

Donnerstag 17. Oktober 2013

13:30-14:00

## **Felsabdichtungsinjektionen in geohydraulisch anisotroper Umgebung auf Basis organisch und mineralisch stabilisierter Zementsuspensionen**

Ein Erfahrungsbericht zur technischen und vertraglichen Abwicklung drucksensitiver  
Felsinjektionen im Vorfeld von Dammbauarbeiten

*Manfred Scheikl*

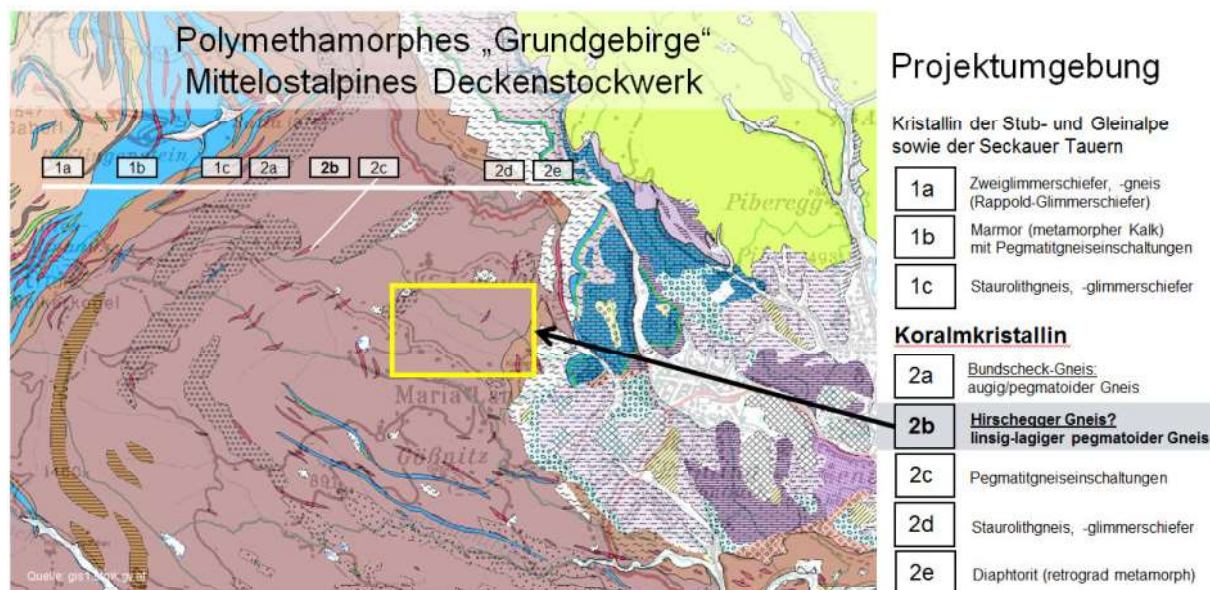
alpinfra consulting + engineering gmbh, Schillerstraße 25, 5020 Salzburg

### **Abstract**

Within grouting works, an execution contract and technical requirements are mutually conflicting in many ways. A common surprise consist in that (a) Grout absorption is not in line with water absorption, (b) Fracture-intensity and -orientation frequently remain unrevealed secrets until the end of grouting works, (c) Recurrently used "standard" mixes are not focusing on the role of the yield value, which is commanding the reach of treatment and in consequence the spacing of bore-holes, (d) Grouting parameters and stop criteria are occasionally copy-pasted from other projects with differing frame conditions. Thus, a grouting-contract has primarily to enable the technically required measures in order to cover a number of imponderables. During the execution of grouting, also technical optimization allow "ways out" of these aspects, which shall be demonstrated within the current contribution.

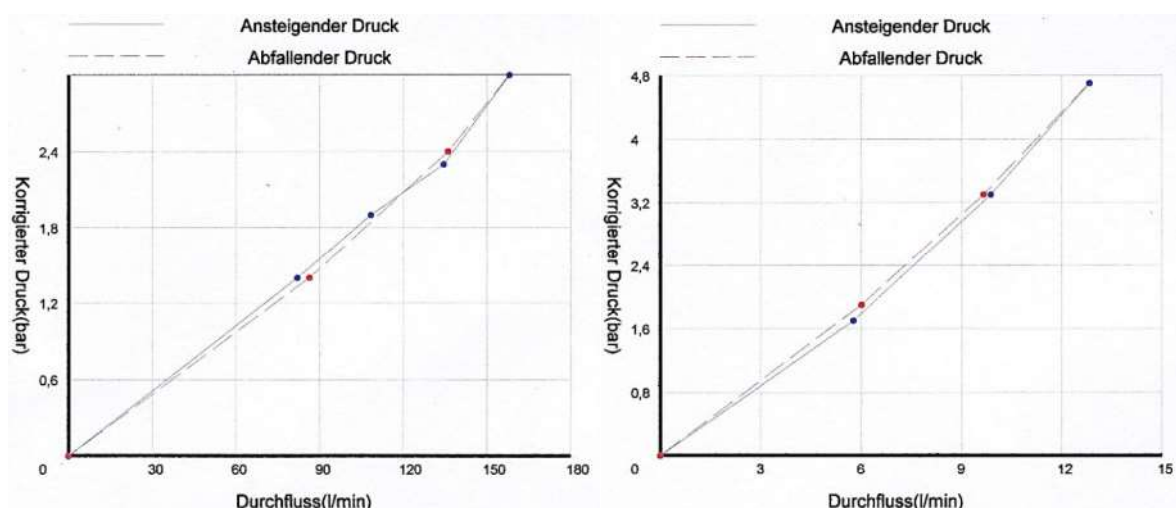
### **Einleitung und geohydraulische Randbedingungen**

Der Geologische Rahmen des Hochwasserrückhaltebeckens Lankowitzbach wird durch das Koralmkristallin bzw. den Hirscheegger Gneis, der Pegmatitgneiseinschlaltungen aufweist, gebildet (Quelle: gis1.stmk.gv.at). Strukturell dominieren mittelsteil nach NE einfallende Schieferungsflächen sowie mittelsteil bis steil nach NW einfallende offene Klüfte. Im Bereich der bestehenden Gerinneachse wurde im Zuge der Herstellung des Kerngrabens eine im strukturellen Detail noch nicht geklärte und nun mittels Injektionsgut abgebildete Faltenstruktur vorgefunden. Untersuchungen dazu werden im Rahmen aktueller wissenschaftlicher Arbeiten vorgenommen.



**Abbildung 16:** Geologischer Rahmen auf Basis der digitalen geologischen Karte aus [gis1.stmk.gv.at](http://gis1.stmk.gv.at)

Im Zuge der Untergründerkundung, die im Rahmen der Vorarbeiten zur Errichtung der Hochwasserrückhalteanlage Maria Lankowitzbach, westlich, in der Nähe von Granz durchgeführt wurden, kamen unter anderem Wasserdruckversuche zur Ausführung. Dabei wurden im Zuge mehrerer Erkundungskampagnen Lugeonwerte zwischen 10 und 250 [l/m/min] bei Versuchsdrücken zwischen ~0,5 und 5 bar festgestellt (vgl. **Abbildung 17**). Die WD-Versuche wurden zur Steuerung der Suspensionsrezepturen und Interventionskriterien vorausseilend zu den Injektionen über die gesamte Baudauer durchgeführt. Dabei wurde der Versuchsdruck bei fortschreitender Injektionsarbeit so angepasst, dass die bereits erreichten Abdichtungserfolge nicht gefährdet, jedoch die zu erwartenden Lastfälle abgedeckt wurden.

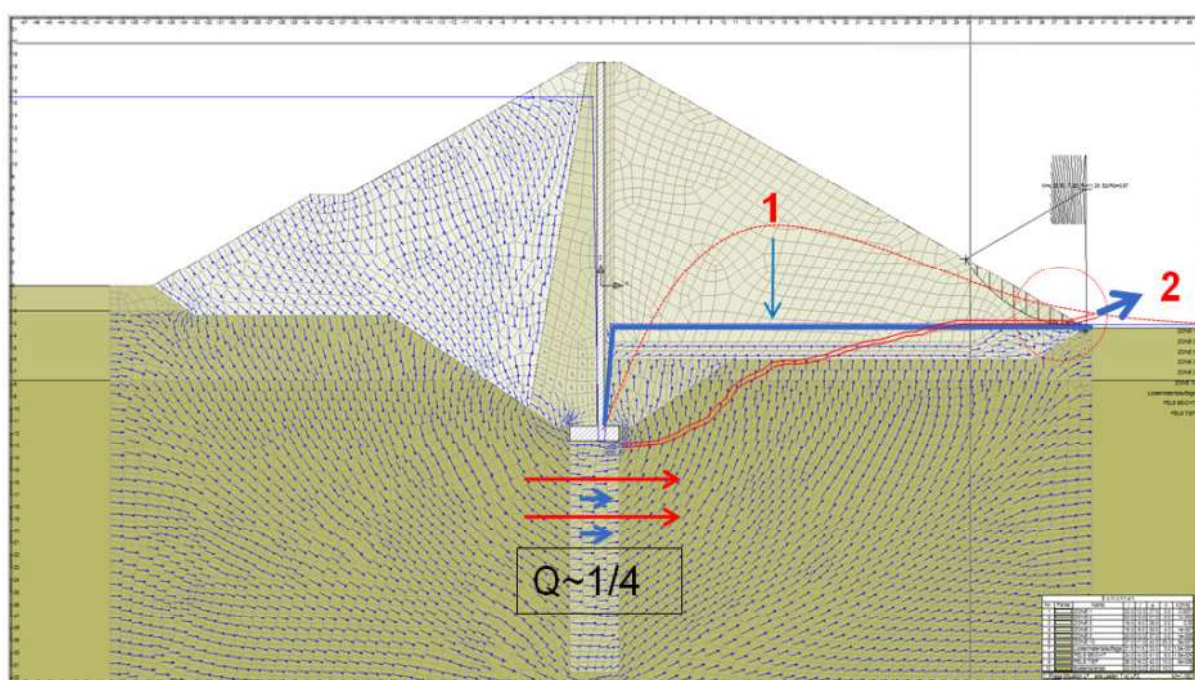


**Abbildung 17:** WD-Versuchsverlauf mit ~101Lugeon (li) und ~11 Lugeon (re) im Versuchsinjektionsfeld A

Im Zuge der bereits vorgelegenen Vorerkundung wurden ähnliche Verhältnisse festgestellt, jedoch bei Anwendung von verhältnismäßig geringem Versuchsdruck, ggf. vorliegenden Umläufigkeiten und resultierend daraus, mit bedeutender Hysterisis im Versuchsverlauf, was eine korrekte Interpretation der Versuche deutlich erschwerte. Ergänzende Erkundungen mit WD-Zieldrücken im tatsächlichen

Bereich der zu erwartenden hydraulischen Einwirkungen, wurden neben in-Situ-Messungen wie ABI/OBI, Versuchsinjektionen und Erosionsversuchen im Zuge von vertraglich verankerten Probeaufeldern durchgeführt.

Stabilitätsuntersuchungen unter Berücksichtigung der geohydraulischen Randbedingungen, welche mittels FE-Sickerströmungsberechnungen abgebildet wurden, zeigten, dass die Errichtung des rund 30m hohen Absperrbauwerkes die Durchführung von Untergrundabdichtungsmaßnahmen unerlässlich macht. Neben dem Erfordernis die Gefahr von „Piping“ auszuschließen, mussten die zu erwartenden Sickerwassermengen soweit reduziert werden, dass Sickerwasseraustritte außerhalb der luftseitigen Fußdrainage ausgeschlossen werden können und hinreichende Sicherheiten gegen Böschungs- und Grundbruch im Bereich des Dammfußes vorliegen (vgl. **Abbildung 18**). Dies stellte zudem eine genehmigungsrechtliche Grundlage dar, die seitens der Staubeckenkommission gefordert wurde.



**Abbildung 18:** Böschungsbruchberechnung am luftseitigen Dammfuß unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der FE-Sickerströmungsberechnung mit zentralem Dichtschirm (Reduktion des Durchfluss in der Dichtebene auf 1/4).

### Vorarbeiten und Bauvertrag

Im Zuge der Planungsarbeiten zum Dammbau, der weiterführenden Untersuchungen, Berechnungen und Abstimmungen mit den Referenten der Staubeckenkommission wurde entschieden, einen zentralen Dichtschirm mit wasser- und luftseitigen Anschluss- bzw. Vergütungsinjektionen, unter Verwendung von Zementsuspensionen zu erreichen. Die dazu erforderlichen Dimensionierungsarbeiten wurden soweit möglich auf Grundlage der Vorerkundungsergebnisse durchgeführt, welche auch als Grundlage zur Gestaltung des Bauvertrages dienen mussten. Die im Zuge der Vorerkundung gewonnenen Bohrkerne und Bohrlochlogs wurden dazu einer neuerlichen Interpretation mit Blick auf die durchzuführenden Injektionen unterzogen.

Ein Bauvertrag zur Errichtung eines Dichtschirms bzw. für Injektionsarbeiten ist in vielerlei Hinsicht für potenzielle Konflikte prädestiniert. Die üblichen Überraschungen im Zuge der Ausführung bzw. bei der Anwendung des Bauvertrages resultieren (a) aus dem Erkenntnis, das sich die Suspensionsaufnahme nicht kohärent mit der zuvor festgestellten Wasseraufnahme verhält, (b) der Tatsache, dass die "tatsächliche" Trennflächendichte und die Orientierungen zumeist nicht in dem Maße wie erforderlich festgestellt werden können, (c) daraus, dass wiederkehrend eingesetzte Standard-Rezepte für Suspensionen nicht auf die bedeutende Rolle der Suspensionsrheologie abgestellt werden. Dies resultiert in unzureichend planbaren Injektionsreichweiten und in Konsequenz daraus in Ungewissheit hinsichtlich der anzuwendenden Bohrlochabstände, (d) daraus, dass Injektionsparameter und Abbruchkriterien gerne mittels „copy-paste“ in Verfahrensvorschläge übernommen werden und zwar aus Projekten mit unterschiedlichen Randbedingungen. Also muss ein Injektions-Bauvertrag in erster Linie mit so vielen Freiheitsgraden ausgestattet sein, dass die technisch erforderlichen Maßnahmen im Kontext mit den zahlreich vorliegenden unbekanntem Faktoren einfach möglich sind und gleichzeitig die in der Regel divergierenden Interessen der Vertragsparteien bestmöglich befriedigt werden können. Aber auch Verbesserungen bei der laufenden Darstellung von Injektionsparametern, alternative bzw. ergänzende Interventionskriterien sowie laufend auf das Gebirge rheologisch abgestimmte Suspensionsrezepturen können helfen, ein technisch/wirtschaftlich optimales Injektionsergebnis zu erreichen.



**Abbildung 19:** hydraulisch gering wirksame Schieferungsflächen (gelbe Pfeile) und „offene“ hydraulisch wirksame Klüfte (rot)

## Ausführung

Im Zuge der Dichtschirmherstellung am Hochwasserrückhaltedamm Lankowitzbach wurden stark anisotrope Injektionsbedingungen festgestellt. Offene, mittelsteil bis steil stehende Klüfte waren von sehr gering durchlässigen (in der Regel in-Situ geschlossenen) Schieferungsflächen umgeben (vgl. **Abbildung 19**). Es war nicht bekannt wie sich der Durchtrennungsgrad sowie die Klufstdichte der offenen Klüfte über die gesamte Dichtebene darstellen. Die injektionstechnische Erreichbarkeit der offenen Klüfte erwies sich aufgrund der Notwendigkeit, diese über die verhältnismäßig gering durchlässigen Schieferungsflächen anzusprechen als problematisch, auch bei geringen Bohrlochabständen. Außerdem wurden im Zuge der Ausführung kakiritische Scherzonen aufgeschlossen, deren hydraulische Stabilität nicht bekannt war, wobei die kontrollierte Injizierbarkeit grundsätzlich als gering einzustufen war (vgl. **Abbildung 20**).



**Abbildung 20:** Scherzone im orographisch linken Kernwandinbindebereich

Im Zuge extensiver Injektionsversuche wurden insgesamt rund 10 Suspensionsrezepturen untersucht. Dabei wurde der Fokus grundsätzlich auf die Stabilität der Suspensionen sowie auf die jeweilig an die Trennflächenverhältnisse angepasste Fließgrenze unter dem Aspekt des geplanten „Injektionsradius“ gerichtet. Es konnten zwei „Grundsuspensionen“ auf Zementbasis gefunden werden, die im speziellen Fall, schließlich mit überraschend gutem Erfolg, zur Anwendung kamen:

- a) OPC-Suspension ( $\sim 2500 \text{cm}^2/\text{g}$ ), 1-2% Bentonit, bei einer Fließgrenze von  $\sim 40 \text{Pa}$
- b) FBM-Suspension ( $\sim 4500 \text{cm}^2/\text{g}$ ), 1-2% Zelluloseether bei einer Fließgrenze von rund  $\sim 10 \text{Pa}$

Im Zuge der Abstimmung der Rezepte im Detail stellte sich heraus, dass u.a. bei Beigabe von Fließmittel oder bei Änderung der Mischreihenfolge sowie bei Abweichungen bei der Vorbehandlung der Komponenten und insbesondere bei bereits geringen Änderungen der Mischungsverhältnisse bedeutende Unterschiede im Verhalten der Suspensionen resultierten. Dies konnte auf der einen Seite für Optimierungszwecke genutzt werden und auf der anderen Seite zeigte dies, dass den Konformitätsprüfungen eine hohe Bedeutung zukam.

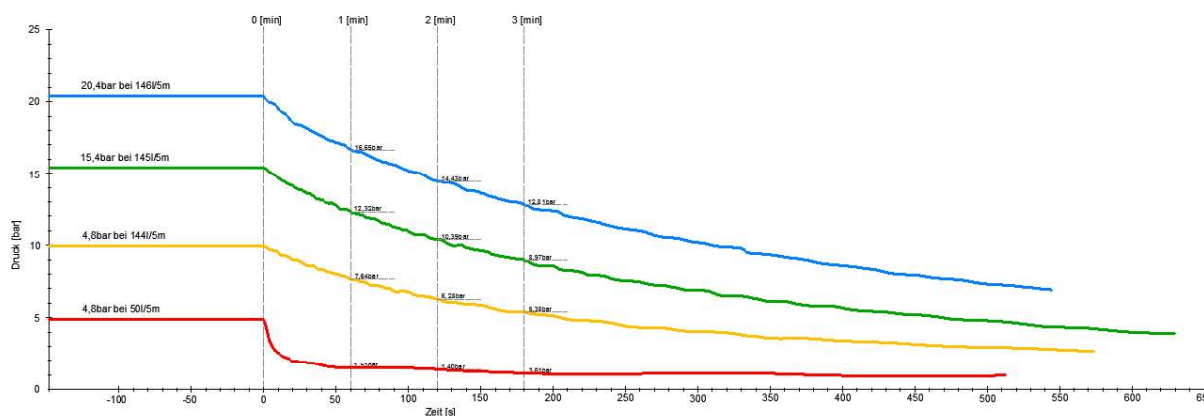
Die gewählten Suspensionen erwiesen sich als äußerst stabil, was Interventionen mittels Wechsel der Suspensionen während der Injektionen erleichterte. Der Grundsuspensionstyp (a) wurde bei erwarteter hoher Aufnahme von Injektionsgut in der jeweiligen Passe und der Grundsuspensionstyp (b) für die Injektion der offenen Klüfte durch die Schieferungsflächen hindurch eingesetzt (vgl. **Abbildung 21**). Für die Anwendung der Interventions- und Abbruchkriterien wurden 30“-TPA´s (Stadler 1993) herangezogen (vgl. **Abbildung 23**). Das Injektionsgut wurde aus Optimierungsgründen mittels MPSP-System (Bruce et. al. 1989) in den Untergrund eingebracht.



**Abbildung 21:** Injizierte, steilstehende Kluft



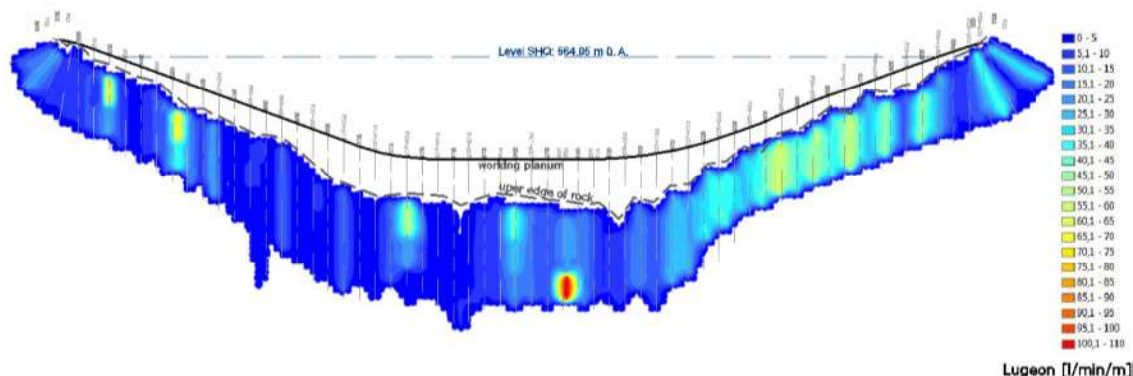
**Abbildung 22:** Injizierte Schieferungsflächen



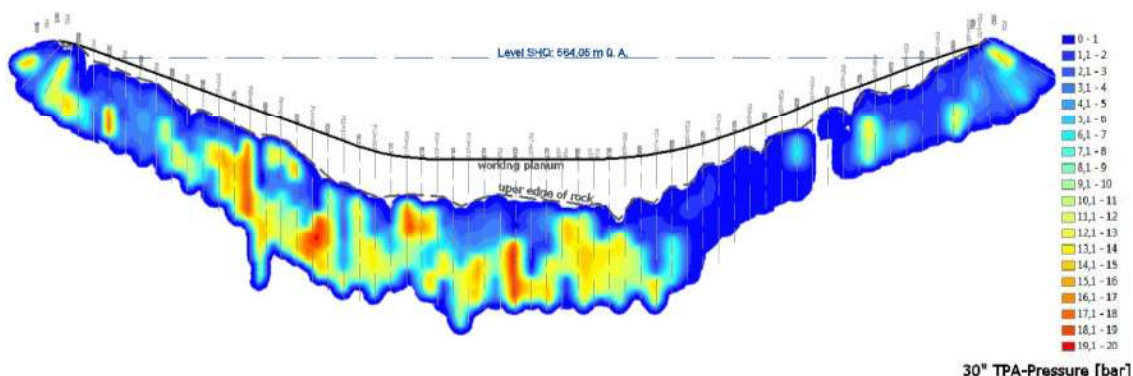
**Abbildung 23:** TP-Analysen bei fortschreitendem Injektionsvorgang und moderater Suspensionsaufnahme

Die kritische Hinterfragung der ermittelten Injektionsparameter unter Anwendung des allgemein anerkannten G.I.N-Verfahrens (Lombardi et al. 1993) führte zur technisch und bauwirtschaftlich wesentlichen Frage, ob angezeigte Werte von rund  $6.000 \text{ bar} \cdot \text{l/m}$  nicht nur sehr hohe Injektionsenergie bzw. Injektionsarbeit in der jeweiligen Passe vortäuschen? Die detaillierte Auswertung der vollständig aufgezeichneten Injektionsparameter für alle injizierten Passen ergibt, dass insbesondere bei hohen Injektionsgutaufnahmen überaus hohe G.I.N-Werte bei gleichzeitig hohen Restaufnahmefähigkeiten vorwiegend aus Reibarbeit und „druckloser Auffüllarbeit“ resultieren. Die Ableitung von Injektionsintensitäten aus dem Arbeitsdruck erscheint in diesem Zusammenhang als grundsätzlich nicht zulässig, da hier beträchtliche Abweichungen zwischen dem in der Kluft wirksamen und dem im Protokoll angezeigten Druck vorliegen, auch wenn dieser am Bohrlochmund gemessen wurde. Dies wird bei Auswertung einer „Latenz-G.I.N.“ (vgl. *Abbildung 26*) deutlich. Aus Sicht des Autors ist es aber auch aus technischen und wirtschaftlichen Gründen erforderlich, weitere automatisiert darstellbare, baustellentaugliche Injektionsparameter wie etwa (a) Druckgewichtetes mittleres Injektionsvolumen oder (b) volumengewichteter, effektiver Injektionsdruck, zu etablieren, um die tatsächliche im Gebirge wirksame Injektionsarbeit feststellen zu können. Alternativ dazu kann im bestehenden Sinn des G.I.N. Gedanken mit dem erforderlichen Fokus auf die Drucksensitivität von Injektionen, ein „Unterer Grenz-TPA-Druck“ definiert werden, unter welchem das Injektionsvolumen nicht in die G.I.N.-Auswertung einfließt. Ungeachtet dessen, sind im Falle sehr hoher Injektionsvolumen ohne annehmbare

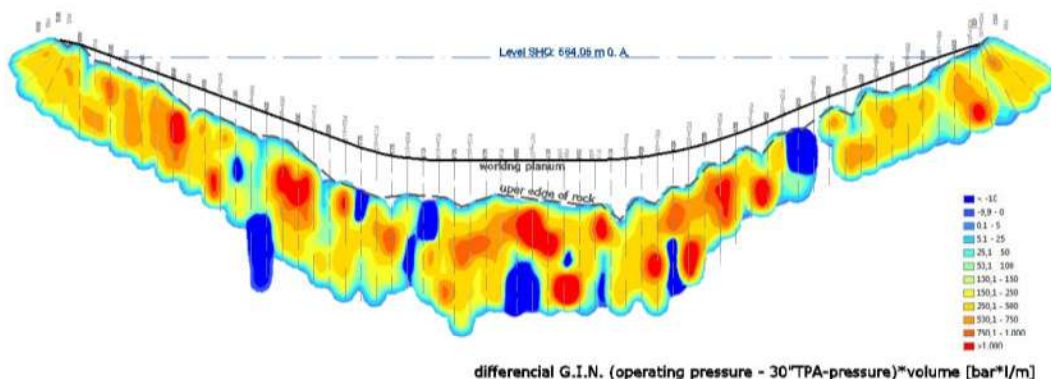
Druckentwicklung die Suspensionsrezeptur und auch das Verfahren grundsätzlich zu hinterfragen bzw. anzupassen, nicht zuletzt, um der ÖNORM EN 12715 und dem Gedanken des drucksensitiven Injizierens „im Dialog mit dem Gebirge“ (Stadler mündlich 2012) gerecht zu werden.



**Abbildung 24:** Kriging-Interpolation über die vor der Injektion gemessenen WD-Versuchswerte über den Dichtschirm



**Abbildung 25:** Kriging-Interpolation über die vor Abschluss der jeweiligen Passen gemessenen Drücke aus 30“-TPA’s



**Abbildung 26:** Kriging-Interpolation über die „Drucklatenz“ zwischen 30“-TPA’s und Arbeitsdruck

## Literatur

- Bruce D. A. and Croxall J. E.: The MPSP-Grouting System: A new Application for Raise Boring, International Conference on Foundations and Tunnels, London; 1989
- Deere D. U. and Lombardi G., 1985: Grout Slurries thick or thin?, Issues in Dam Grouting, ASCE - Denver.
- Heinz Anja, 2007: Modifizierte Bentonitsuspensionen für geotechnische Bauverfahren in Böden hoher Durchlässigkeit, IGT – Zürich.
- Lombardi G. (1996), Selecting the grouting intensity, The International Journal on Hydropower & Dams, Volume Three, Issue Four, pp. 62-66
- Lombardi G. (2003), Grouting of Rock Masses, Grouting and Ground Treatment, Proceedings of the Third International Conference, Geotechnical Special Publication No. 120, ISBN: 0-7844-0663-4.
- Lombardi G. and Deere D. U. (1993), Grouting design and control using the GIN principle, Water Power & Dam Construction, June 1993, pp. 15-2
- Lombardi Giovanni, 1999: Grouting of Rock with Cement Mixes, ICOLD-Symposium, Antalya.
- ÖNORM EN 12715 – Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten – Injektionen
- Stadler, G. (1993), Untersuchungen zur Kluftinjektion und ihren Beziehungen zu physikalischen Modellen der Erdöllagerstättentechnik. Berichte der Int. Konf. Betr. Injektionen in Fels und Beton. A. A. Balkema Rotterdam.
- Weaver D. Kenneth und Bruce Donald A., 2007: Damm Foundation Grouting, American Society of Civil Engineers, Reston – Virginia – USA.
- Zettler, A. H., Poisel, R., Reichl, I., Stadler, G., Dimensionierungen von Injektionen mittels messender Beobachtung., Beiträge zum 14. Christian Veder Kolloquium, Heft 4, 45-58 (1999) Gruppe Geotechnik Graz.