwendig, die in den 1950er- und 1970er-Jahren gebauten Anlagen dem aktuellen Stand der Technik anzupassen. Gleichzeitig ist beim Bau neuer Talsperren eine umfassende Planung von Injektionsmaßnahmen sowie eine Zusammenarbeit aller Bereiche der Ingenieurwissenschaften mit der Injektionstechnik notwendig. Injektionen sind dabei ein wesentlicher Bestandteil von Sperrbauwerken, die in der Regel von der Oberfläche nicht sichtbar sind und somit selten von der Öffentlichkeit wahrgenommen werden. Der Beitrag gibt Einblick über die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten von Injektionsmaßnahmen im Talsperrenbau und behandelt hierbei die Funktionen von Injektionsmaßnahmen und deren Anlagezuordnung im Kraftwerksbau, die Injektion von Dichtschirmen, Druckstollen, Druckschächten und Sperrbauwerken aus Massenbeton.*

## 1 Introduction

Dams are always a unique solution regarding their foundation conditions, geological and hydrogeological conditions, which demands the collaboration of all branches of civil engineering like structural engineering, water construction, concrete technology, foundation engineering, soil mechanics, engineering geology, hydraulics and hydrology. But inter-professional collaboration is not only important for the construction of a dam – dams demand continuous checking and assessment by engineers over their entire lifetime. The loads on a dam normally acts over a very long time span, resulting not only from changeable water loads but also in some cases due to an exposed location in the Alps. Dams not infrequently have to be subjected to the first improvements after some decades (Figure 1).

In the 1950s and 1970s, Europe experienced a boom in the new construction of hydropower stations. In this period, many of the largest dams in Europe (and also worldwide) were built. Today, these dams and headraces of high-pressure systems often have to resist much higher loads than they were originally designed for. In many cases, this is due to a change of the reservoir management and changed conditions for the generation of electricity and mains network maintenance. High hydraulic loads

## 1 Einleitung

Talsperren sind hinsichtlich Gründungsverhältnisse, geologischen und hydrogeologischen Rahmenbedingungen immer eine Einzellösung, die eine Zusammenarbeit aller Bereiche des Bauingenieurwesens wie Baustatik, Wasserbau, Betonbau, Grundbau und Bodenmechanik, Ingenieurgeologie, Hydraulik und Hydrologie erfordert. Jedoch nicht nur beim Bau einer Talsperre ist eine fachübergreifende Zusammenarbeit wichtig – Talsperren erfordern in ihrer gesamten Lebensdauer eine laufende ingenieurmäßige Überprüfung und Beurteilung. Die Belastungen einer Talsperre treten in der Regel über sehr lange Zeiträume auf, die sich nicht nur aus den veränderbaren Wasserlasten ergeben, sondern auch zum Teil aus den sehr exponierten Lagen im alpinen Raum. Nicht selten müssen diese Talsperren nach Jahrzehnten des Betriebs dann den ersten Ertüchtigungen unterworfen werden (Bild 1).

In den 1950er- und 1970er-Jahren erlebte Europa einen Boom an Neubauten von Wasserkraftwerken. In dieser Zeit wurden viele der größten Talsperren Europas (und auch weltweit) gebaut. Heutzutage müssen diese Talsperren und Triebwasserwege von Hochdruckanlagen oftmals größere Lasten aufnehmen können als jene, für die sie ursprünglich konzipiert wurden. In vielen Fällen liegt dies an einer Änderung des Speichermanagements

© 2019 Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin

*Fig. 1. Grout curtain injection, Gr. Mühldorfer See dam (Verbund Hydro Power GmbH)*
*Bild 1. Dichtschirminjektion, Sperre Gr. Mühldorfer See (Verbund Hydro Power GmbH)*

over recent decades have also left their traces on the waterproofing measures carried out at that time.

The following explanations regarding grouting works are intended to provide an overview of the requirements for grouting works to dams. Grouting normally covers several functions, since for example a clear separation of waterproofing and ground improvement measures is only possible to a limited extent.

### 1.1 Reduction of water loss

Before the construction of a dam, extensive soil investigation and water pressure tests (Lugeon tests or WPT) will be carried out to determine the permeability of the ground. This test returns the water absorption capacity of the rock mass or subsoil depending on the hydraulic pressure conditions.

The results (expressed in Lugeon = 1 l water absorption of the ground per minute and 1 m of borehole length under a pressure of 1 MPa or 10 bar) serves several purposes including the specification of the necessary waterproofing measures in the ground. These waterproofing measures range from grout curtains to the sealing of water transport routes like pressure tunnels, pressure shafts and surge tank structures.

### 1.2 Relief of water pressure in the dam and the ground

In addition to the verification of overturning and sliding safety, dams have to ensure the appropriate relief of invert water pressure, with the pressure relief being appropriate for the type of dam and the geological conditions underground. The pressure relief takes place in different construction elements and areas depending on the type of dam. Figures 3 and 4 show diagrams of the pressure relief for various types of dam.

#### 1.2.1 Relief of invert water pressure with grout curtain and drainage

With a functioning grout curtain and the provision of drainage on the air side of the plane of the grout curtain,

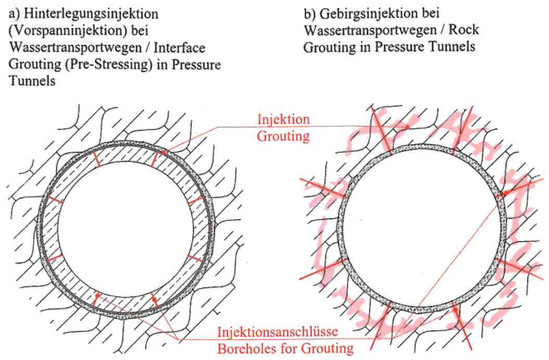



*Fig. 2. Grouting measures of water transport routes*
*Bild 2. Injektionsmaßnahmen von Wassertransportwegen*

und geänderten Anforderungen der Bereitstellung von Energie sowie der Netzerhaltung. Hohe hydraulische Lasteinwirkungen über die letzten Jahrzehnte haben außerdem ihre Spuren an den damaligen Abdichtungsmaßnahmen hinterlassen.

Die nachfolgenden Erläuterungen hinsichtlich der Ausführung von Injektionen sollen einen Überblick geben, welche Anforderungen an Injektionsmaßnahmen bei Talsperren gestellt werden. Injektionen bilden dabei zumeist mehrere Funktionen ab, da beispielsweise eine klare Trennung von abdichtenden und verfestigenden Maßnahmen nur bedingt möglich ist.

### 1.1 Reduktion des Wasserverlustes

Vor dem Bau einer Talsperre werden umfangreiche Bodenerkundungen und Wasserabpressversuche (Lugeon-Tests oder WPT) zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Untergrunds ausgeführt. Dieser Versuch gibt dabei die Wasseraufnahmefähigkeit des Gebirges oder des Untergrunds in Abhängigkeit von hydraulischen Druckverhältnissen an.

Die Ergebnisse (angegeben in Lugeon = 1 l Wasseraufnahme des Gebirges je Minute und 1 m Bohrlochlänge bei einem Druck von 1 MPa oder 10 bar) dienen unter anderem zur Festlegung der erforderlichen Abdichtungsmaßnahmen im Untergrund. Diese Abdichtungsmaßnahmen reichen von Dichtschirmen bis hin zur Abdichtung von Wassertransportwegen wie Druckstollen, Druckschächte und Wasserschlossbauwerke.

### 1.2 Abbau des Wasserdrucks in der Talsperre und im Untergrund

Talsperren müssen neben den Nachweisen der Kipp- und Gleitsicherheit einen entsprechenden Abbau des Sohlwasserdrucks gewährleisten. Der Druckabbau muss dabei dem Talsperrentyp und den geologischen Verhältnissen im Untergrund entsprechen. Der Druckabbau findet je nach Sperrentyp in unterschiedlichen Bauteilen und Bereichen statt. In den Bildern 3 und 4 ist der Druckabbau bei verschiedenen Talsperrentypen schematisch dargestellt.





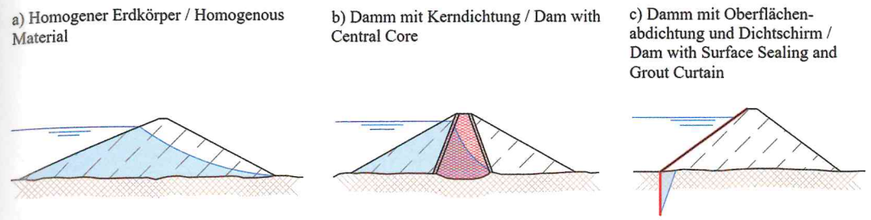



*Fig. 3. Relief of water pressure to a dam: a) homogeneous material; b) dam with central core (red); c) dam with surface sealing (rot) and grout curtain (red); based on [1] [2]*
*Bild 3. Abbau des Wasserdrucks bei Staudämmen: a) homogener Erdkörper; b) Damm mit Kerndichtung (rot); c) Damm mit Oberflächenabdichtung (rot) und Dichtschirm (rot); in Anlehnung an [1] [2]*

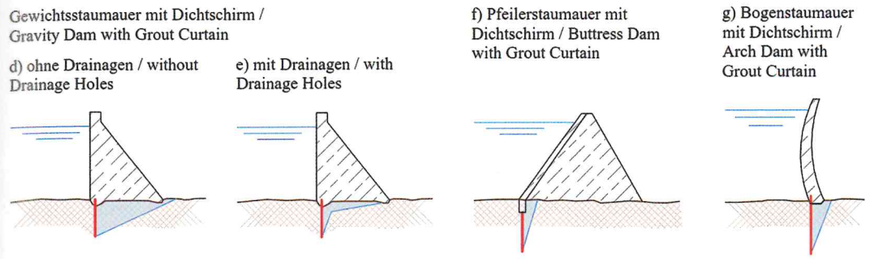



*Fig. 4. Relief of water pressure to dams d) gravity dam with grout curtain (red) without drainage holes; e) gravity dam with grout curtain (red) with drainage holes; f) buttress dam with grout curtain (red); g) arch dam with grout curtain (red); based on [1] [2]*
*Bild 4. Abbau des Wasserdrucks bei Staumauern: d) Gewichtsstaumauer mit Dichtschirm (rot) ohne Dränagen; e) Gewichtsstaumauer mit Dichtschirm (rot) mit Dränagen; f) Pfeilerstaumauer mit Dichtschirm (rot); g) Bogenstaumauer mit Dichtschirm (rot); in Anlehnung an [1] [2]*

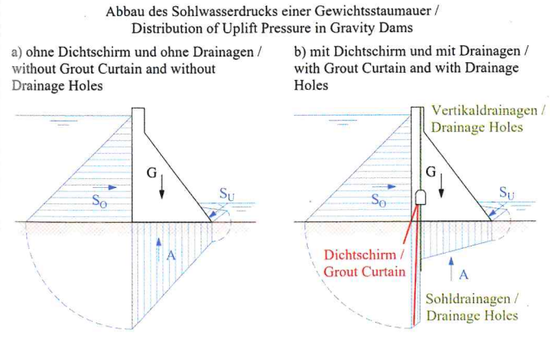



*Fig. 5. Relief of invert water pressure in a gravity dam: a) without grout curtain and without drainage; b) with grout curtain and drainage; based on [1] [2]; G – self weight of the dam, A – uplift through grout curtain/uplift reduced by grout curtain and drainage, $S_O$ –pressure on dam from headwater, $S_U$ –pressure on dam from tailwater*
*Bild 5. Abbau des Sohlwasserdrucks in einer Gewichtsstaumauer: a) ohne Dichtschirm und ohne Dränagen; b) mit Dichtschirm und Dränagen; in Anlehnung an [1] [2]; G – Eigengewicht der Mauer, A – Auftrieb/durch Dichtschirm und Dränagen abgeminderter Auftrieb, $S_O$ – Staudruck vom Oberwasser, $S_U$ – Staudruck vom Unterwasser*

the invert pressure under the dam can be prevented or at least reduced to the structurally acceptable magnitude. Figure 5 shows a diagram of the relief of invert water pressure under a gravity dam.

#### 1.2.1 Abbau des Sohlwasserdrucks durch Dichtschirm und Dränage

Mit einem funktionstüchtigen Dichtschirm und einer Anordnung von Dränagen luftseitig der Dichtschirmebene kann der Sohlwasserdruck unterhalb der Mauer unterbunden oder zumindest auf das statisch notwendige Maß reduziert werden. In Bild 5 ist der Abbau des Sohlwasserdrucks einer Gewichtsstaumauer schematisch dargestellt.

Der Dichtschirm und die Sohldränagen verringern den Sohlwasserdruck, der von unten auf die Mauer wirkt. Dichtschirme werden in der Regel bis in Tiefen von 30 % der Mauerhöhe bei Erfordernis bis zu 100 % der Mauerhöhe ausgeführt.

#### 1.2.2 Abbau des Fugenwasserdrucks bei Durchströmung der Mauer

Wenn eine Staumauer eine unzureichende Dichtigkeit aufweist und durchströmt wird, verringert sich der statisch wirksame Anteil des Eigengewichts des durchströmten Teils der Mauer. Dies kann zur Folge haben, dass die Staumauer den Nachweis der Auftriebssicherheit nicht mehr erfüllt.

Einzelne Blöcke (getrennt durch Blockfugen und Längsfugen) sollen eine gegenseitige Verschiebung durch Verformungen infolge Kriech-, Schwindvorgängen und Temperaturänderungen aufnehmen können. Aus diesem Grund ist in der Praxis immer ein Kompromiss zwischen Bewegungsfreiheit und geringer Durchströmung (Dichtheit) der Mauer zu finden.

The grout curtain and the invert drainage reduce the invert water pressure acting on the dam from below. Grout curtains are typically carried out down to depths of 30 % of the dam height, but if required as deep as 100 % of the dam height.

### 1.2.2 Relief of joint water pressure of flow through the dam

If a dam is insufficiently watertight and water flows through it, this reduces the structurally effective share of the self weight of the part of the dam that water flows through. This can have the consequence that the dam can no longer be successfully verified for uplift safety.

Individual blocks (separated by block joints and longitudinal joints) should be able to resist displacement relative to each other due to creep and shrinkage processes and temperature changes. For this reason, practical design is always a compromise between freedom of movement and reduction of flow through (watertightness) of the dam.

Block joints are frequently subjected to positive pressure by grouting or carried out with suitable ductile grouts as movement joints (Figure 6). In order to reduce the pore water pressure in the dam itself, vertical drainage is often provided.

### 1.3 Consolidation of the ground

Consolidation of the ground basically serves to fill the pores with grout, to cement the grain structure of the soil and thus increase its shear strength and reduce its compressibility. The structure is largely preserved with this form of grouting. Compensation and waterproofing grouting are of rather less significance in dam building [3].

## 2 Grout curtains

In order to seal the subsoil for barriers and dams, grouting measures are often carried out in order to create grout curtains. These are installed under the formation of the dam structure and are designed according to the requirements of hydraulic pressure head from the reservoir and the geological situation in the ground. The extent of the grout curtain is normally limited by the valley flanks on both sides [4] [5] [6].

The requirements for a continuous plane of waterproofing and the need to form the grout curtain corresponding to the section length of the elements of the dam to be waterproofed often leads to the grout curtain being installed from control or grouting galleries. Further variants are the placing of the grout curtain axis in the area of water-side plinths or a base slab on the water side.

### 2.1 Drilling grouting holes

For most grouting holes to be drilled in solid rock, the smallest possible diameter is preferred depending on the drilling system used. This can in many cases be due to the advantages of simpler handling of the equipment and machinery, both for the drilling work and the grouting work. The requirement also follows from the mostly restricted space available with continuous clear gallery dimensions of about 2 m × 2.5 m (Figure 7).

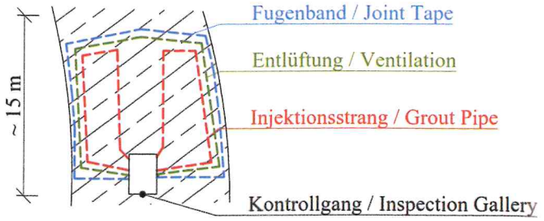



*Fig. 6. Possibilities of grouting block joints; based on [1] [2]*
*Bild 6. Möglichkeit einer Injektion von Blockfugen; in Anlehnung an [1] [2]*

Blockfugen werden häufig durch Injektionen überdrückt oder mit geeigneten duktilen Injektionsmaterialien als Bewegungsfugen ausgeführt (Bild 6). Zur Reduktion des Porenwasserdrucks in der Mauer selbst werden häufig Vertikaldränagen angeordnet.

### 1.3 Verfestigung des Untergrunds

Eine Verfestigung des Untergrunds dient grundsätzlich dazu, den Porenraum mit Injektionsgut zu verfüllen, das Korngerüst des Bodens zu verkitten und dadurch die Scherfestigkeit zu erhöhen sowie die Zusammendrückbarkeit zu vermindern. Die Struktur bleibt bei dieser Form der Injektion weitgehend erhalten. Verdrängungs- und Verdichtungsinjektionen spielen im Talsperrenbau eine eher untergeordnete Rolle [3].

## 2 Dichtschirme

Zur Abdichtung des Untergrunds bei Sperren- und Dammbauwerken werden vielfach Injektionsmaßnahmen zur Herstellung sogenannter Dichtschirme oder Dichtschleier angewendet. Diese, unterhalb der Aufstandsfläche des Sperrbauwerks angeordneten, flächigen Vergütungen des Untergrunds, ergeben sich entsprechend der Erfordernisse aus hydraulischer Druckhöhe aus dem Speicherraum und geologischer Situation in den Untergrund. Die Längsausdehnung des Dichtschirms wird dabei zumeist durch die beidseitigen Talflanken begrenzt [4] [5] [6].

Die Forderung nach einer möglichst durchgängigen Dichtebene führt dazu, dass Dichtschirme entsprechend der Querschnittslage des dichtenden Elements der Talsperre häufig aus Kontroll- bzw. Injektionsgängen hergestellt werden. Weitere Varianten bestehen durch Anordnung der Dichtschirmachse im Bereich von wasserseitigen Sockelausbildungen oder Vorböden.

### 2.1 Injektionsbohrungen

Für die zumeist im Festgestein herzustellenden Injektionsbohrungen werden, entsprechend dem verwendeten Bohrsystem, möglichst geringe Bohrdurchmesser angestrebt. Dies kann in vielen Fällen durch die einfachere Handhabung von Ausrüstung und Geräten sowohl bei der Herstellung der Bohrungen als auch bei den Injektionsarbeiten begründet werden. Diese Forderung ergibt sich meist zufolge beengter Platzverhältnisse durch gängige lichte Kontrollgangquerschnitte von ca. 2 m × 2,5 m (Bild 7).





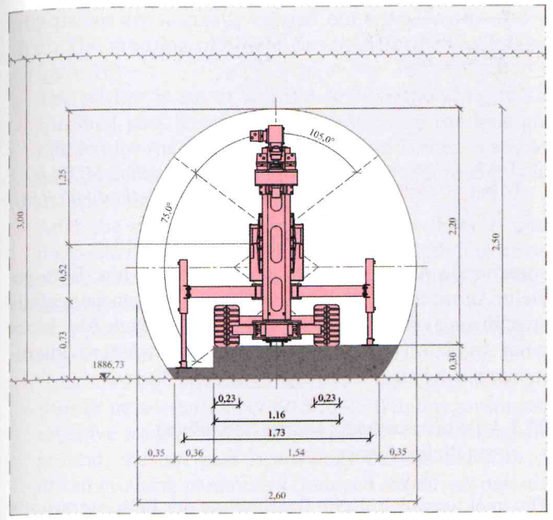



*Fig. 7. Drill rig in control gallery*
*Bild 7. Bohrgerät in Kontrollgang*

In order to drill grouting holes, rotary core drilling and destructive rotary percussive drilling can be differentiated. With both processes, presuming the holes are drilled in solid rock, uncased drilling is preferred. The selection of cased drilling would mean unstable holes and thus have a significant effect on the grouting measures. Such grouting methods will not be dealt with here since they do not belong to the classic process of rock grouting.

The holes are normally drilled inside the planned waterproofing plane. Boreholes are generally drilled vertically. At the valley flanks, or in the case of requirements resulting from the geological situation like for example steeply dipping jointing/cleavage, inclined drilling inside the plane of waterproofing can also be suitable (Figure 8).

### 2.2 Grout curtain injection

According to the drilling sequence, grouting is categorised into the phases of primary, secondary and if required also tertiary and quaternary grouting. This procedure is largely based on the regular spacing of the holes for the individual grouting phases. At the start, when the primary holes are grouted, the adjacent holes have the largest planned

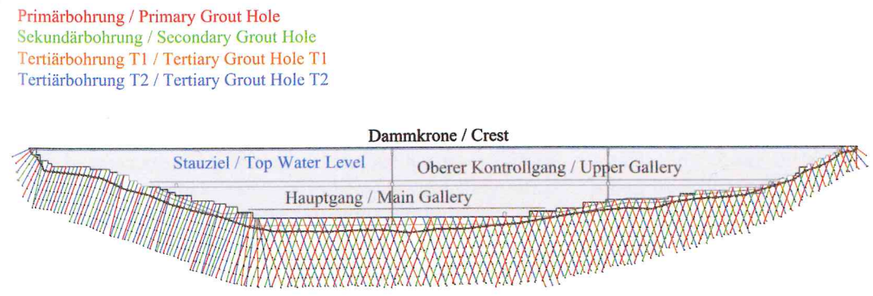



*Fig. 8. Elevation of grout curtain Gr. Mühldorfer See dam (Verbund Hydro Power GmbH)*
*Bild 8. Ansicht Dichtschirm, Sperre Gr. Mühldorfer See (Verbund Hydro Power GmbH)*

Zur Herstellung von Injektionsbohrungen kann grundsätzlich zwischen Rotationskernbohrungen und zerstörenden Drehschlagbohrungen (Hammerbohrungen) unterschieden werden. Beiden Verfahren ist gleich, sofern von standfestem Festgestein ausgegangen werden kann, dass vornehmlich unverrohrte Bohrsysteme zur Ausführung gelangen. Die Wahl von verrohrten Bohrverfahren würde auf instabile Bohrlochverhältnisse schließen lassen und somit einen wesentlichen Einfluss auf die Injektionsmaßnahme bedeuten. Diese Injektionsmethoden werden weiterhin nicht behandelt, da sie nicht den klassischen Verfahren der Felsinjektion zugeordnet werden.

Die Orientierungen der Bohrungen werden entsprechend der geplanten Dichtebene sinngemäß innerhalb dieser erfolgen. Im Regelfall werden lotrechte Bohrungen ausgeführt. Im Bereich der Talflanken bzw. auf Basis von Anforderungen aus der geologischen Situation wie beispielsweise steil fallende Kluft-/Schieferungslagen können auch innerhalb der Dichtschirmebene geneigte Bohrungen zweckmäßig sein (Bild 8).

### 2.2 Dichtschirminjektionen

Entsprechend der Bohrabfolge werden die nachlaufenden Injektionen in sogenannte Phasen der Primär-, Sekundär- und je nach Bedarf auch Tertiär- und Quartärinjektion gegliedert. Diese Vorgehensweise begründet sich weitestgehend in den Regelabständen der Bohrungen der einzelnen Injektionsphasen. Zu Beginn, also mit Beaufschlagung der Primärbohrungen, wird der planmäßig größte Abstand benachbarter Bohrungen behandelt. Die darauffolgende Sekundärinjektion bearbeitet die jeweils symmetrisch zwischen den Primärbohrungen gelegenen Sekundärbohrungen. Bei einem erforderlichen Rasterabstand der Injektionsbohrungen von 2 m wird bei drei Bohr- und Injektionsdurchgängen ein Abstand der Primärbohrungen von 8 m erreicht (Bild 9).

Trotz des mehrheitlich höheren Aufwands bei dieser Vorgangsweise können unerwünschte und schwer kontrollierbare Suspensionsübertritte in benachbarte Bohrungen auf ein Minimum reduziert werden. Weiterhin ermöglicht die phasenweise bohr- und injektionstechnische Bearbeitung des Untergrunds gezielte Rückschlüsse auf die Bodenansprache hinsichtlich des zu erwartenden Injektionserfolgs. So weist eine sukzessive Abnahme der verpressten Injektionsmengen je Injektionsphase auf eine bereits erfolgte Vergütung des Felsuntergrunds durch ent-

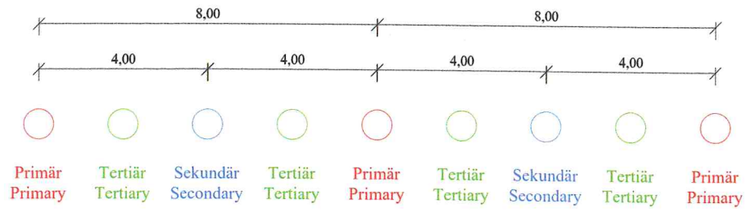



*Fig. 9. Split spacing method [4] [5] [8]*
*Bild 9. Split-Spacing-Method [4] [5] [8]*

spacing. The subsequent secondary grouting is into the secondary holes drilled symmetrically between the primary holes. For a required pattern spacing of 2 m and with three phases of drilling and grouting, the spacing of the primary holes can reach 8 m (Figure 9).

Despite this procedure mostly being more expensive, unintended slurry propagation to adjacent holes, which is difficult to control, can be reduced to a minimum. Phased drilling and grouting of the ground also enables targeted conclusions about the ground conditions regarding the expected grouting success. For example, a successive reduction of grout quantities in each phase indicates that the rock has already been treated through the appropriate propagation of the grout. A planned pattern of core drilling and if appropriate the performance of water pressure tests after the completion of a grouting phase can serve as a further measure to check the success of grouting.

### 2.2.1 Grouting methodology for the formation of a grout curtain

Grouting of rock is essentially carried out in a repeated sequence with standardised grouting parameters, with one grouting hole being divided into at least one but normally more grouting passes. Each pass entails the inflation of a hydraulic grouting packer at the intended depth in the hole. Depending on the geological situation and the construction and geotechnical requirements, grouting passes are normally carried out with lengths of 3 to 6 m. The grouting of a hole can be described as follows (Figure 10).

- The packer is set at a distance corresponding to the specified pass length from the bottom of the hole and inflated for the first pass (Pass 1) and is then ready for grouting. The pass can be grouted in accordance with the specification (stop criteria).
- After the successful grouting of the first (lowest) pass, the packer is deflated, pulled one pass length further out of the hole and inflated again. The second pass (Pass 2) can then be grouted.
- This procedure is repeated several times depending on the depth of the hole and ends at the transition to the structure, the formation level for the dam. With the shorter pass length (about 0.5 to 2 m) and regarding the sensitive formation of the joint between structure and ground, the last pass is normally carried out with reduced grouting parameters (reduced maximum pressure and lower maximum quantity). This last pass is also described as contact grouting [4] [5] [6].

sprechende Ausbreitung des Injektionsguts hin. Eine gezielte Anordnung von Kernbohrungen und gegebenenfalls Ausführung von Wasserabpressversuchen nach Abschluss einer Injektionsphase können dabei als weitere Instrumente zur Kontrolle des Injektionsziels dienen.

### 2.2.1 Injektionsmethodik bei der Herstellung von Dichtschirmen

Die injektionstechnische Bearbeitung des Felsuntergrunds folgt im Wesentlichen einem sich wiederholenden und durch Injektionsparameter standardisierten Ablauf. Dabei wird eine Injektionsbohrung in zumindest eine, im Regelfall aber mehrere Injektionspassen geteilt. Eine Passe wird dabei durch Verspannen eines hydraulischen Injektionspackers auf der vorgesehenen Tiefe des Bohrlochs gebildet. Entsprechend der geologischen Situation sowie bau- und geotechnischer Erfordernisse werden Injektionspassen im Regelfall mit Längen von 3 bis 6 m ausgeführt. Die injektionstechnische Behandlung einer Bohrung kann wie folgt beschrieben werden (Bild 10).

- Durch Verspannen des Packers oberhalb des Bohrlochtiefsten mit einem Abstand entsprechend der vorgegebenen Passenlänge wird die erste Passe (Passe 1) gebildet und ist für die injektionstechnische Behandlung bereit. Die Passe kann entsprechend der Vorgaben (Abbruchkriterien) injiziert werden.
- Nach erfolgreicher Beaufschlagung der ersten (untersten) Passe wird der Packer entspannt, dann eine Passe weiter Richtung Bohrlochmund gezogen und wiederrum verspannt. Die zweite Passe (Passe 2) kann somit injiziert werden.
- Dieser Vorgang wird entsprechend der Bohrlochlänge mehrmals wiederholt und endet im Übergangsbereich zum Bauwerk, der sogenannten Aufstandsfläche der Talsperre. Unter einer Verkürzung der Passenlänge (ca. 0,5 bis 2 m) und hinsichtlich der sensiblen Fugenausbildung Bauwerk/Untergrund wird diese Passe zumeist mit reduzierten Injektionsparametern (reduzierter Maximaldruck und geringere Maximalmenge) beaufschlagt. Diese letzte Passe wird auch als Andicht- oder Heftinjektion bezeichnet [4] [5] [6].

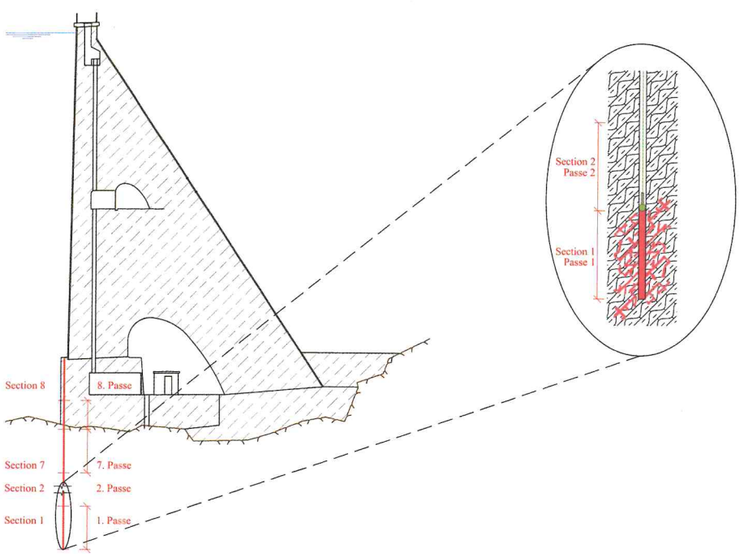



*Fig. 10. Methodology of grout curtain injection, Gr. Mühldorfer See dam (Verbund Hydro Power GmbH)*
*Bild 10. Methodik bei Dichtschirminjektionen, Sperre Gr. Mühldorfer See (Verbund Hydro Power GmbH)*





### 2.2.2 Grout – preparation and processing

The grout used is almost always slurry based on a hydraulic binder. The availability of chemical grouts is indeed now enormous, but for the installation of grout curtains these are only chosen for special purposes. Regarding the binder used, the quality or grinding fineness ranges from normal to extremely fine cement. In order to homogenise and improve the properties of the wet grout for its grouting behaviour and sedimentation stability, mixes are prepared with the addition of bentonite (prehydrated bentonite slurry), and grouting aids. The required water/binder ratio must be suited to the specific underground conditions, normally being in the range of 0.8 to 1.2. The addition of bentonite and plasticiser can be given as a few per cent (0.5 to 3 %) for each additive.

For the best possible hydraulic dispersion of the cement grains, it is necessary to use an appropriately intensive (highly turbulent) mixer and continue for an adequate time. High-shear or colloidal mixers are used. The pumps for the grouting process should operate with low to moderate pumping rates of 3 to 10 l/min for rock grouting.

## 3 Pressure tunnels and shafts, surge tanks

Pressure tunnels and shafts, and surge tanks are important components of a hydropower station and form the headrace. These structures link the water reservoir to the powerhouse. Due to the mostly high static and dynamic pressure forces, grouting is an essential part of the design and construction of such structures.

In this case the grouting technology has to ensure requirements for rock mass improvement regarding structural and waterproofing specifications along these cavity structures and also the composite action between the artificial lining (concrete inner lining, armouring) and the surrounding rock mass. The properties of the rock determine the necessary work for the construction of these structures. While in competent, scarcely fissured rock no

*Fig. 11. Pressure tunnel grouting, Untere Tuxbach headrace (Verbund Hydro Power GmbH)*
*Bild 11. Druckstollen-Injektion, Untere Tuxbachüberleitung (Verbund Hydro Power GmbH)*

*Fig. 12. Backfill grouting to tunnel 1, Alzkanal (Wacker Chemie AG)*
*Bild 12. Hinterlegungsinjektion Stollen 1, Alzkanal (Wacker Chemie AG)*

### 2.2.2 Injektionsmittel – Aufbereitung und Verarbeitung

Als Injektionsmaterialien kommen nahezu ausschließlich Suspensionen auf Basis hydraulischer Bindemittel zur Ausführung. Zwar ist heutzutage die Auswahl an chemischen Injektionsmitteln enorm, im Gebiet der Dichtschirminjektionen stellen sie jedoch nur für besondere Einsätze das Mittel der Wahl dar. Hinsichtlich der verwendeten Bindemittel reicht die Qualität respektive Mahlfeinheit von Normal- bis Feinstzement. Zur Homogenisierung sowie zur Verbesserung der Frischsuspensionseigenschaften hinsichtlich Einpressverhalten und Sedimentationsstabili-

additional lining or waterproofing may be necessary under some circumstances, the technical work increases with falling rock mass quality and in the presence of groundwater.

### 3.1 Grouting

In order to improve waterproofing and consolidate the headrace, grouting holes are drilled into the surrounding rock mass radially around the cavity around the entire perimeter (cf. Figure 2). The rock mass quality and the hydraulic design criteria of the rock mass are essential in determining the number of holes in a section ans the required depths. Depending on the lining concept, these works can be carried out both through an existing lining or also into the unlined excavated sides. The latter is a special case and serves rather as advance rock mass treatment in order to ensure the successful installation of the lining system [7].

#### 3.1.1 Grouting holes

The drilling of the holes, which is normally carried out by rotary percussive drilling, is mainly necessary for the deep improvement of the surrounding rock, above all in the area loosened by tunnelling works. Usual drilling depths are dependent on the excavated diameter D, but from experience figures of 3.0 m or a maximum depth of D/2 related to the section are specified.

#### 3.1.2 Grouting methodology for headrace tunnels

Depending on the lining of the structure, grouting in headrace tunnels is normally carried out in various working stages. The rock is grouted after setting a single packer into the solid rock. Single packers are set in the ring concrete and grouted to bed or backfill the lining (if necessary also prestress grouting in the annular gap between the excavation sides and the lining ring). Both working steps are dealt with separately concerning the grouting parameters and the slurry mix. Due to the normal radially symmetrical arrangement of the holes around the circular section, care has to be taken to load the lining symmetrically, particularly for prestress or backfill grouting. Considering this, particular attention should be paid to the suitable plant with appropriate control and logging of the grouting parameters.

### 3.2 Ring hose grouting

Another method of treating the rock mass surrounding headrace tunnels by grouting is the provision of a ring hose system in the gap between the lining and the excavation sides, which is inherent in the tunnelling system. For this purpose ring-shaped plastic hoses with grouting valves are installed to the sides of the excavation before installing the inner lining and fixed to the formwork with threaded connections at both ends. After striking the formwork and sufficient hardening of the ring concrete, the grout is injected through the ring hoses into the contact joint and the surrounding loosened rock mass. Ac-

tät werden Mischungen durch Beimengung von Bentonit (vorgequollene Bentonitsuspension) und sogenannten Einpresshilfen hergestellt. Erforderliche Wasser/Bindemittel-Werte (W/B-Wert) müssen auf jeweiligen Untergrundbedingungen abgestimmt werden – bewegen sich normalerweise jedoch in einer Bandbreite von 0,8 bis 1,2. Die Beimengung von Bentonit und Fließmittel kann dabei im niedrigen einstelligen Prozentbereich (0,5 bis 3 %) je Zusatzstoff/Zusatzmittel angegeben werden.

Für einen bestmöglichen hydraulischen Aufschluss des Zementkorns ist es erforderlich, den Anmischprozess entsprechend intensiv (hochturbulent) und mit ausreichendem Zeitbedarf zu gestalten. Hierfür finden Hochturbulenz- oder Kolloidalmischer ihre Anwendung. Die Pumpentechnik für den Einpressvorgang sollte sich dabei an geringen bis moderaten Pumpraten von 3 bis 10 l/min bei Felsinjektionen orientieren.

## 3 Druckstollen und Druckschächte, Wasserschlösser

Als wesentliche Teile einer Wasserkraftanlage bilden Druckstollen, Druckschächte und Wasserschlösser den Triebwasserweg. Diese Bauwerke verbinden den Wasserspeicher mit dem Krafthaus. Durch die zumeist hohen statischen und dynamischen Druckkräfte sind Injektionen wesentliche Elemente bei der Planung und Errichtung solcher Anlagen.

Dabei bewerkstelligt die Injektionstechnik Anforderungen an eine Gebirgsverbesserung hinsichtlich statischer und abdichtender Belange entlang dieser Hohlraumbauten wie auch einer Verbundwirkung zwischen dem künstlichen Ausbau (Betoninnenschalen, Panzerungen) und dem anstehenden Gebirge. Die Beschaffenheit des Gesteins bestimmt hierbei den notwendigen Aufwand bei der Errichtung dieser Bauwerke. Während bei standfestem, kaum geklüfteten Fels unter Umständen keine zusätzliche Sicherung oder Abdichtung nötig ist, steigt bei sinkender Gebirgsqualität und anstehendem Bergwasser der technische Aufwand.

### 3.1 Bohrlochinjektionen

Für Abdichtungs- und/oder Verfestigungsinjektionen im Triebwasserweg werden, radial zum Hohlraum über den gesamten Umfang, Bohrungen in das umliegende Gebirge eingebracht (vgl. Bild 2). Die Gebirgsqualität sowie die gebirgshydraulischen Bemessungskriterien bestimmen dabei maßgeblich die Anzahl der Bohrungen in einem Querschnitt sowie die erforderlichen Bohrtiefen. Entsprechend dem Auskleidungskonzept können diese Arbeiten sowohl bei bestehender Auskleidung als auch gegen den unverkleideten Ausbruch erfolgen. Letzteres bildet dabei einen Sonderfall ab und dient vielmehr als vorauseilende Gebirgsvergütung für einen gesicherten Einbau des Auskleidungssystems [7].

#### 3.1.1 Injektionsbohrungen

Das Abteufen der Bohrungen, das im Regelfall mit drehschlagenden Bohrverfahren erfolgt, dient wesentlich zur tiefreichenden Vergütung des umliegenden Gesteins, vor

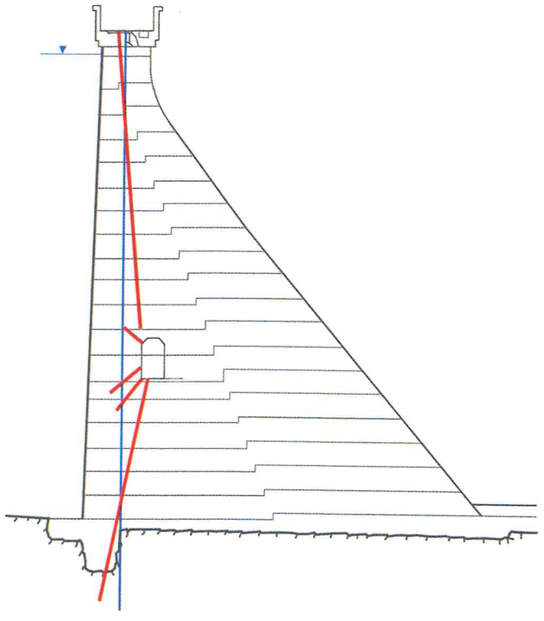


*Fig. 13. Grouting of porous mass concrete from the control gallery, Cathaleen's Fall Dam (Electricity Supply Board ESB)*
*Bild 13. Injektion von porösem Massenbeton aus dem Kontrollgang, Cathaleen's Fall Dam (Electricity Supply Board ESB)*

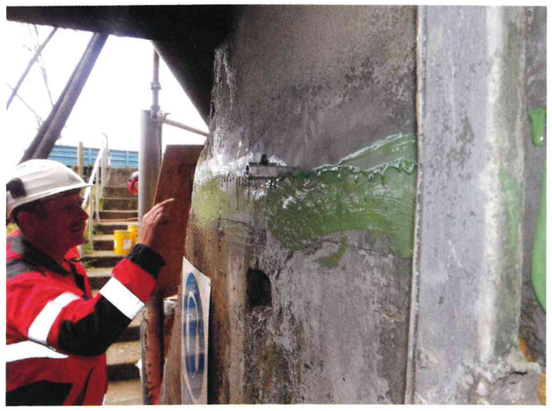


*Fig. 14. Grouting of porous mass concrete with synthetic resin, Cathaleen's Fall Dam (Electricity Supply Board ESB)*
*Bild 14. Injektion von porösem Massenbeton mit Kunstharz, Cathaleen's Fall Dam (Electricity Supply Board ESB)*

cording to the arrangement and number of ring hoses along the tunnel profile and any redundant application, it is possible to intentionally separate the phases of backfilling and prestress grouting.

Ring hose grouting does not achieve a deep improvement of the surrounding rock. The treatment of the ground by grouting is limited to the open fissures next to the annular gap. In order to carry out ring hose grouting, the same equipment can be used as for grouting drilled holes. The essential advantage of this system is the omission of drilling and the simpler making of the grouting connections without the single packer.

## 4 Barriers of mass concrete

Years of water flow against the concrete structure of barrier structures can loosen the cement paste in honeycombed areas and concreting joints and thus require repair of the concrete to ensure serviceability and improve the durability. One economic alternative to demolishing and then rebuilding the barrier or adding a waterproof lining is to improve the concrete structure by grouting with hydraulic binder slurries [5] [6] [8].

allem im sogenannten Auflockerungsbereich der Vortriebsarbeiten. Gängige Bohrteufen sind dabei vom Ausbruchquerschnitt (Durchmesser D) abhängig, werden jedoch erfahrungsgemäß mit ca. 3,0 beziehungsweise einer maximalen Teufe von D/2 in Bezug auf den Querschnitt angegeben.

### 3.1.2 Injektionsmethodik bei Triebwasserwegen

Entsprechend der Auskleidung des Bauwerks werden Bohrlochinjektionen in Triebwasserwegen zumeist in verschiedenen Arbeitsschritten bewerkstelligt. Dabei kann durch Verspannen sogenannter Einfachpacker (Setzkolben) innerhalb des Festgesteins die Felsinjektion erfolgen. Durch Setzen des Einfachpackers im Ringbeton und einer Beaufschlagung mit Injektionsgut erfolgt die Bettungs-/Hinterlegungsinjektion (erforderlichenfalls auch die Vorspanninjektion im Ringspalt zwischen Ausbruchlaibung und Ringbetonauskleidung). Beide Arbeitsschritte werden hinsichtlich Injektionsparameter und Suspensionsmischung getrennt voneinander behandelt. Aufgrund der in kreisrunden Querschnitten gängigen radialsymmetrischen Anordnung der Injektionsbohrungen wird vor allem bei Vorspann- und Hinterlegungsarbeiten auf eine entsprechende symmetrische Belastung der Auskleidung geachtet. Unter diesem Hintergrund ist auf eine geeignete Anlagentechnik mit entsprechender Steuerung und Aufzeichnung relevanter Injektionsparameter besonderes Augenmerk zu legen.

### 3.2 Ringschlauchinjektionen

Eine weitere Möglichkeit zur injektionstechnischen Behandlung des umliegenden Gebirges bei Triebwasserwegen ist die Anordnung von Ringschlauchsystemen im herstellungsbedingten Spalt zwischen Auskleidung und Felswandung. Hierfür werden ringförmig angeordnete Kunststoffschläuche mit Injektionsventilen noch vor der Herstellung der Innenauskleidung an der Ausbruchlaibung montiert und an beiden Enden an der Schalung durch Anordnung von Gewindeanschlüssen fixiert. Nach Ausschalen der Betonauskleidung und ausreichender Erhärtung des Ringbetons erfolgt die Injektion über die Ringschläuche gezielt in der Kontaktfuge sowie im aufgelockerten angrenzenden Gebirge. Entsprechend der Anordnung und Anzahl von Ringschläuchen entlang des Stollenprofils sowie einer gegebenenfalls redundanten Applikation kann gezielt in Phasen der Hinterlegungs- und Vorspannungsinjektion unterschieden werden.

Bei Ringschlauchinjektionen wird keine tiefreichende Vergütung des Felsuntergrunds erreicht. Eine injektionstechnische Behandlung des Untergrunds wird sich auf in den Ringspalt laufende offene Klüfte beschränken. Zur Bewerkstelligung von Ringschlauchinjektionen kann die gleiche Gerätetechnik wie bei Bohrlochinjektionen eingesetzt werden. Maßgeblicher Vorteil dieses System bei geeigneten geologischen Randbedingungen ist der Entfall der Bohrungen sowie der geringere Aufwand für das Herstellen der Injektionsanschlüsse durch den Wegfall der Einfachpacker.





For the grouting of mass concrete barriers, a similar procedure to that used for many years for grouting in rock is usual. The grouting holes are drilled from the embankment crown or a gallery down to the foundation of the structure. From these holes, a continuous core can be extracted, from which the quality of the mass concrete and the length and orientation of any individual cracks or voids can be recorded. After the contact grouting between structure and ground, substance-improving grouting is injected in sections of 1 to 3 m rising from bottom to top using hydraulic single packers. If the hole is unstable, the initial permeability is higher or in case pressure cannot be built up by injection, falling grouting with cyclic redrilling can be necessary [5] [6] [8]

Most grouting concepts provide an ever closer injection pattern (similar to a filling the gaps sequence). According to the split-spacing method, primary holes are first drilled in a large pattern. After analysis of the pressure-quantity curves depending on the injection time in each section, a decision is made whether further (secondary, tertiary of further) grouting holes have to be drilled between the primary (secondary, tertiary of further) grouting holes, with each new grouting hole being drilled between the two previous holes. By assessing and analysing the extracted cores, additional statements can be made about the quality of the already grouted areas and any conclusions about the propagation of the grout (Figure 14).

For this type of grouting, hydraulic binders (normal cement, fine cement, very fine cement) are normally used, although for special applications it can also be necessary to use special chemical grouts (polyurethane, epoxy resin, polyurea, silicate gels, acrylate gels).

## 5 Final remarks

In summary, dam construction offers wide possibilities for grouting measures, demanding special solutions in the design and construction of such structures. Not least the rapid progress of logging and control systems enables grouting technology to detect the interaction between ground and structure early and ensure the appropriate measures for technically and economically sustainable project execution. Past and current projects illustrate the justifiably high importance of grouting technology for the most stringent requirements in dam construction.

## References


[1] *Tschernutter, P., Drobir, H.:* Studienblätter zur Vorlesung Talsperren. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien, 2014.

[2] *Tschernutter, P.:* Konstruktiver Wasserbau I. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie. Technische Universität Wien, 2012.

[3] *Kutzner, C.:* Injektionen im Baugrund. SDV Saarbrücker Druckerei und Verlag GmbH, Saarbrücken, 1991.

[4] *Ewert, F.:* Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites. Springer, 1985.

[5] *Lombardi, G.:* GIN Principle Revisited. International Water Power and Dam Construction, S. 33-36, London, 1997.

[6] *Lombardi, G., Deere, D.:* Grouting Design and Control Using the GIN Principle. International Water Power and Dam Construction, London, 1993.


## 4 Sperrbauwerke aus Massenbeton

Durch jahrelange Durchströmung der Betonstruktur von Sperrbauwerken kann in Kiesnestern und Betonierfugen bereichsweise Zementstein ausgelöst und damit die Betonstruktur hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Verbesserung der Dauerhaftigkeit sanierungsbedürftig werden. Neben einem Abriss der Sperrbauwerke mit anschließendem Neubau oder einer Verstärkung der Betonbauwerke sowie das Aufbringen einer dichten Schale empfiehlt sich als wirtschaftliche Alternative eine Verbesserung der Betonstruktur durch Injektion von hydraulischen Bindemittelsuspensionen [5] [6] [8].

Bei einer Injektion von Sperrbauwerken aus Massenbeton ist eine Vorgehensweise üblich, wie sie für Injektionen von Festgestein seit Jahrzehnten angewendet wird. Die Injektionsbohrungen werden von der Dammkrone oder einem Kontrollgang bis zur Aufstandsfläche der Bauteile abgeteuft. Aus diesen Bohrungen kann man einen durchgehenden Kern entnehmen, mit dem die Qualität des Massenbetons sowie die einzelnen Risse bzw. Fehlstellen in ihrer Lage und Orientierung aufgenommen werden können. Nach der Kontaktinjektion zwischen Bauwerk und Boden werden dann in Abschnitten von 1 bis 3 m aufsteigend von unten nach oben die substanzverbessernden Injektionen unter Verwendung von hydraulischen Einfachpackern ausgeführt. Bei nicht standfestem Bohrloch, bei hoher Ausgangsdurchlässigkeit oder falls kein Druckaufbau durch die Injektion möglich ist, kann eine absteigende Injektion mit zyklischem Wiederaufbohren notwendig sein [5] [6] [8]

Die meisten Injektionskonzepte sehen ein sich immer weiter verdichtendes Injektionsraster (ähnlich dem Pilgerschrittverfahren) vor. Gemäß der Split-Spacing-Methode werden zuerst primäre Injektionsbohrungen in größerem Raster erstellt. Nach Analyse der Druck-Mengen-Kurven – in Abhängigkeit der Injektionszeit in jedem Abschnitt – wird entschieden, ob noch weitere (sekundäre, tertiäre oder weitere) Injektionsbohrungen zwischen den primären (oder sekundären) Injektionsbohrungen hergestellt werden. Jede neue Injektionsbohrung wird dabei zwischen den beiden vorherigen Injektionsbohrungen erstellt. Durch Begutachtung und Analyse entnommener Bohrkerne können zusätzlich Aussagen über die Qualität bereits injizierter Bereiche sowie gegebenenfalls Rückschlüsse auf die Ausbreitung des Injektionsguts getroffen werden (Bild 14).

Hauptsächlich werden für diese Art von Injektionen hydraulische Bindemittelsuspensionen (Normalzement, Fein- und Feinstzemente) verwendet, wobei für spezielle Anwendungen auch das Erfordernis von speziellen chemischen Injektionsmitteln (Polyurethan, Epoxidharz, Polyurea, Silikatgele, Acrylatgele) gegeben ist.

## 5 Schlussbemerkungen

Zusammenfassend bietet der Talsperrenbau breite Einsatzmöglichkeiten für Injektionsmaßnahmen und erfordert dabei spezialisierte Lösungen bei der Planung und Ausführung solcher Bauwerke. Nicht zuletzt die rasante Entwicklung bei Aufzeichnungs- und Steuerungssystemen ermöglicht der Injektionstechnik Interaktionen mit Baugrund und Bauwerk frühzeitig zu erkennen und durch

[7] *Seeber, G.*: Druckstollen und Druckschächte – Bemessung, Konstruktion, Ausführung. Stuttgart: Enke im Georg Thieme Verlag, 1999.

[8] *Wildner, H.*: Injektion von porösem Massenbeton mit hydraulischen Bindemitteln, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft,. Technische Universität München, 2002.

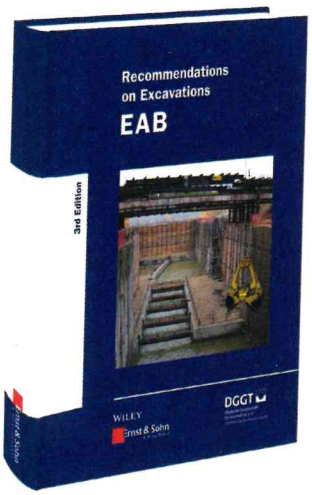
entsprechende Maßnahmen für eine technisch und wirtschaftlich nachhaltige Projektabwicklung Sorge zu tragen. Vergangene wie auch aktuelle Projekte illustrieren den berechtigt hohen Stellenwert der Injektionstechnik bei höchsten Anforderungen im Talsperrenbau.

Ing. Kurt Kogler
Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H.
Donau-City Straße 9
1220 Vienna
Austria
kurt.kogler@zueblin.at

Dipl.-Ing. Johann Hechenbichler
Projektleiter
Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H.
Donau-City Straße 9
1220 Vienna
Austria
johann.hechenbichler@zueblin.at

Dipl.-Ing. Patrick Gabriel
Technischer Innendienst / Bauleitung
Züblin Spezialtiefbau Ges.m.b.H.
Donau-City Straße 9
1220 Vienna
Austria
patrick.gabriel@zueblin.at

Ernst & Sohn
A Wiley Brand




Ed.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.
**Recommendations on Excavations**
2013. 324 pages.
€ 79,–*
ISBN 978-3-433-03036-3
Also available as ebook

## Recommendations on Excavations

With the issue of these recommendations, which have the character of a standard, the „Building Excavations" working group of the German Geotechnics Association (DGGT) aims to provide assistance with the design and structural calculation of excavation support works.

The introduction of the Eurocodes for building control purposes made necessary a revision of the previous edition of the recommendations to comply with the requirements of DIN EN 1997-1:2009 together with the national annex DIN 1997-1/NA:2010-12 and the supplementary regulations of DIN 1054:2010-12.

**Order online: www.ernst-und-sohn.de/3036**

**Ernst & Sohn**
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Customer Service: Wiley-VCH
Boschstraße 12
D-69469 Weinheim
Tel. +49 (0)800 1800-536
Fax +49 (0)6201 606-184
cs-germany@wiley.com
*€ Prices are valid in Germany, exclusively, and subject to alterations. Prices incl. VAT. excl. shipping. 1103106_dp