# Sanierungsarbeiten am Druckstollen der Enguri-Stauanlage

Die Enguri-Staumauer ist eine der höchsten Staumauern der Welt. Ein 15 km langer Druckstollen verbindet die Stauanlage mit einer Kaskade von Kraftwerken. In den letzten Jahren hat der Druckstollen mehr als 10 m³/s Wasser verloren. 2021 wurde der Stollen mit einer Injektion von Zementsuspension und Kunstharzen saniert. In Bereichen des Druckstollens mit starken Karsterscheinungen wurde Hybridzement eingesetzt. Die Baumaßnahme konnte planungsgemäß innerhalb von 3 Monaten abgeschlossen werden.

Bernd Aberle

## 1 Das Wasserkraftwerk Enguri

Die Enguri-Staumauer in Georgien ist mit 750 m Breite und 271,5 m Höhe das gewaltigste Bauwerk im Kaukasus. Sie ist zugleich die höchste Bogenstaumauer der Erde und zurzeit die dritthöchste fertiggestellte Talsperre. Ein 15 050 m langer Druckstollen mit einem Innendurchmesser von 9,5 m verbindet die Staumauer mit einer Kaskade von Kraftwerken. Der Druckstollen durchquert einen schmalen Bergrücken aus verkarsteten Kalksteinen, Mergeln und mergeligen Sandsteinen.

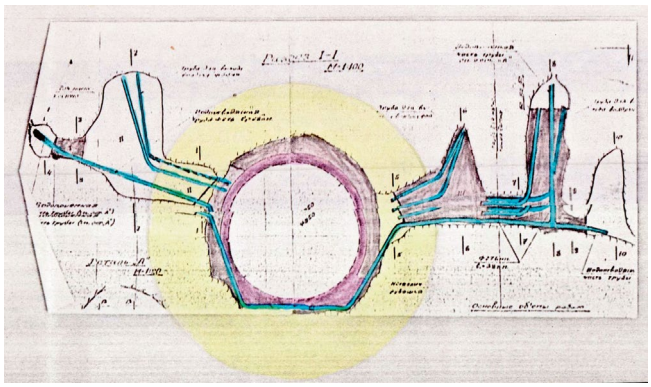
Während der Auffahrung hat man immer wieder große Karsthohlräume angetroffen, die mit Beton verfüllt wurden. Zufließendes Wasser wurde an dem Stollen mit einem System aus Drainagerohren vorbei geleitet. Teile diese Drainagesystems sind heute noch im Betrieb.

In **Bild 1** erkennt man Karsthohlräume, die teilweise verfüllt wurden. Die blauen Linien deuten darauf hin, dass man zusitzendes Wasser nicht gestoppt, sondern an dem Tunnel vorbei geleitet hat.

Trotz mehrerer Sanierungsmaßnahmen hat der Druckstollen in den zurückliegenden Jahren mehr als 10 m³/s Wasser verloren. Um diese Wasserverluste zu reduzieren, wurde im Frühjahr 2021 das Kraftwerk und der Stollen außer Betrieb genommen. Das Kraftwerk liefert 45 % des Stroms für Georgien und das benachbarte Abchasien. Da man nicht für eine längere Zeit auf die Stromerzeugung verzichten konnte, standen nur drei Monate für Arbeiten in dem Tunnel zur Verfügung. Im Auftrag von HPP Enguri, dem Betreiber der Stauanlage, wurden die Arbeiten von einem Joint Venture des georgischen Bauunternehmen Energony JSC und der Firma Kievmetrobud aus der Ukraine ausgeführt.

### Kompakt

- Sanierung eines Druckstollen mit 15 km Länge ist in kurzer Bauzeit möglich.
- Mit Hybridzement können Wasserwegigkeiten im Karst reduziert werden.



© [1]

**Bild 1:** Skizze aus der Bauzeit zu dem Drainagesystem

## 2 Die Sanierungsarbeiten

Nach einem Feldversuch Ende 2020 wurde der Druckstollen im Januar 2021 entleert und 2,5 km von 15 km des Tunnels für die Sanierung festgelegt.

Während der Sanierung wurde immer an vier Punkten im Stollen durchgehend gearbeitet. An jedem Arbeitspunkt wurde ein zweiarmiger Tunnelbohrwagen eingesetzt. Der Bohrmannschaft folgten Verpressteams für Kunstharzinjektion, gefolgt von Teams für die Zementinjektion. Alle Arbeiten wurden über drei Monate ohne eine einzige Unterbrechung in Tag- und Nachtschichten durchgeführt.

### 2.1 Bohrarbeiten

In 783 Verpressquerschnitten wurden 15 Bohrungen ringförmig mit einem Winkel von 45° zur Längsachse gebohrt. Die Verpressringe hatten einem Abstand von 3 m. Insgesamt wurden 9 600 Bohrungen mit einer Gesamtlänge von 54 740 Bohrmetern abgeteuft. Alle Bohrungen wurden mit einem Durchmesser von 64 mm und einer Teufe von 6 m trocken gebohrt.

Aufgrund von Bewehrungseisen im Tunnelausbau konnten nur 70 % der geplanten 78 500 Bohrmetern realisiert werden. Alle Besonderheiten während der Bohrarbeiten wurden von Geologen dokumentiert. Dazu gehörten die Wandstärke der

Tunnelschalung, Bohrhindernisse und Wasserzutritte. Zusätzlich wurden Hohlräume im Fels und zwischen Felsoberfläche und Tunnelaußenwand aufgezeichnet. Bei 7 % aller Bohrungen wurden Hohlräume mit einer Länge von mehr als 10 cm registriert. Im Schnitt hatten die Hohlräume eine Ausdehnung von 34 cm in der Bohrachse. In der Regel wurde die Hohlräume unmittelbar hinter der Betonschale angetroffen.

## 2.2 Verpressarbeiten mit Zement

Die Bohrungen wurden in zwei Stufen als Schleierinjektion im Fels und anschließend als Kontaktinjektion unmittelbar hinter der Betonschale verpresst.

Die Verpressung mit Zementsuspension wurden mit einem W/Z-Wert von 0,8 begonnen. Nach 300 l wurde der W/Z-Wert auf 0,6 umgestellt, und nach weiteren 300 l auf einen W/Z-Wert von 0,5 verringert. Der Zement, ein Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand, wurde als Sackware angeliefert. Die Suspension wurde in einem hochtourigen Mischer aufbereitet und mit Kolbenpumpen verpresst. Insgesamt wurden 2 376 460 l Zementsuspension mit einem maximalen Verpressdruck von 5 bar verpresst. Die Suspensionsmenge entspricht 2 270,6 t oder einer Menge von 45 412 Zementsäcken.

Obwohl in der Vergangenheit bereits umfangreiche Injektionsarbeiten im Druckstollen durchgeführt wurden, war die Injektionsmenge erheblich höher als erwartet. Aufgrund der hohen Verpressmengen mussten zusätzliche Verpresspumpen und -mannschaften die Arbeit der Zementteams unterstützen.

Die Verpressung im Felsbereichen ohne Wasserzutritt und die Kontaktverpressung wurden mit Zement ausgeführt. Bohrungen, die einen Wasserzutritt unmittelbar nach dem Abteufen der Bohrung zeigten, wurden in zwei Stufen verpresst. Zuerst wurde der Fels mit Kunstharz und dann die restlichen Bohrmeter mit Zementsuspension verpresst.

## 2.3 Verpressung mit Kunstharzen

Alle Bohrlöcher mit einem Wassereintritt von 0,5 l/min und mehr wurden mit Acrylatgel verpresst. Die chemische Verpressung mit Acrylatgel wurde nur im Fels durchgeführt. Dazu wurden pneumatische Packer für die Injektion in einer Bohrlochtiefe von 3 m eingebaut.

Die Kunstharze, Acrylatgel und Polyurethanharz wurden mit einer 3K-Pumpe injiziert. Die chemische Injektion wurde von 8 Teams durchgeführt, die in Tag- und Nachtschichten arbeiteten. Insgesamt wurden 419 433 l Acrylatgel verpresst. Dies entspricht 84 % der geplanten Menge von 500 000 l. Grund für den geringeren Verbrauch war auch hier die reduzierte Anzahl von Bohrlöchern, die aufgrund der Stahlbewehrung nicht gebohrt werden konnten.

Im Fall von Wassereinbrüchen mit bis zu 600 l/min oder mit hohem Wasserdruck wurde Polyurethanharz als Wasserstopp eingesetzt. Während der Bauzeit wurden 11 576 l Polyurethanharz in 2 % aller Bohrlöcher verpresst.

## 2.4 Dokumentation und Qualitätssicherung

Verpressarbeiten erfordern eine präzise Abstimmung zwischen den Mannschaften für das Bohren und das Verpressen. Die Arbeiten wurden von Bohrmannschaften aus der Türkei sowie Verpressteams aus Georgien und aus Aserbaidschan ausgeführt. Um eine Koordination und Dokumentation zu ermöglichen, wurden kompakte Arbeitsanweisungen und alle Vordrucke (**Bild 2**) für die Dokumentation dreisprachig verfasst. Besondere Vorkommnisse während des Bohrens und der Verpressung wurden mit Kennziffern versehen. Zum Beispiel stand die Ziffer D5 für die Information der Bohrmannschaft „Verbindung zu einem Nachbarbohrloch während des Abteufens der Bohrung“, oder G3 von der Verpressmannschaft für „Umläufigkeit während des Verpressvorgangs“. Damit konnte man vor Ort relativ einfach kommunizieren, Vorfälle dokumentieren und Information weitergeben, ohne dass eine Übersetzung erforderlich war.

Alle relevanten Daten während der Bohr- und Injektionsarbeiten wurden während der Ausführung auf Vordrucken notiert. Nach dem Schichtwechsel wurden diese Daten im Baustellenbüro ausgewertet und in eine Datenbank eingegeben.

Nach Eingabe der Daten konnten die Verpressergebnisse in einer kompakten grafischen Darstellung ausgedruckt werden (**Bild 2**). Mit der Datenbank wurden zeitnah Tagesberichte, Berichte und Aufmaße zu den laufenden Bohr- und Verpressarbeiten erstellt. Damit war die Datenbank Grundlage für die Dokumentation und Abrechnung.

Die Qualität der Arbeiten wurden mit einem Baustofflabor vor Ort und einem aufwändigem Eigenüberwachungssystem überwacht.

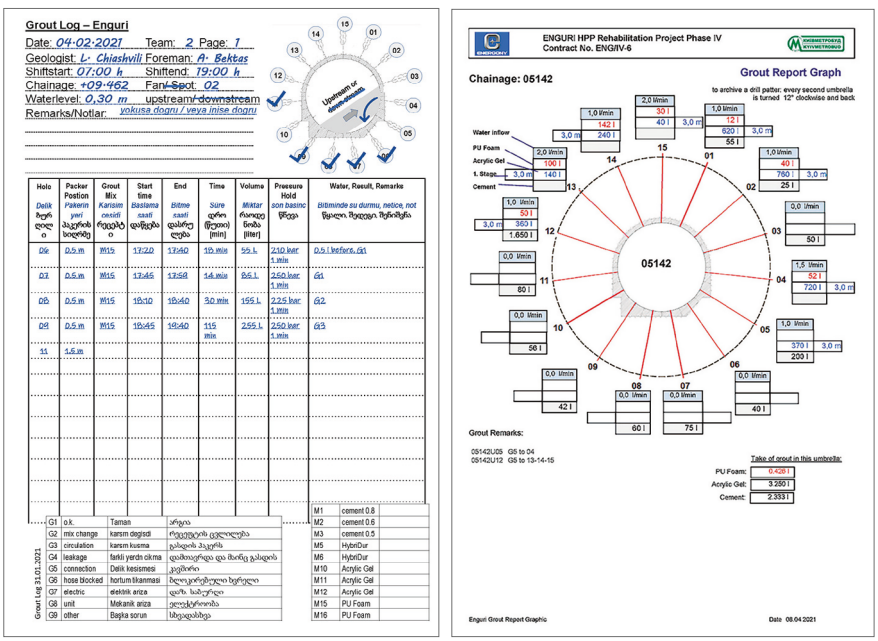



**Bild 2:** Beispiel für eine Mengenerfassung und Auswertung der Verpressung (links), grafische Darstellung der Verpressergebnisse für einen Verpressring (rechts)

© Aberle

Die Arbeiten im Tunnel wurde fristgerecht Ende April 2021 abgeschlossen.

### 2.5 Verpressergebnisse

Etwa 48 000 Bohrmeter wurden mit Zement verpresst. Die Zementverpressung erfolgte im Fels und im Bereich zwischen Fels und Betonauskleidung. In diesen Bereichen wurde eine durchschnittliche Aufnahme von 49,8 l pro Meter (= 47,6 kg/Bohrmeter) erreicht.

Etwa 9 000 Bohrmeter wurden mit Acrylatgel verpresst. Dies entspricht 16,5 % der insgesamt verpressten Bohrmeter. Die chemische Verpressung wurde nur im Fels durchgeführt. Hier wurde eine durchschnittliche Aufnahme von 46,5 l pro Meter im Fels erreicht.

Aufgrund der wesentlich geringeren Viskosität des Acrylatgels im Vergleich zu einer Zementsuspension hätten die Aufnahmemengen des Zements geringer sein müssen.

In der **Tabelle 1** sind Kerndaten von Abdichtungsinjektionen an ausgewählten Stauanlagen gegenübergestellt. Bei allen Projekten wurden die Daten mit Datenbanken ausgewertet. Um die Zementaufnahme zu vergleichen, wurden die unterschiedlichen W/Z-Werte und Bohrlochdurchmesser berücksichtigt und zu einer Nettozementaufnahme in kg pro Bohrmeter umgerechnet. Die Injektionsmaßnahme für den Druckstollen der Enguristaumauer zeigt in direktem Vergleich die kurze Bauzeit, aber auch eine hohe Zementaufnahme. Eine Ursache für die hohen Aufnahmemengen sind die Hohlräume, die während der Bohrarbeiten angetroffen wurden. Überschlägig ergeben diese Hohlräume ein Gesamtvolumen von ca. 1 000 $m^3$ für die sanierten 2,5 km des Druckstollens.

## 3 Fish Area

### 3.1 Die Konstruktionsfuge bei km 13+700

Bei km 13+700 fand man in einer horizontalen Konstruktionsfuge im linken Stoß eine große Anzahl von Holzstücken, Blättern und Plastikteile. Neben diesen Fremdstoffen waren mehrere bis zu 20 cm lange Fische tief in die Fuge gezogen und eingeklemmt worden.

Das führte zu dem Namen „Fish Area“. Die Konstruktionsfuge auf der rechten Seite zeigte keine Auffälligkeiten. Auf der Suche nach der Ursache wurden mehrere Bohrkerne gezogen. Die Kerne zeigten, dass sich die Fuge im Druckstollen über die gesamte Wandstärke um mindestens 3 mm geöffnet hat. Die eingeschwemmten Fremdkörper führten zu der Annahme, dass die Konstruktionsfuge unter Last noch weiter auseinanderklaffen wird.

Der Druckstollen muss bei Vollstau bis zu 16 bar Wasserdruck widerstehen. Das Eigengewicht der Betonschale reicht hierzu nicht aus. Eine Bewehrung der Betonschalen ist diesem Bereich nicht vorhanden. Somit muss das anstehende Gebirge einen großen Teil des Innendrucks aufnehmen. Durch eine undichte Konstruktionsfuge und eine unzureichende Anbindung an den Fels wird permanent frisches Wasser aus dem Druckstollen in die Zone zwischen Betonausbau und dem anstehenden Fels gespült. Damit werden Karsterscheinungen an der Felsoberfläche gefördert und bestehende Hohlräume erweitert. In einem ungünstigen Fall entsteht Platz für ein Auseinanderklaffen der beiden Betonschalen. Dies weitet die Konstruktionsfuge, wodurch noch mehr Wasser aus dem Druckstollen den Fels erreicht und weitere Lösungsvorgänge fördert.

**Tabelle 1:** Vergleich von Schleierinjektionen an Talsperren (Quelle: Aberle)

| | Diemel-staumauer | Borcka-Damm | Talsperre Leibis/Lichte | Wahnbach-talsperre | Enguri-Druckstollen |
|---|---|---|---|---|---|
| | Deutschland | Osttürkei | Deutschland | Deutschland | Georgien |
| | 1996 | 2000 | 2005 | 2017 | 2021 |
| | Sanierung | Neubau | Neubau | Sanierung | Sanierung |
| Baugrund | Mauerwerk Grauwacke und Tonstein | Alluviale Schotter, Tuff | Phycodenschiefer | Sandstein und Tonschiefer | Kalkstein |
| Bohrmeter | 16 860,0 m | 33 480,0 m | 10 717 m | 11 850 m | 54 750 m |
| max. Bohrtiefe | 60,0 m | 80,0 m | 75,0 m | 51,0 m | 6,0 m |
| Verpressmaterial | Feinbindemittel | Zement | Zement | Zement | Zement und Kunstharz |
| Verpressstunden | 3 326 h | 4 906 h | 3 279 h | 1 324 h | 5 644 h |
| Zementmenge | 336 t | 589 t | 188 t | 228 t | 2 271 t |
| Nettozementaufnahme pro Bohrmeter | 19,9 kg/m | 17,6 kg/m | 17,5 kg/m | 19,2 kg/m | 44,7 kg/m |
| Acrylatgel | - | - | - | - | |
| Bauzeit | 18 Monate | 26 Monate | 15 Monate | 21 Monate | 3 Monate |

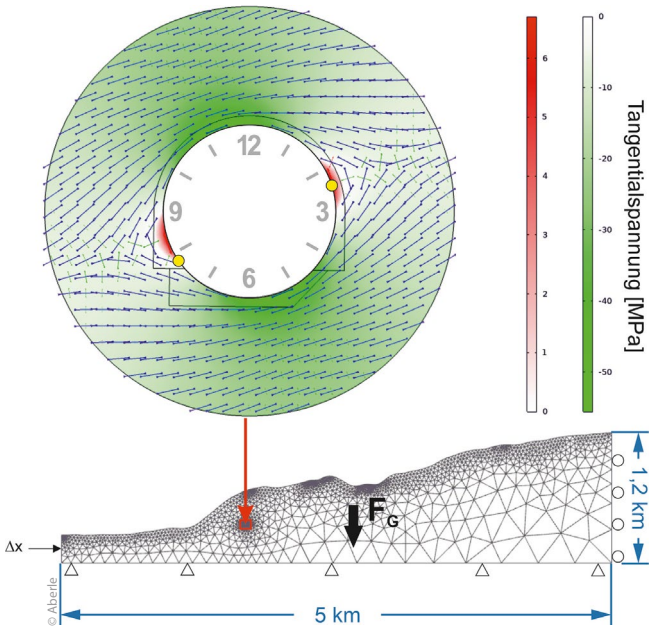



**Bild 3:** Spannungsverteilung um den Druckstollen

## 3.2 Sanierung im Bereich km 13+700

Das ursprüngliche Sanierungskonzept wurde für diesem Bereich angepasst, damit gezielt Karsthohlräume hinter dem Betonausbau gefüllt werden können. Dazu wurden im Tunnelbereich km 13+500 bis km 13+900, in einem Abstand von 4 m, jeweils 15 Bohrlöcher ringförmig für eine Kontaktinjektionen gebohrt. Die Bohrungen wurden durch die Betonschale nur bis ca. 0,5 m in den Fels, radial zur Tunnelachse gebohrt. Damit mögliche Hohlräume dauerhaft verfüllt werden, wurde nur Zement verpresst. Aufgrund der begrenzten Bauzeit wurde die Zementaufnahme pro Bohrloch auf max. 300 l begrenzt.

In Bohrlöcher, die durch das Abbruchkriterium von 300 l nicht vollständig verpresst wurden, wurde Hybridzement injiziert. Eingesetzt wurde Hybridur, ein Hybridzement der Fa. Arcan GmbH, die auch die Komponenten für Acrylatgel und Polyurethanharz geliefert hat. Für den Hybridzement wurde ein Gemisch aus Zementsuspension und Polyurethanharz in einem Verhältnis von 1:10 gemischt. Versuche auf der Baustelle mit einer einfachen Fließrinne, einem Marsh-Trichter und einer Vicat-Nadel haben die positiven Eigenschaften des Hybridzements, insbesondere die Stabilität gegen ein Wegspülen durch Wasser eindrucksvoll gezeigt. Ähnliche Versuche unter Laborbedingungen werden von Schramke [2] beschrieben.

In allen Bohrungen konnte ein Druckaufbau und somit eine gute Verfüllung der Karsthohlräume verzeichnet werden.

## 3.3 Weitere Untersuchungen

Eine Forschungsgruppe des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) forscht unter anderem seit 2019 zur induzierten Seismizität im Bereich der Enguri-Stauanlage. Die Untersuchung des zeitlich-räumlichen Auftretens von Erdbeben bei der Befüllung des Enguri-Damms und des Powertunnels ergab einen deutlichen Anstieg der Erdbeben im Bereich des Stollens unmittelbar nach dessen Befüllung im Jahr 1979 und könnte auf eine Undichtigkeit des Druckstollens zurückzuführen sein.

Insbesondere die Beobachtung der einseitigen Leckage im Druckstollen in der Fish Area erfordert daher eine Beschreibung des Systems aus felsmechanischer Sicht. Hierzu wurden verschiedene Spannungsszenarien mit FE-Modellen berechnet und im April 2021 eine Aufnahme der Risse im Stollen durchgeführt.

Die Ergebnisse in **Bild 3** zeigen eine symmetrische Verteilung der Zug- und Druckspannungen um den Druckstollen, wobei die Symmetrieachse um etwa 30° gegen den Uhrzeigersinn verkippt ist [3]. Dadurch zeigen sich auf der hangabwärtsgeneigten Seite im Bereich der Konstruktionsfuge (7-8 Uhr) Zugspannungen, während im Bereich der hangzugewandten Konstruktionsfuge (4-5 Uhr) Druckspannungen zu erwarten sind. Damit könnte die Asymmetrie in der Leckage des Druckstollens über das vorherrschende Spannungsfeld erklärt werden.

## 3.4 Fazit

Die Sanierungsarbeiten des Druckstollens wurden in kürzester Zeit ausgeführt und führten zu einer erheblichen Reduzierung des Wasserverlustes. Auf Kernbohrungen, Lugeon-Test vor und nach der Injektionsmaßnahme und eine Verpressung im Pilgerschrittverfahren wurde verzichtet, damit eine maximale Tunnelstrecke saniert werden kann. Durch den Einsatz von Acrylatgel konnte die Verpresszeiten in Bohrungen mit Wasserzutritt gegen über Zementsuspension erheblich verkürzt werden.

## Autor

**Dipl.-Ing. Bernd Aberle**
Geotechnik Aberle
Ziegelhüttenstraße 3
06537 Kelbra
geotechnik@aberle.biz

## Literatur

[1] HPP Enguri (Hrsg.): Archivunterlagen des Betreibers.
[2] Schramke, R.: Hybridinjektionen als Alternative zur Zementpastenverpressung bei der Verfüllung von Karsthohlräumen. Bachelorarbeit an der THGA Bochum, 2021 (unveröffentlicht).
[3] Niederhuber, T.; Müller, B. I. R.; Röckel, T.; Kalabegishvili, M.; Schilling, F.: Numerical modeling of the stress state around the Enguri power tunnel. In: GeoKarlsruhe (DGGV 2021), Vortrag, 2021.

DOI dieses Beitrags: http://doi.org/10.1007/s35147-023-1830-6

Bernd Aberle

**Rehabilitation work on the Enguri dam pressure tunnel**

The Enguri dam is one of the highest dams in the world. A 15 km long pressure tunnel connects the dam with a cascade of power plants. In recent years, the pressure tunnel has lost more than 10 m³/s of water. 2021, the tunnel was rehabilitated with an injection of cement suspension and synthetic resins. The construction measure was completed within 3 months, as planned.