188	MITTEILUNGEN der GEOTECHNIK SCHWEIZ PUBLICATION de la GÉOTECHNIQUE SUISSE PUBBLICAZIONE di GEOTECNICA SVIZZERA
	GS Tagung vom 22. Oktober 2026, GS Journée d'étude du 22 octobre 2026, Bern

Geotechnische Aspekte im Talsperren- und Dammbau

Aspects géotechniques dans la construction de barrages et de digues

	Inhalt *Table des matières*	Seite *Page*
Robert Boes	Die Bedeutung der Talsperren für die Energie- und Wasserwirtschaft der Schweiz	1
Amin Askarinejad	Die neue Schweizer Richtlinie zur Erdbebensicherheit von Stauanlagen	15
Stefan Ehlers Konstantinos Kassas	Aspects of the Seismic Assessment of the Göscheneralp Dam	25
Rico Senti Alexander Puzrin	Erhöhung Staudamm Mattmark (KWM) – Geotechnische Aspekte im Vorprojekt	35
Alexandre Wohnlich Eliott Odermatt	Nouveau barrage-voûte de Spitallamm (lac du Grimsel), Aspects géomécaniques de la construction	49
Andrea Abati	Dynamic Analysis of Embankment Dams: Case Studies from International Projects	59
Markus Schwager	Geotechnische Herausforderungen bei der Planung eines neuen Flusskraftwerkes an der Rhone	69
Bernd Kister	Steinschlagschutzdämme und der Lastfall Impakt	77
Elliot James Fern	Railway Embankments on Soft Soil	101
Bernd Aberle	Injektionstechnik – Grenzen, Risiken und bewährte Praxis	111
Tinet Ruch Dominik Hauswirth Alexander Puzrin	Erdbebenverhalten von Schüttdämmen mit Asphalt-Oberflächenabdichtung	123

188	MITTEILUNGEN der GEOTECHNIK SCHWEIZ PUBLICATION de la GÉOTECHNIQUE SUISSE PUBBLICAZIONE di GEOTECNICA SVIZZERA
	GS Tagung vom 22. Oktober 2026, GS Journée d'étude du 22 octobre 2026, Bern

Injektionstechnik – Grenzen, Risiken und bewährte Praxis

Bernd Aberle

Injektionstechnik – Grenzen, Risiken und bewährte Praxis

1 Einleitung und historischer Rückblick

Injektionen im Baugrund sowie an bestehenden Bauwerken stellen seit mehr als zwei Jahrhunderten ein bewährtes Verfahren zur Abdichtung und Baugrundverfestigung dar. Die historischen Ursprünge reichen bis in das Jahr 1802 zurück, als Charles Bérigny erstmals eine beschädigte Schleuse bei Dieppe mittels Zementsuspension erfolgreich reparierte [1]. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts fand die Methode zunehmenden Einsatz im Berg- und Tunnelbau zur Bewältigung starker Wasserzuflüsse.

Einen Meilenstein im Talsperrenbau setzte Thomas Hawksley im Jahr 1876 mit der Herstellung des ersten systematischen Dichtungsschleiers im Fels mittels Kluftinjektion unter der Tunstall-Talsperre in County Durham (Nordost-England) [2]. Dieser Maßnahme gingen mehrere schwerwiegende Schadensfälle an englischen Talsperren Mitte des 19. Jahrhunderts voraus. Sie führten zu der Erkenntnis, dass reine Tondichtungen unter der wasserseitigen Böschung bei klüftigem Felsuntergrund oft unzureichend sind und eine Unterströmung des Bauwerks mit entsprechendem Sohlwasserdruck nur durch gezielte Felsinjektionen dauerhaft unterbunden werden kann.

2 Technologische Entwicklungen im Überblick

Die Injektionstechnik hat sich seit ihren Anfängen in allen Teilbereichen kontinuierlich weiterentwickelt. Insbesondere bei den Baustoffen, der Maschinentechnik und der Prozessdatenverarbeitung wurden erhebliche Fortschritte erzielt.

2.1 Verpressmaterialien

- Hydraulische Bindemittel
  Standardmäßig kommen Portlandzemente sowie sulfatbeständige Hochofenzemente als Zementsuspension (Zement-Wasser-Gemisch) zum Einsatz. Die Reichweite und das Eindringverhalten werden primär über den Wasser-Zement-Wert (W/Z-Wert) sowie den Mahlgrad gesteuert. Während Standardzemente Trennflächen mit Spaltweiten ab ca. 0,2 bis 0,3 mm ausfüllen, können Feinstbindemittel (Größtkorn $d_{95} < 6$ µm) in Kluftspalten bis hinab zu 0,1 mm vordringen. Für großvolumige, stark wasserführende Kluftzonen oder hochporösen Baugrund stehen umgekehrt hochviskose Zementpasten zur Verfügung. Die Suspensionseigenschaften werden heute zielgerichtet durch Additive wie Stabilisatoren, Fließmittel oder Farbstoffe angepasst.

- Kunstharze
  Seit 1926 ergänzen chemische Injektionsmittel die mineralischen Bindemittel. Ausgehend vom historischen Joosten-Verfahren (Silikatvergelung) entwickelte sich ein breites Spektrum an Weichgelen, Acrylaten, Polyurethanen (PUR) und Epoxidharzen (EP).

- Hybridinjektionen
  Eine jüngere Entwicklung stellen Hybridbaustoffe dar, die Zement und PUR kombinieren. Ziel ist es, das schnelle und gezielte Abbindeverhalten von Harzen mit den günstigen Materialkosten von Zementsuspensionen zu vereinen. Aufgrund der komplexen Rheologie stellt diese Technik hohe Anforderungen an die Misch- und Pumpentechnik. Ein erfolgreiches Anwendungsbeispiel ist die Sanierung der Enguri-Talsperre in Georgien im stark verkarsteten Kalkstein [3].

2.2 Bohrtechnik

Frühe Injektionsbohrungen wurden überwiegend mit Außenhammerbohrgeräten und systembedingt geringen Durchmessern (≤ 60 mm) abgeteuft. Dieses Verfahren eignet sich hervorragend für Sprenglochbohrungen, kann jedoch durch den Feinkornanteil der Spülung die Bohrlochwandung verschlämmen. Besser geeignet sind drehende Verfahren wie die Kernbohrung oder der Einsatz einer Vollbohrkrone. Seitdem leistungsfähige mobile Kompressoren auf dem Markt sind, hat das Im-Loch-Hammer-Bohrverfahren (DTH, Down the Hole) Einzug in den Spezialtiefbau gefunden.

Da der Hammer direkt im Bohrlochtiefsten sitzt und „unten zieht“ statt von oben gedrückt zu werden, verlaufen diese Bohrungen extrem richtungsstabil. Druckluft dient dabei zeitgleich als Antrieb und als Spülmedium für das Bohrklein. Das Verfahren ist für fast jeden Baugrund geeignet und im Regelfall um den Faktor 3 bis 5 schneller und wirtschaftlicher als Kernbohrungen. Beide Verfahren liefern vergleichbare Verpressergebnisse – dies konnte beim parallelen Einsatz auf derselben Baustelle mehrfach nachgewiesen werden [4].

2.3 Packersysteme und Verpressschläuche

Neben Stirnpackern, bei denen eine Gummimanschette in der Bohrung verspannt wird, werden heute vorwiegend aufblasbare Pneumatikpacker eingesetzt, um Bereiche in Bohrungen gezielt absperren zu können. Ergänzend kommen Manschettenrohrsysteme (Verpressrohre mit Ventilen) zum Einsatz, die ein mehrstufiges Nachverpressen ermöglichen – beispielsweise bei Hebungsinjektionen.
Zur Fugen- und Firstspaltabdichtung im Betonbau werden zudem injizierbare Verpressschläuche eingesetzt.

2.4 Mischtechnik und Pumpentechnik

Für qualitativ hochwertige Zementsuspensionen sind hochtourige Kolloidmischer mit hohem Schergefälle heute Standard. Sie brechen Zementagglomerate auf und sichern eine vollständige Benetzung der Zementpartikel. Bei Großprojekten kommen vollautomatisierte Mischanlagen mit Silobeschickung und Förderschnecken zum Einsatz.

Während in den Anfangszeiten oft mit einfachen Standrohren ein Überdruck erzeugt wurde, fördern heute moderne Injektionspumpen das Verpressgut kontinuierlich, auch über weite Strecken. Die Steuerung erlaubt die Regelung über Durchflussrate sowie eine präzise Volumen- und Druckbegrenzung. Für Mehrkomponenten-Kunstharze wurden spezialisierte Pumpen entwickelt, die die Komponenten getrennt bis kurz vor den Packer fördern. Die Vermischung erfolgt erst unmittelbar vor der Einbringstelle über Statikmischer. Dies reduziert den Reinigungsaufwand und verhindert eine vorzeitige Reaktion in der Mischanlage, der Pumpe oder den Zuleitungen.

2.5 Baugrunderkundung und Datenverarbeitung

Vor und nach einer Injektion liefert der Lugeon-Test (Wasserdruckversuch, WD-Test) essenzielle Kennwerte zur Durchlässigkeit des Baugrunds, zur Injizierbarkeit sowie zum Verpresserfolg. Ergänzend werden zunehmend geophysikalische Messverfahren sowie optische Bohrlochsonden (Endoskopie/CCD) eingesetzt [5].

Die Verpressparameter Druck p, Flussrate und Volumen V werden kontinuierlich in Echtzeit registriert. Die Auswertung von Zeit-Druck-Diagrammen erlaubt eine sofortige Anpassung der Verpressstrategie. Eine begleitende Überwachung von Viskosität, Dichte und Temperatur des Injektionsguts dient der Qualitätssicherung [6].

2.6 Theoretische Modelle

Injektionsarbeiten weisen die Besonderheit auf, dass der eigentliche Abdichtungs- oder Verfestigungseffekt oft erst nach Erreichen von über 90 % der Gesamtleistung eintritt und sich einer direkten visuellen Kontrolle entzieht. Hauptsächlich im Talsperren- und Tunnelbau wird die GIN-Methode (Grout Intensity Number) zur Verfestigung und Abdichtung von klüftigem Felsgestein angewendet.

G. Lombardi entwickelte das Verfahren 1993 für eine ständige Überwachung und Anpassung des Injektionsverhaltens. Durch das Produkt aus maximalem Druck und zulässigem Gesamtvolumen (GIN = p • V) wird das optimale Abbruchkriterium vor Ort bestimmt.

In der Fachliteratur wurden weitere theoretische Modelle und Abbruchkriterien entwickelt, um die Ausbreitung des Injektionsguts mathematisch zu erfassen und den Prozess zu optimieren. Hierzu zählen unter anderem: Real Time Grouting Control (RTGC, Transient Pressure Analysis (TPA), Aperture Controlled Grouting (ACG), sowie Pressure Sensitive Grouting (PSG). Obwohl diese Ansätze wissenschaftlich fundiert sind, finden sie in der täglichen Baustellenpraxis aufgrund ihrer Komplexität und der hohen Heterogenität des Baugrunds bislang nur eingeschränkt konsequente Anwendung.

3 Gibt es Grenzen?

Wie alle Verfahren in der Bautechnik gibt es auch für Injektionsmaßnahmen klare Anwendungsgrenzen, die durch den Baugrund, das Material sowie die Ausführungsbedingungen bestimmt werden.

3.1 Materialbedingte Grenzen

Die primäre Grenze mineralischer Injektionsstoffe liegt in den geometrischen Abmessungen der Trennflächen bzw. Porenhohlräume. Lässt sich eine feinstgemahlene Zementsuspension aufgrund zu geringer Spaltweiten (< 0,1 mm) nicht mehr verpressen, muss auf niedrigviskose Kunstharze (z. B. Acrylate mit wasserähnlicher Viskosität) ausgewichen werden. Bei stark fließendem Wasser kommen rasch reagierende Polyurethane zum Einsatz, während Epoxidharze bevorzugt zur kraftschlüssigen Rissverpressung im Betonbau eingesetzt werden.

3.2 Physikalische und mechanische Grenzen

3.2.1 Temperatur

Sowohl niedrige als auch hohe Temperaturen beeinflussen die Reaktionskinetik erheblich. Bei geringen Injektionsvolumina in kühlem Baugrund wird kaum Hydratationswärme freigesetzt. Beispielsweise liegen die Baugrundtemperaturen unter der Gründungssohle der Talsperre Leibis/Lichte in Thüringen konstant bei ca. 4 bis 5 °C, was das Abbinden von Zementsuspensionen extrem verzögert.

Tiefe Temperaturen verlangsamen oder stoppen auch chemische Harzreaktionen. Umgekehrt führen hohe Außentemperaturen zu verkürzten Topfzeiten und bergen das Risiko einer vorzeitigen Erhärtung in der Pumpe oder in den Förderschläuchen.

3.2.2 Wasser und Alterung

Stark drängendes Grundwasser birgt die Gefahr, dass das Injektionsgut vor dem Aushärten ausgewaschen wird. Zudem unterliegen Kunstharze im Gegensatz zu mineralischen Bindemitteln Alterungsprozessen durch UV-Strahlung, Chemikalienkontakt (z. B. im Abwasserbereich) oder mikrobiellen Befall, was langfristig zur Versprödung führen kann.

3.3 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Injektionsmaßnahme wird maßgeblich von der Bohrleistung bestimmt. Häufig kann die Gründungssohle einer Talsperre nur durch Bohrungen von der Mauerkrone erreicht werden. Das Hauptaugenmerk liegt in diesem Fall auf der Reduktion der benötigten Bohrmeter. In Kombination mit kostengünstigen Zementsuspensionen sollte die Maximierung der Reichweite im Vordergrund stehen.

Bei hochpreisigen Kunstharzen (Materialkosten häufig das 10- bis 30-fache von Zement) sollte hingegen die Ausbreitung begrenzt werden [5]. Ein Beispiel hierfür ist die Schleierinjektion an einer Tiefgaragenaußenwand. In diesem Fall sind die Bohrungen nicht der Hauptkostenfaktor.

3.4 Erfahrung / Wissenstransfer

Fachwissen in der Injektionstechnik ist in Praxis und Planung stark an erfahrene Einzelpersonen gebunden. Durch den demografischen Wandel und den anhaltenden Termindruck drohen diese Erfahrungen verloren zu gehen. Mit gestiegenem Kostendruck kommt hinzu, dass kaum Zeit bleibt, das Wissen an die folgende Generation weiterzugeben.

In der Praxis zeigt sich immer wieder, dass das Baustellenpersonal weder mit den Injektionsstoffen, noch den Geräten oder Verfahren vertraut ist. Für die Fachbauüberwachung verschiebt sich die Rolle dadurch grundlegend: Qualitätssicherung erschöpft sich nicht in einer Kontrolle der Ausführung, sondern erfordert zuweilen ein aktives Training und Coaching des Personals vor Ort.

Ob Werkzeuge der Künstlichen Intelligenz (KI) hier künftig Erfahrung ersetzen kann, wird die Zukunft zeigen.

4 Gibt es Risiken?

Auch bei sorgfältiger Planung bleiben Injektionen mit spezifischen Risiken behaftet, insbesondere durch den nur punktuell erkundeten Baugrund.

4.1 Injektionsdruck und Baugrundversagen

Ein zu hoch gewählter Verpressdruck kann zum ungewollten Aufbrechen des Baugrunds oder zur Schädigung angrenzender Bauteile führen. Die Folge sind irreversible Gefügeschäden oder unerwünschte Hebungen.

4.2 Unkontrollierte Ausbreitung und Umweltrisiken

In stark zerklüftetem Fels oder durchlässigen Bodenschichten kann das Material unkontrolliert in nicht relevante Hohlräume, Nachbarbauwerke (z. B. Keller, Leitungen) oder in die Vorflut abfließen.

Neben dem wirtschaftlichen Verlust birgt dies erhebliche Umweltrisiken: Alkalisches Zementwasser in Fließgewässern, Starterverbindungen in Harzen oder toxische Monomere können Flora, Fauna und das Grundwasser schädigen. Ein prominentes Beispiel ist der Bau des Hallandsås-Tunnels in Schweden (1997): Beim Einsatz eines Acrylatgels (*Rhoca-Gil*) traten nicht ausreagierte Monomere (Acrylamid) aus, was zu Vergiftungen von Vieh auf den Weiden, Fischsterben und einem langen Baustopp führte [7].

4.3 Kosten- und Mengenrisiko

Durch Fehlinterpretation des Baugrundes, nicht erkannte Hohlräume oder Störungszonen ist es schwer, den tatsächlichen Materialverbrauch im Vorfeld exakt zu kalkulieren, was das Risiko signifikanter Budgetüberschreitungen birgt.

4.4 Qualitätskontrolle und fehlende Sichtverbindung

Der Verpressverlauf im Baugrund oder in Bauteilen entzieht sich einer einfachen visuellen Kontrolle („Blindflug“). Der Erfolg muss meist indirekt über Kennwerte (z. B. Druck-Mengen-Verläufe, erneute WD-Tests) oder nachträgliche, zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Prüfverfahren (z. B. Ultraschall, Endoskopie, Kontrollbohrungen) nachgewiesen werden [8].

5 Erfahrungen aus aktuellen Praxisanwendungen

Im Folgenden werden die Besonderheiten bei einigen ausgewählten Verpressmaßnahmen an Stauanlagen und einem Infrastrukturprojekt vorgestellt.

5.1 Talsperre Kainzmühle

Die Talsperre Kainzmühle (Bayern) wurde als Beton-Gewichtsstaumauer mit einer Kronenlänge von circa 120 m errichtet. Neben starken Abwitterungen in der Wasserwechselzone des Betons ergaben Messungen teilweise hohe Sohlenwasserdrücke in der Gründungsfuge. Mit einem Dichtungsschleier wurden 2024 der anstehende Fels und die Gründungssohle vergütet. Wasserseitig wurde die Maueroberfläche mit einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) abgedichtet, wobei die Bohransatzpunkte des Dichtungsschleiers gezielt durch die KDB abgedeckt wurden, um eine durchgehende Dichtebene zu schaffen.

Zu den Herausforderungen zählten fehlende Bestandsunterlagen aus der Bauzeit und der zwischenzeitlichen Sanierung in den Jahren 1954/1955, strenge Umweltauflagen, PAK-haltige Beläge auf der Maueroberfläche und mehrere Hochwasserereignisse, die den Arbeitsraum fluteten. Die Baustelleneinrichtung im Stauraum wurde so konzipiert, dass die Ausrüstung (u. a. Bohrgeräte, Kompressoren) innerhalb von 90 Minuten komplett geräumt werden konnte.
Während Kernbohrungen im festen Gneis nur geringen Baufortschritt erzielten, gab es beim Einsatz eines Im-Loch-Hammers kaum Einschränkungen im Baufortschritt. Erkenntnisse zur genauen Lage der Gründungssohle wurden mit Kamerabefahrungen und über erfahrene Bohrgeräteführer gewonnen, welche die genaue Lage der Sohle anhand des Spülungsverlusts und des Bohrverhaltens bestimmen konnten.

Trotz aller Hindernisse konnten die Bohr- und Verpressarbeiten innerhalb der geplanten Bauzeit von 6 Monaten abgeschlossen werden [9].



Bild 1: Kainzmühle, Arbeiten im Stauraum, Stunden später das Baufeld bei Hochwasser

5.2 Verpressgut für besondere Aufgaben

Talsperre Weida (Thüringen)
Die Talsperre wurde von 1945 bis 1955 unter Verwendung von Sulfathüttenzement (SCC) bzw. -mörtel errichtet. Bei entsprechendem Feuchtigkeitsangebot kommt es in der Kontaktzone zwischen SSC-Beton und anderen Betonsorten zu schädigenden Phasenneubildungen (Ettringit, Thaumasit, Gips). Nach 1965 fand dieser Baustoff im Talsperrenbau keine Verwendung mehr. Für die geplante Abdichtung des Baugrundes und der Gründungsfuge wurde ein geeigneter Verpressbaustoff entwickelt, der die speziellen Anforderungen für eine Injektion erfüllt.

Talsperre Triptis (Thüringen)
Bei der 1980 in Betrieb genommenen Talsperre Triptis traten im rechtsseitigen Hanganschluss erhöhte Sickerwasserabflüsse auf, die auf eine durchlässige Kiesschicht oberhalb der Gründungssohle im Dammkörper zurückzuführen waren. Im Variantenvergleich mit Massivbauweisen (Schlitzwand, Spundwand, Bohrpfahlwand) setzte sich ein Injektionsverfahren mit Rammlanzen und hochviskoser Zementpaste durch. Die Stahllanzen werden ähnlich einer Rammsondierung eingebracht. Beim schrittweisen Ziehen verbleibt die Rammspitze im Baugrund, während die Zementpaste über ein Hohlgestänge gezielt verpresst wird.

Instandsetzung Eisenbahn-Wartungsgrube (Sangerhausen)
Eine Wartungshalle für Abellio-Bahnfahrzeuge in Sangerhausen war auf Rüttelstopfsäulen aus Schotter gegründet. Für den nachträglichen Einbau einer Wartungsgrube direkt neben der Halle mussten diese Säulen freigelegt werden. Zur Sicherung wurden die Schottersäulen und der umgebende Baugrund vorab mit Silikatharz und PUR injiziert, wodurch ein monolithischer, tragfähiger Verbundblock entstand, der gefahrlos freigelegt werden konnte.



Bild 2: Probekörper aus einer Schottersäule nach der Verpressung

5.3 Druckstollen der Enguristaumauer

Die Enguri-Staumauer in Georgien ist mit 750 m Breite und 271,5 m Höhe das gewaltigste Bauwerk im Kaukasus. Ein 15 km langer Druckstollen verbindet die Stauanlage in Georgien mit einer Kaskade von Kraftwerken in Abchasien.In den letzten Jahren verlor der Druckstollen mehr als 10 m³/s Wasser. 2021 wurde der Stollen durch Injektionen von Zementsuspensionen und Kunstharzen saniert. In Bereichen mit starken Karsterscheinungen wurde ein Hybridzement eingesetzt. Die Baumaßnahme konnte planungsgemäß innerhalb von 3 Monaten abgeschlossen werden. Der enge zeitliche Rahmen wurde von der Regierung vorgegeben, da die Stauanlage ca. 45 % des Stroms des gesamten Landes erzeugt.

Eine zusätzliche Erschwerung stellte die Durchführung der Baumaßnahme während der Corona-Pandemie dar, was Materialtransport und -verfügbarkeit stark einschränkte [3]

Insgesamt wurden mit 4 Tunnelbohrwagen 54.750 Bohrmeter abgeteuft. In 783 Verpressquerschnitten wurden jeweils 15 Bohrungen ringförmig mit einem Winkel von 45° zur Längsachse gebohrt. Die Bohrungen wurden mit 460 t Acrylatgel, 30 t PUR und 2.271 t Zement verpresst. Damit konnten die Wasserverluste erheblich reduziert werden.

Zu den Herausforderungen gehörten neben dem Zeitdruck die Abstimmung der internationalen Bohr- und Verpressmannschaften. Neben 8 Bohrteams aus der Türkei wurde die Acrylatverpressung von Fachleuten aus Aserbaidschan und die Zementverpressung von georgischen Fachkräften ausgeführt.

Um Koordination und Dokumentation zu erleichtern, wurden alle Vordrucke und kompakte Arbeitsanweisungen dreisprachig verfasst. Neben den Kerndaten wurden besondere Vorkommnisse während des Bohrens und Verpressens mit Kennziffern versehen (z. B. D5 = „Verbindung zu einem Nachbarbohrloch während des Abteufens“; G3 = „Umläufigkeit während des Verpressvorgangs“). Damit konnte auf der Baustelle ohne Sprachbarriere kommuniziert und dokumentiert werden.

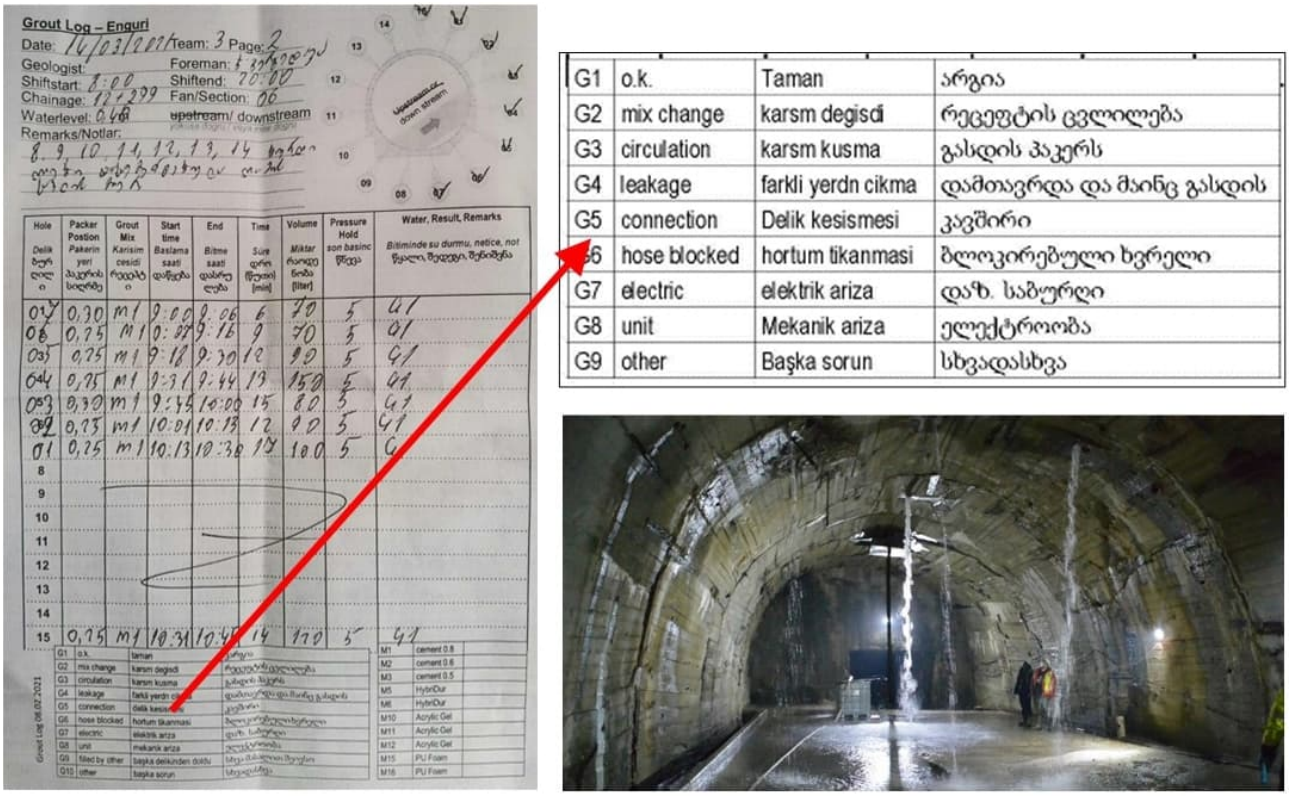


Bild 3 Beispiel eines Vordruckes in drei Sprachen

Alle relevanten Daten wurden auf Vordrucken notiert, nach Schichtwechsel digital erfasst und ausgewertet. Eine Datenbank generierte grafische Auswertungen (Bild 4) sowie Tagesberichte und Aufmaße als Grundlage für Dokumentation und Abrechnung.

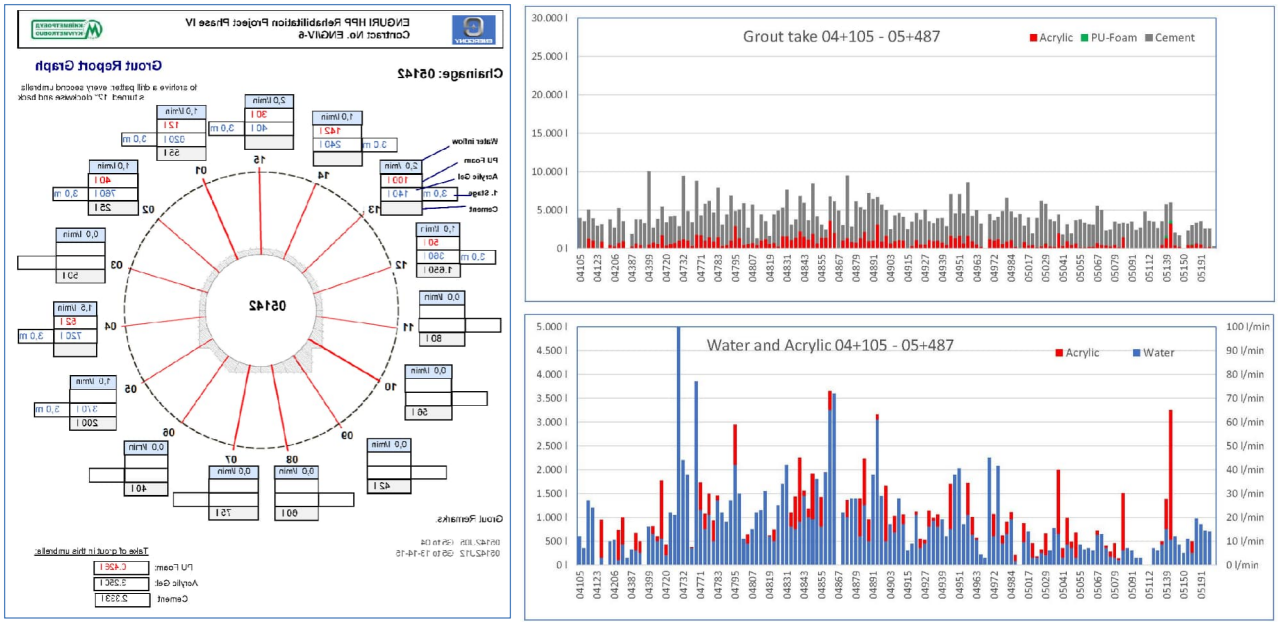


Bild 4: Auswertung der Zementaufnahme in einem Querschnitt und über die Längsachse

Während der Auffahrung hat man immer wieder große Karsthohlräume angetroffen, die mit Betonplomben verfüllt wurden (siehe Bild 5). Die blauen Linien deuten darauf hin, dass zusitzendes Wasser nicht gestoppt, sondern an dem Tunnel vorbei geleitet wird. Teile diese Drainagesystems sind heute noch im Betrieb.

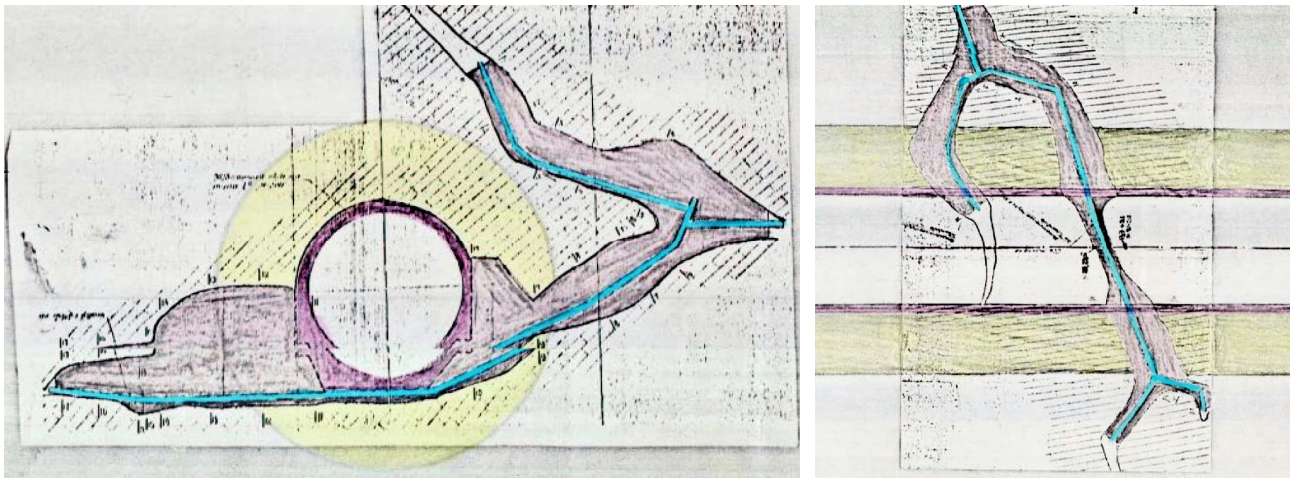


Bild 5 Skizze aus der Bauzeit, Tunnelquerschnitt und Aufsicht

Bei früheren Untersuchungen hatte man sich über Ventilrohre in der Tunnelschale gewundert und empfohlen, diese Rohre zu verfüllen. Wahrscheinlich besteht eine Verbindung zwischen den Rohren und den „blauen Linien“ in der Skizze (Bild 5).

Die Auskleidung des Druckstollen wurde in den 1970er Jahren einschalig mit einer oberen und einer unteren Ortbetonschale betoniert. In der Arbeitsfuge zwischen den Schalen bei km 13+700 wurde bei den letzten Kontrollen immer wieder Laub, Äste und Plastikteile gefunden. Neben diesen Fremdstoffen waren mehrere bis zu 20 cm lange Fische tief in die Fuge gezogen und eingeklemmt worden – dies führte zum Namen „Fish Area“.

Auf der Suche nach der Ursache zeigten gezogene Bohrkerne, dass sich die Fuge im Druckstollen über die gesamte Wandstärke um mindestens 3 mm geöffnet hatte. Der Druckstollen muss bei Vollstau bis zu 16 bar Wasserdruck widerstehen. Da eine Bewehrung der Betonschale in diesem Bereich fehlt, muss das anstehende Gebirge einen großen Teil des Innendrucks aufnehmen. Durch die undichte Konstruktionsfuge wurde permanent Wasser aus dem Druckstollen in die Kontaktzone zwischen Betonausbau und Fels gespült, was Karsterscheinungen förderte und bestehende Hohlräume erweiterte. Hierdurch entstand Raum für ein weiteres Auseinanderklaffen der Betonschalen. Diese Hohlräume wurden erfolgreich mittels Hybridinjektion verpresst.



Bild 6. Bohrkern aus der Arbeitsfuge mit „Inhalt“

6 Ausblick und Aufgaben für die nächste Generation

Die Injektionstechnik bleibt eine Schlüsseltechnologie des Spezialtiefbaus. Es wird zunehmend auf Baugrund mit ungünstigen ingenieurgeologischen Eigenschaften gebaut. Gleichzeitig stehen wir vor der Aufgabe, bestehende Bauwerke nachhaltig zu sanieren oder statisch zu verstärken.

Es wird auch weiterhin spannende Aufgaben in der Praxis und offene Fragen in der Forschung und Entwicklung geben. Dazu gehört die Temperaturführung mit einem vertieften Verständnis des Temperatureinflusses auf die Hydratations- und Reaktionskinetik dünner Injektionsfilme im kühlen Baugrund. Hilfreich wären zerstörungsfreie Erfolgsnachweise: Weiterentwicklung geophysikalischer und tomographischer Verfahren zur zuverlässigen Qualitätskontrolle ohne Zusatzbohrungen.

Weitere Aufgabe sind die Digitalisierung und KI-gestützte Wissensdatenbanken. Mit systematischer Erfassung von Prozessdaten und Kennwerten aus ausgeführten Projekten in zentralen Datenbanken, um Erfahrungswissen zu sichern und mittels Künstlicher Intelligenz für zukünftige Planungen nutzbar zu machen. Damit könnte man beispielsweise die Nettozementaufnahme pro Bohrmeter vergleichen, die in (Tabelle 1) gezeigt wird.



	Eder-Staumauer	**Diemel-Staumauer**	**Borcka dam**	**Talsperre Leibis/ Lichte**	**Wahnbach-talsperre**	**Enguri Druckstollen**	**Kainzmühl-sperre**
	Deutschland	Deutschland	Osttürkei	Deutschland	Deutschland	Georgien	Deutschland
	1992	1996	2000	2005	2017	2021	2024
	Verankerung	Sanierung	Neubau	Neubau	Sanierung	Sanierung	Sanierung
Baugrund	Grauwacke und Tonstein	Grauwacke und Tonstein	Alluviale Schotter, Tuff	Phycoden-schiefer	Sandstein und Tonschiefer	Kalkstein	Granit
Bohrmeter	7.332 [m]	16.860 [m]	33.480 [m]	10.717 [m]	11.850 [m]	54.750 [m]	1.503 [m]
max. Bohrtiefe	71,5 [m]	60,0 [m]	80,0 [m]	75,0 [m]	51,0 [m]	6,0 [m]	24,0 [m]
Verpressmaterial	Zement	Feinbindemittel	Zement	Zement	Zement	Zement und Kunstharz	Zement
Verpressstunden	1.965 [h]	3.326 [h]	4.906 [h]	3.279 [h]	1.324 [h]	5.644 [h]	218 [h]
Zementmenge	100 [t]	336 [t]	589 [t]	188 [t]	228 [t]	2.271 [t]	22 [t]
Zementaufn./ Bohrmtr	13,6 [kg/m]	19,9 [kg/m]	17,6 [kg/m]	21,5 [kg/m]	19,2 [kg/m]	44,7 [kg/m]	15,5 [kg/m]
Acrylatgel						420 [t]	
Bauzeit (nur Injektion)	17 [Monate]	18 [Monate]	26 [Monate]	15 [Monate]	21 [Monate]	3 [Monate]	6 [Monate]

Tabelle 1: Vergleich der Nettozementaufnahme an ausgewählten Talsperren

7 Literatur

[1] C. BERINGY, „Mémoire sur un procédé d'injection propre à prévenir ou arrêter les filtrations sous les fondations des ouvrages hydrauliques, (1832), Paris, Carilian Goeury
[2] G. M. BINNIE(1987). Early dam builders in Britain. Thomas Telford, London. 181pp.
[3] B. ABERLE „Sanierungsarbeiten an der Enguri Stauanlage“ (2023) Wasserwirtschaft, 06/2023
[4] J.LINORTNER, B. ABERLE „Injektionen in Boden und Fels am Beispiel der in Bau befindlichen Kraftwerke BORÇKA und MURATLI im Nordosten der Türkei“ (2002), Wien, Tagungsband zum 17. Christian Veder Kolloquim der TU Graz, Seite 193 – 208
[5] B. ABERLE (2022) „Ausschreibung von Injektionsarbeiten – Unterschiede zwischen hydraulischen Bindemitteln und Kunstharzen“, Köln; STUVA Forschung + Praxis 58: Forum Injektionstechnik 2022
[6] ABI-Merkblatt, Abdichten von Bauwerken durch Injektion; Hrsg.: Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen e. V. – STUVA –, 4. aktual. u. erw. Aufl. 2022
[7] EUROFOUND, 2002. *Skanska managers found guilty of work environment crime* [Online]. Dublin: Eurofound. Verfügbar unter: https://www.eurofound.europa.eu/en/publications/all/skanska-managers-found-guilty-work-environment-crime [Zugegriffen am: 01.07.2026].
[8] B. ABERLE, M. Leipersberger (2026), Beurteilung des Injektionserfolgs – Einflussgrößen und praxisnahe Bewertungsmethoden“, Köln; STUVA Forschung + Praxis 60: Forum Injektionstechnik
[9] B. TOENNIS, B.; ABERLE „Kainzmühlsperre – Sanierung der Staumauer mit KDB und Dichtungsschleier“; (2026) Fachtagung an der TAE Esslingen

Autor:
Bernd Aberle
Dipl.-Ing.
Geotechnik Aberle
Ziegelhüttenstrasse 3, 06537 Kelbra (D)