

# Felsmechanische und felshydraulische Aspekte einer Grosskaverne

Philippe Nater, Pascal Minder, Joseph Kaelin - AFRY, Zürich

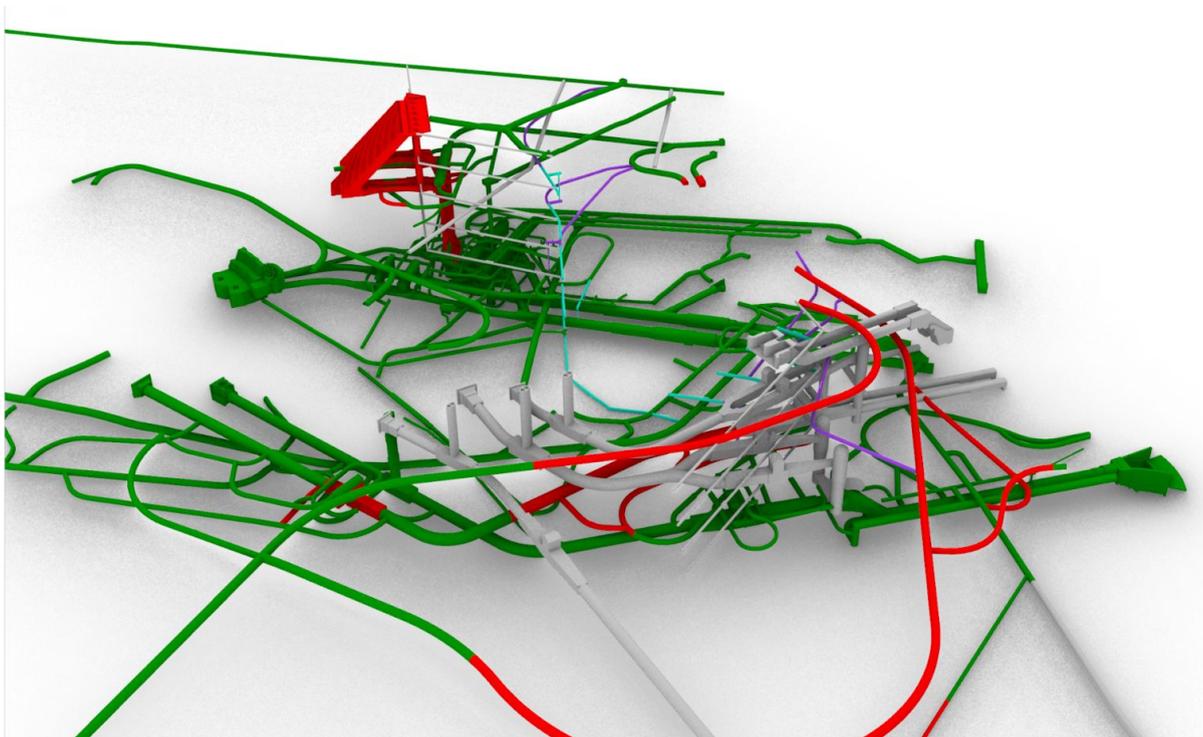
## 1 Einleitung

Vorausgehend sei folgendes gesagt: Das vorgestellte Projekt befindet sich im Bau und in rollender Planung. Der Kunde wünscht keine Nennung und keine spezifischen Angaben zum Projekt und diesem Wunsch wird stattgegeben. Nichtsdestotrotz finden sich verschiedene interessante Aspekte, die hier gerne dargelegt werden.

Das Projekt hat eine lange Geschichte. Die Planung begann bereits in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts und der Bau in den 80er Jahren. Wegen politischer Umwälzungen und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten wurde das Projekt anfang der 90er Jahre aufgegeben und verblieb eine Bauruine. Zusätzlich wurden die tiefer liegenden Teile der Anlage, z.B. die Maschinenkaverne und die Trafokaverne, nach Naturereignissen geflutet.

Nach ca. 20 Jahren des Stillstands wurden Studien zur Wiederaufnahme der Planungs- und Bautätigkeit in Angriff genommen. Zum Teil begannen niederschwellig auch weitere Bauarbeiten zur Bestandssicherung. Offiziell wurde das Projekt nach 25 Jahren Stillstand wieder aufgenommen.

Die Abbildung 1-1 zeigt die derzeit gebauten, sich im Bau befindlichen oder konzeptionell vorgesehene Anlageteile im Modell.



**Abb. 1-1: Mehrheitlich untertägige Anlageteile im 3d Modell. Grün - gebaut, rot - in Ausführung, grau - konzeptionell. Fließrichtung von links nach rechts. Linksufrig: Triebwasserwege, rechtsufrig: Hochwasserentlastung.**

Geplant ist der Einbau von sechs Turbinen mit einer installierten Kapazität von total 3.5 GW. Zwei Turbinen wurden bereits in Betrieb genommen, um mit den Einnahmen aus der Produktion eine Teilfinanzierung des Projekts zu ermöglichen.

## **2 Geologie**

Die Anlageteile werden hauptsächlich in Sand- und Siltsteinen aufgeföhren, die im Aufbau weitgehend einer Molasse ähneln. Die Sedimentschichten weisen Einlagen von Gips auf, die sich unter Einfluss einer Sickerströmung potentiell auslösen können. Dazu kommen zwei überregionale Störungen, sowie mehrere kleinere Störungen und Verwerfungen. Zumindest eine der regionalen Störungen wird von bis zur Oberfläche reichenden Salzschiehten begleitet, die sich wiederum unter Einwirkung einer Sickerströmung auslösen können.

Im Verlauf der diversen Projektierungsphasen wurden etliche geomechanische Versuchsprogramme durchgeführt, deren Ergebnisse entweder nicht mehr eingesehen werden können oder von der Qualität als ungenügend bewertet wurden. Aktuell wurden Labor- und In-Situ Versuche bestellt, Ergebnisse stehen aber noch keine zur Verfügung.

Im Verlauf der neueren Bauarbeiten wurden ca. 2'000 Wasserabpressversuche durchgeführt, deren Ergebnisse neu ausgewertet werden konnten. An mehreren Bauwerken konnten die Injektionsarbeiten zur Beurteilung der Wasserabpressversuche herangezogen werden.

Das ganze Gebiet ist tektonisch stark überprägt, was sich auch in der Ausbildung der grossen Hauptstörzonen zeigt. Der aktive tektonische Schub föhrt zu konstanten jährlichen Verschiebungen im Zentimeterbereich. Zusätzlich zur Tektonik wird das Spannungsregime auch durch starke Erosion geprägt. Die verfügbaren Angaben sind vage, neue Versuchsergebnisse stehen noch keine zur Verfügung.

## **3 Grosse Querschnitte**

Wie aus Abbildung 1-1 bereits ersichtlich ist, besteht die Gesamtanlage aus mehreren dutzend untertägigen Anlagenteilen. Hier wird der Fokus auf die linksufrigen Triebwasserwege gelegt, die in der folgenden Abbildung ebenfalls im Modell gezeigt werden.



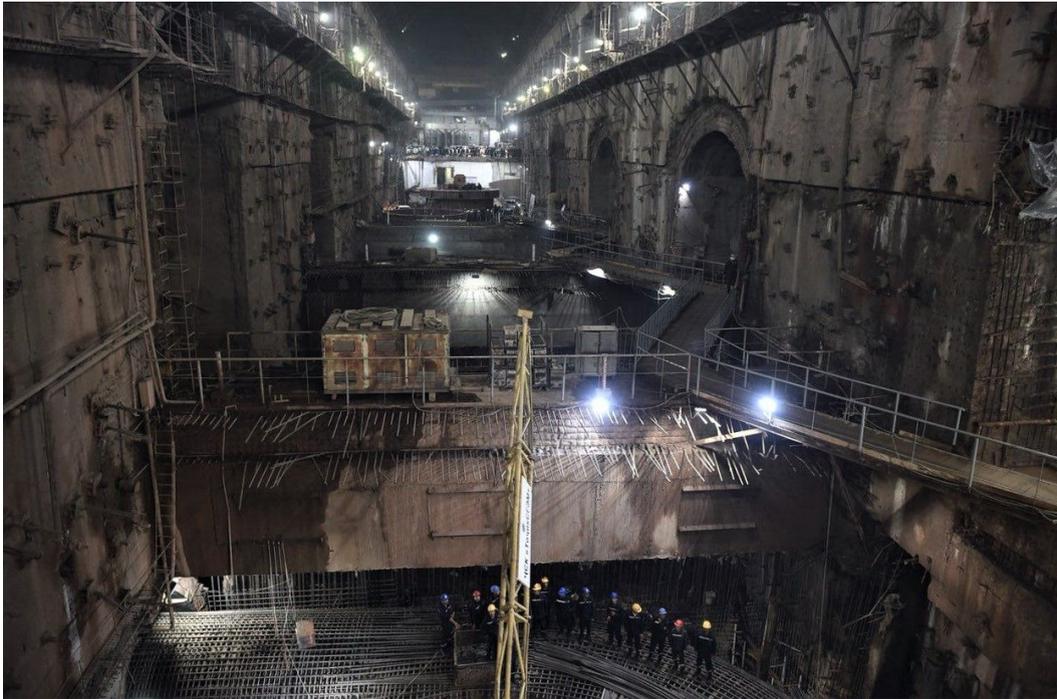
**Abb. 3-1: Triebwasserwege und Hauptkavernen im 3d Modell. Grün - gebaut, rot - in Ausführung.**

Die Trafokaverne und die Maschinenkaverne bilden die Kernstücke der Anlage. Die Trafokaverne liegt vorwiegend in kompaktem Sandstein und hat die Dimensionen  $L \times B \times H = 200 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 41 \text{ m}$  (Abbildung 3-2). Die Felsicherung besteht aus schlaffen und vorgespannten Felsankern und Spritzbeton resp. direkt an den Fels betonierten Ortbeton. Alle Ankerbohrungen wurden systematisch auch als Injektionsbohrungen verwendet. Die Rezeptur des verwendeten Injektionsguts wurde erst zu einem relativ späten Zeitpunkt von einem sehr dünnen Mix (W/Z ca. 10/1) auf einen üblichen W/Z-Wert ( $W/Z < 1$ ) angepasst.



**Abb. 3-2: Trafokaverne im Bauzustand.**

Die Maschinenkaverne weist noch erheblich grössere Dimensionen auf: L x B x H = 220 m x 25 m x 54 m. Wie erwähnt sind die ersten beiden Einheiten bereits in Betrieb während in der Kaverne weitere Bauarbeiten stattfinden. Zur weiteren Stabilisierung der hohen vertikalen Wände wurden massive balkenähnliche Stützelemente im Fels belassen (siehe Abb. 3-3 im Vordergrund).



**Abb. 3-3: Maschinenkaverne im Bau. Stützbalken im Vordergrund.**

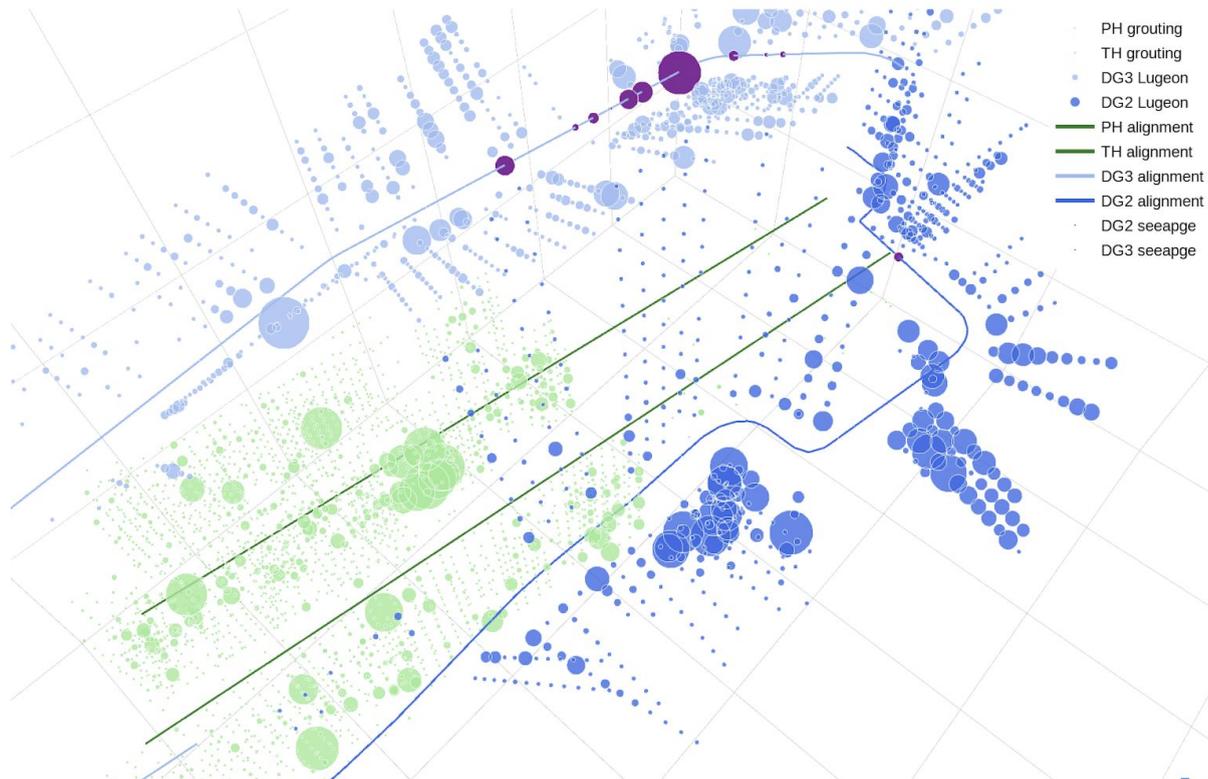
Auch in der Maschinenkaverne wurden alle Ankerbohrungen systematisch als Injektionsbohrungen verwendet.

## **4 Sickerströmung zur Maschinenkaverne**

### **4.1 Eingangsdaten**

Im Planungsprozess wurde das vorgesehene Abdichtungskonzept für die Maschinenkaverne mittels numerischer Berechnungen überprüft. Dabei kam eine Sickerströmungsbetrachtung nach Darcy zur Anwendung. In einem ersten Schritt mussten die repräsentativen Durchlässigkeitsbeiwerte für die verschiedenen Schichtpakete bestimmt werden. Die anfänglich zur Verfügung gestellten Grundlagen bestanden aus den Ergebnissen von Wasserabpressversuchen (Lugeon), der Dokumentation der Zementaufnahme von systematischen Konsolidationsinjektionen und der Auswertung von Testinjektionen.

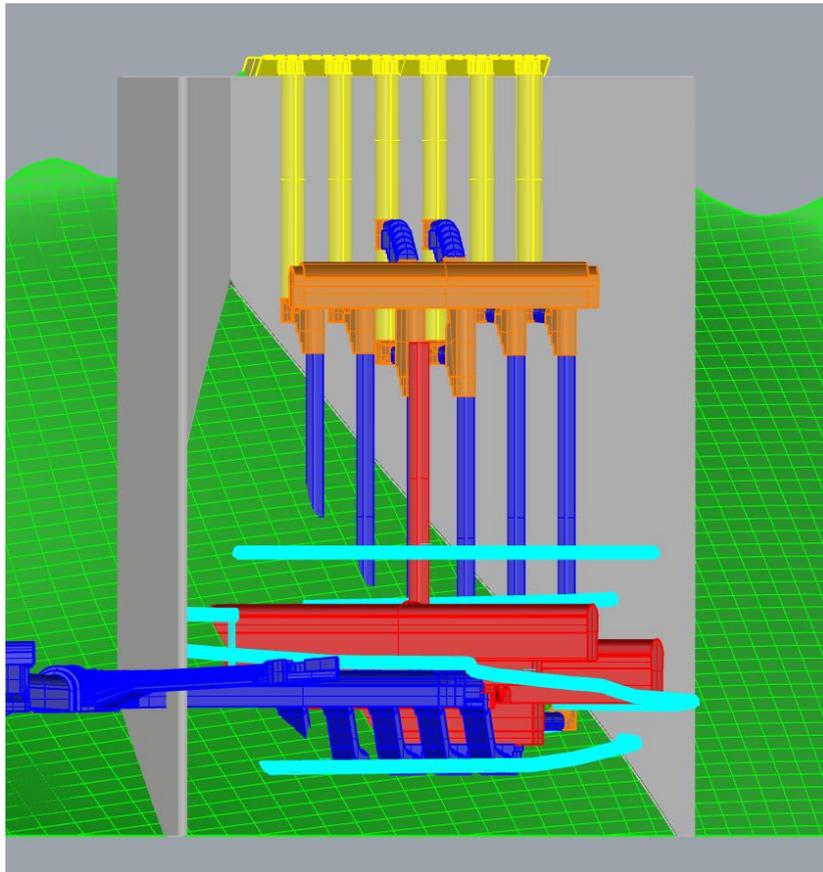
Alle zur Verfügung stehenden Ergebnisse wurden auf ihre Plausibilität überprüft, neu ausgewertet und interpretiert, um zumindest Grössenordnung, Variabilität und räumliche Verteilung der anzusetzenden Durchlässigkeitsbeiwerte einzuschätzen (siehe Abbildung 4-1).



**Abb. 4-1: Räumliche Darstellung der Lugeon-Werte im Bereich der Maschinen- und der Trafokaverne. Grösse der Datenpunkte entspricht dem gemessenen Lugeonwert an dieser Stelle. Zahlreiche Versuche wurden auch aus den vorhandenen Dränagegalerien um die Grosskavernen durchgeführt.**

Zusammen mit den laufend eintreffenden Ergebnissen aus Erkundungsbohrungen wurden Szenarien aufgestellt, die dann in den Berechnungen abgebildet wurden. Da die angesetzte Gebirgsdurchlässigkeit vom Durchtrennungsgrad des Gebirges dominiert wird, beziehen sich die Szenarien auf die Tiefe einer ausgeprägten Verwitterungszone und auf einen potenziellen systematischen Injektionsschirm zur Abdichtung offener Kluftsysteme.

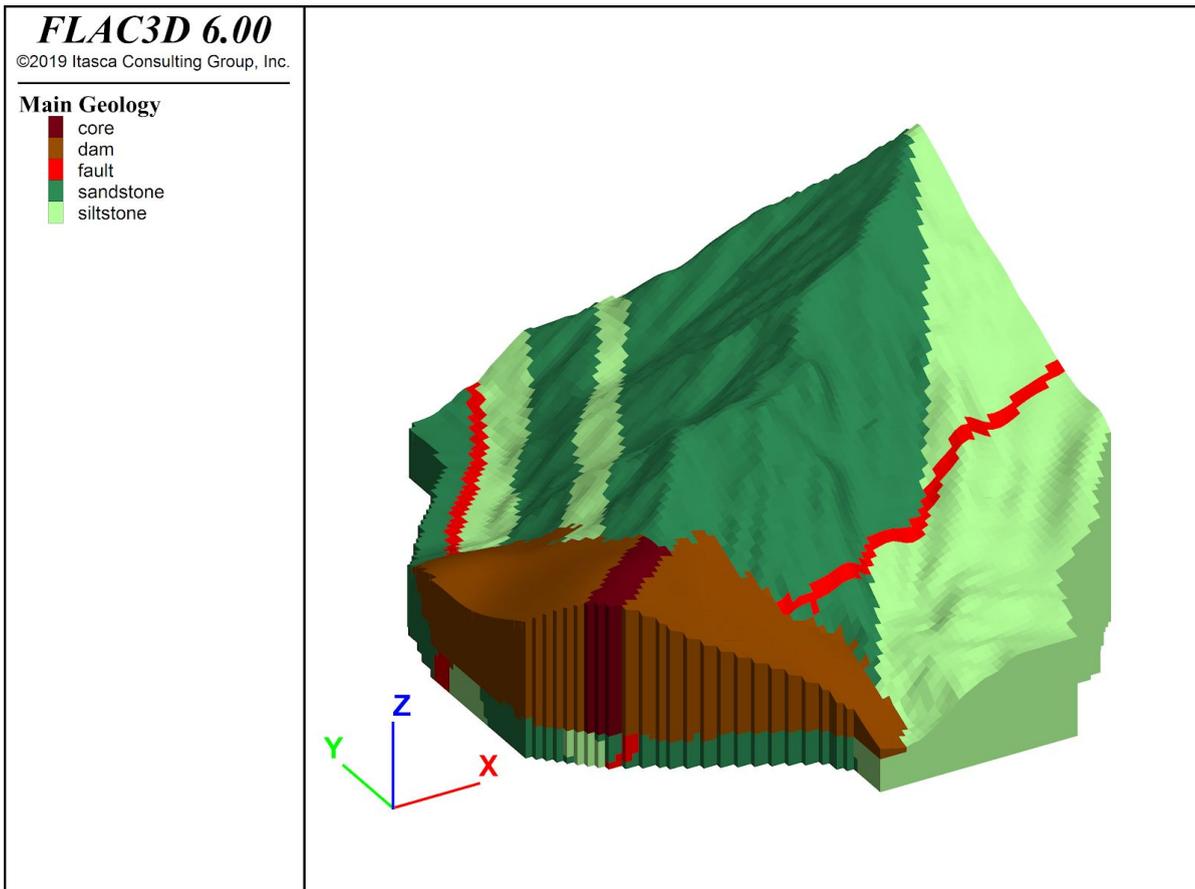
Der vorgeschlagene Abdichtungsschirm ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Er deckt einerseits die oberflächennahen durchlässigen Partien entlang der Dammachse ab (Massnahmenpaket 1) und wird unter dem Einlaufbauwerk in die Tiefe erweitert, um vollständig in den Siltstein einzubinden (Massnahmenpaket 2). Zwischen dem Injektionsschirm und den Kavernen wurden vier Dränagegalerien auf unterschiedlichen Höhen zur Entspannung des verbleibenden Gebirgswassers aufgeföhren.



**Abb. 4-2: Schematische Darstellung des Abdichtungsschirms (grau) um die Hauptkavernen (rot): Die Drainagegalerien sind hellblau dargestellt, die Schichtgrenze zwischen Sandstein und Siltstein ist grün schraffiert.**

## 4.2 Modellierung

Die Modellierung wurde in einer kommerziellen Finite-Differenzen Software durchgeführt (ITASCA FLAC 3D). Die einfach zugänglichen Schnittstellen für 3D-Daten aus anderen Anwendungen liessen eine weitgehende Automatisierung des Berechnungsprozesses und der Auswertung zu. In der Entwicklung des Modells wurde ein vereinfachtes geologisches 3D Modell erstellt in dem die wesentlichen Schichten zusammengefasst wurden. Die Vermaschung des Modells wurde im Hinblick auf die Ergebnisse und die Berechnungszeit optimiert.



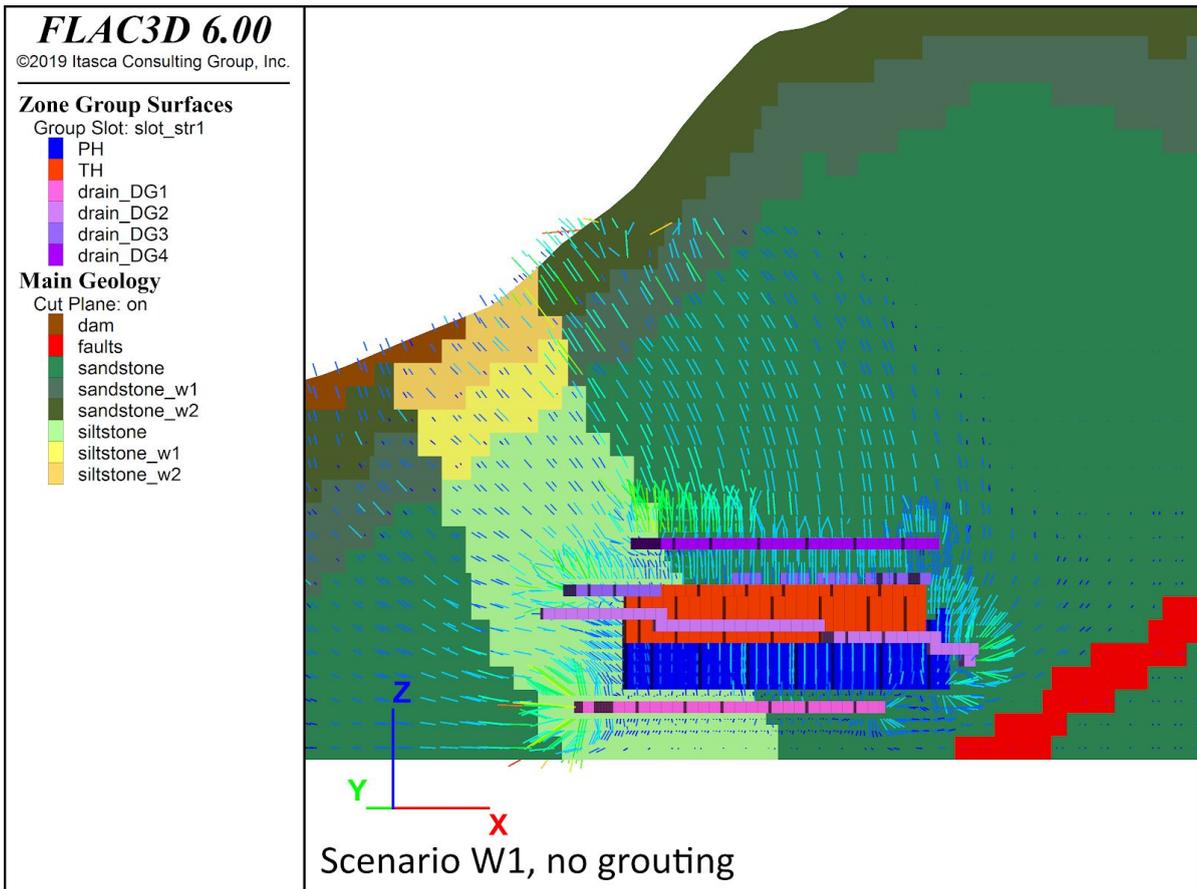
**Abb. 4-3: Finite Differenzen Modell der linken Talflanke eingefärbt nach geologischen Einheiten.**

Ein Blockmodell mit einheitlicher Zonengrösse wurde über ein Gebiet von 2.3 km<sup>2</sup> generiert. Die Zonen an der Oberfläche wurden an eine mit Drohnenüberflügen aufgenommenen Topografie angepasst. Im Bereich der abgebildeten unterirdischen Strukturen wurde die Zonengrösse automatisch reduziert, um die Bauwerke ausreichend genau aufzulösen.

Die Modellränder wurden in grossem Abstand zu den Hauptkavernen gewählt und anschliessend entlang von Wasserscheiden und Taltiefpunkten geschnitten (Abbildung 4-3). Dabei wurde darauf geachtet, dass auch die massgebenden Störzonen und Verwerfungen innerhalb der Modellgrenzen lagen. Sie wirken im Hinblick auf die untersuchte Sickerströmung aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit vorwiegend als Stauer.

### 4.3 Ergebnisse

Die berechnete Sickerströmung wurde im Rahmen der vorliegenden Problemstellung primär bezüglich zweier Aspekten ausgewertet. Einerseits wurden die Sickerwege vom Reservoir zu den Kavernen ermittelt und im Hinblick auf mögliche Abdichtungsmassnahmen beurteilt (Abbildung 4-4). Andererseits wurde der Wasseranfall in den einzelnen Objekten je Szenario bestimmt und relativ untereinander verglichen (Tabelle 4-1).



**Abbildung 4-4: Profilschnitt entlang der Maschinenkaverne mit hinterlegter Geologie und Strömungsvektoren.**

Der Zustrom zu den Kavernen wird durch die Drainagegalerien allseitig abgefangen. Als Haupttrichtungen sind der horizontale Anstrom zur untersten Galerie und der schichtparallele Zustrom zur obersten Galerie zu erkennen. Im nicht dargestellten Szenario W2 mit grösserer Verwitterungstiefe steigt der Fliessmenge im Siltstein an und auch die mittleren Galerien weisen gesteigerte Zuflüsse auf.

**Tabelle 4-1: Totaler und normierter Wasseranfall in den Hauptkavernen und Drainagegalerien bei maximalem Einstau.**

Wasseranfall	Nur Drainagegalerien	Mit Konsolidationsinjektionen um Dammkörper	Mit erweitertem Injektionsschirm entlang der Talflanke
<b>Geologieszenario W1: 80m Verwitterung</b>	49 l/s 74%	47 l/s 71%	41 l/s 62%
<b>Geologieszenario W2: 150m Verwitterung</b>	66 l/s 100%	65 l/s 98%	55 l/s 84%

Die Ergebnisse wurden früheren Berechnungen, In-Situ Beobachtungen und ersten Klufftströmungsmodellen gegenübergestellt und zeigen soweit eine gute Vergleichbarkeit im Rahmen der getroffenen Annahmen. Da der jetzige Einstau des Reservoirs den

Wasseranfall nicht wesentlich beeinflussen kann, ist eine abschliessende Beurteilung der Modellqualität noch nicht möglich.

Aus den Ergebnissen wurde ein Untersuchungsprogramm abgeleitet, um weitere Aussagen über den Durchtrennungsgrad und dessen hydraulischen Einfluss zu gewinnen. Dies ist umso wichtiger, als der tatsächliche Wasseranfall durch die Aktivierung von einzelnen grösseren Klüften oder Kluftscharen dominiert würde. Zusätzlich ist die Installation von Messsystemen angelaufen, um in ausgewählten Tunneln den Wasseranfall und im Gebirge den Wasserdruck zu erfassen.

## 5 Schlussfolgerungen

### Zur Projektanlage

Grosse Projekte mit komplexer Anordnung der Bauwerke in schwieriger Geologie führen automatisch zu grossen Herausforderungen, die weder Kunde noch die beteiligten Planer oder Unternehmer in allen Facetten erfassen können. Hier spezifisch zu erwähnen ist die lange und komplizierte Projektgeschichte die auch in die Schwierigkeit mündet, gewachsene Strukturen wirklich zu ändern. Eine Priorisierung der Aufgaben ist aufgrund der Gleichzeitigkeit von Planung und Bau faktisch nicht möglich.

### Zur Modellierung

Die Berechnungssoftware erlaubte den Import von 3D-Daten aus unterschiedlichen Quellen. Durch programmierte Konstruktionsanweisungen konnte eine händische Erstellung des Modells (Point&Klick) vermieden werden. Der Umgang mit 3D-Grundlagen ist im Rahmen der zunehmenden Verfügbarkeit wichtig, eine saubere Aufbereitung und zweckmässige Vereinfachungen sind jedoch unumgänglich.

Die dynamische Modellgenerierung hat sich im Laufe der Arbeiten bewährt. Während der Aufbauphase und der Szenarienbildung konnte mit grosser Hauptmaschenweite (32m) gearbeitet werden, um rasch eine Vorauswahl zu treffen. Die Anzahl an Berechnungen mit langer Rechenzeit an feinmaschigen Modellen blieb dadurch überschaubar. Ebenso konnten Änderungen an den unterirdischen Strukturen rasch eingepflegt werden.

Die Resultate ermöglichten die Beurteilung von Massnahmenvarianten und konnten so dem Bauherrn als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden. Eine Weiterverwendung der errechneten Porenwasserdrücke in felsmechanische Analysen ist in den kommenden Phasen geplant.

Philippe Nater

Pascal Minder

Joseph Kaelin

[philippe.nater@poyry.com](mailto:philippe.nater@poyry.com)

[pascal.minder@poyry.com](mailto:pascal.minder@poyry.com)

[joseph.kaelin@poyry.com](mailto:joseph.kaelin@poyry.com)

AFRY - Herostr. 12 - 8048 Zürich







