

# **Kavernenzentrale Linth–Limmern — Ausbruchs– und Sicherungskonzept**

Martin Keller

Ingenieurunternehmung AG

# Kavernenzentrale Linth-Limmern – Ausbruchs- und Sicherungskonzept

Referent:  
Martin Keller, dipl. Ing. ETH



KLL\_Vortrag\_ETHZ\_13-12-07.ppt

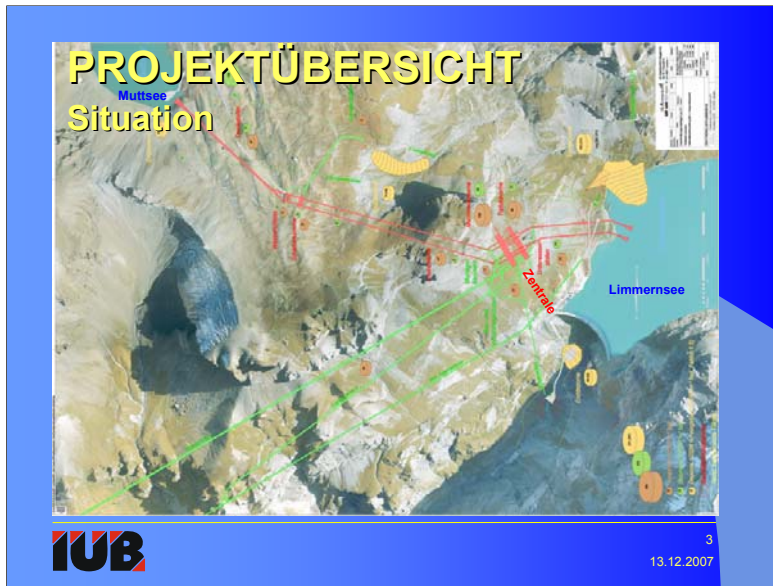
13.12.2007

## INHALTSÜBERSICHT

- Projektübersicht
- Kavernenlayout
- Übersicht Geologie
- Felsmechanik
- Konzept Ausbruchsicherung und Querschnittgestaltung
- Ausbruchvorgang
- Beispiel Kaverne Amsteg



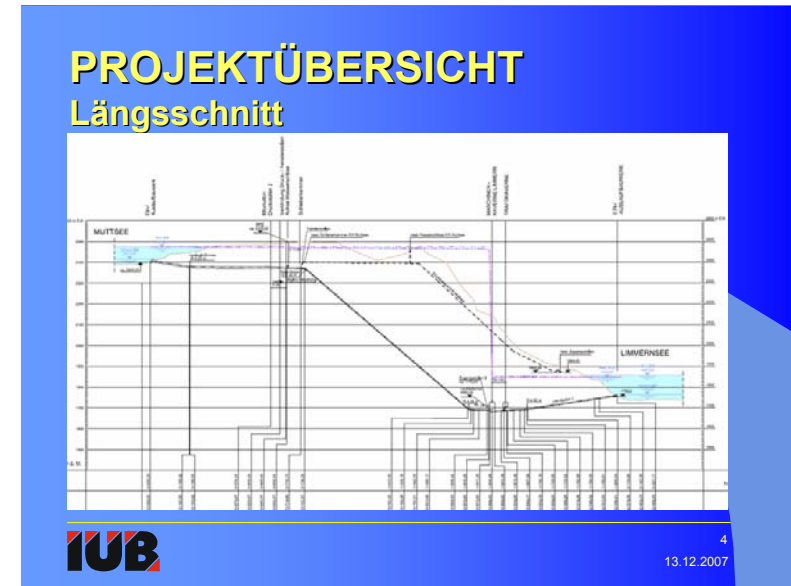
2  
13.12.2007



Die Kraftwerke Linth-Limmern planen den Bau eines neuen Pumpspeicherwerks als Erweiterung der bestehenden Anlagen.

Dabei wird das Wasser aus dem bestehenden Stausee Limmern in den Muttsee hochgepumpt.

Mit einer Staumauer wird der maximale Spiegel des Muttsees um 28 m erhöht.



Die Anlage besteht im wesentlichen aus dem Druckstollen, dem Wasserschloss, den beiden Druckschächten, der Maschinen- und der Trafokaverne und den Unterwasserstollen.

Im vorliegenden Vortrag geht es um Ausbruch und Sicherung der beiden Kavernen.

## PROJEKTÜBERSICHT

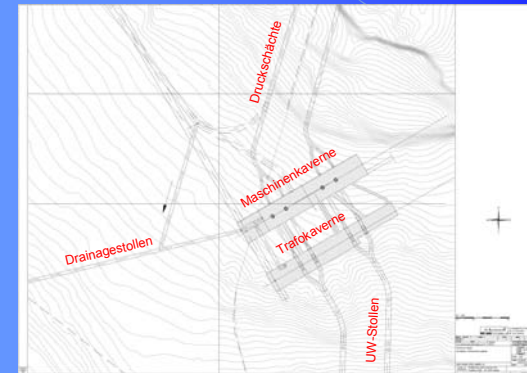
### Wichtigste Kenndaten der Anlage

- Max. Nutzhöhe **709 m**
- Wassermengen (Auslegung = 645 m Fallhöhe)
  - Pumpen **144 m<sup>3</sup>/s**
  - Turbinieren **184 m<sup>3</sup>/s**
- Elektrische Leistung
  - Pumpen **4 x 250 MW**
  - Turbinieren **4 x 250 MW**
- Nutzvolumen Muttsee **25 Mio. m<sup>3</sup>**

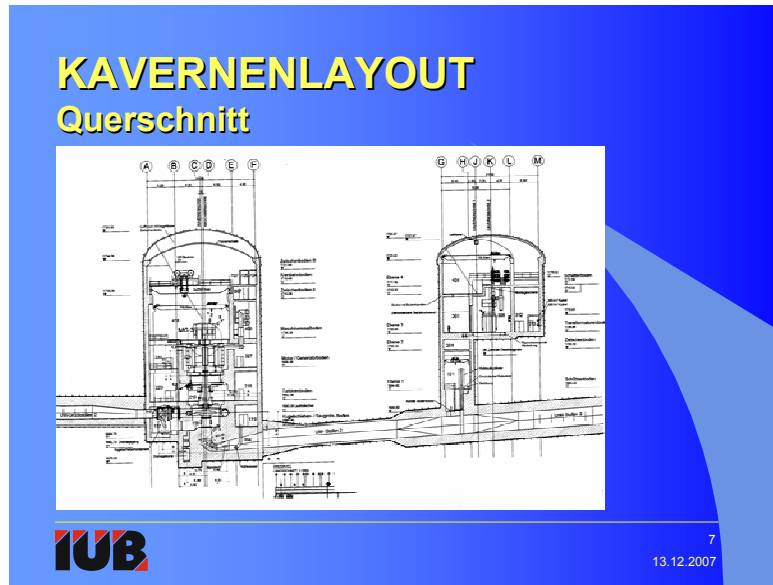
5  
13.12.2007

## KAVERNENLAYOUT

### Situation

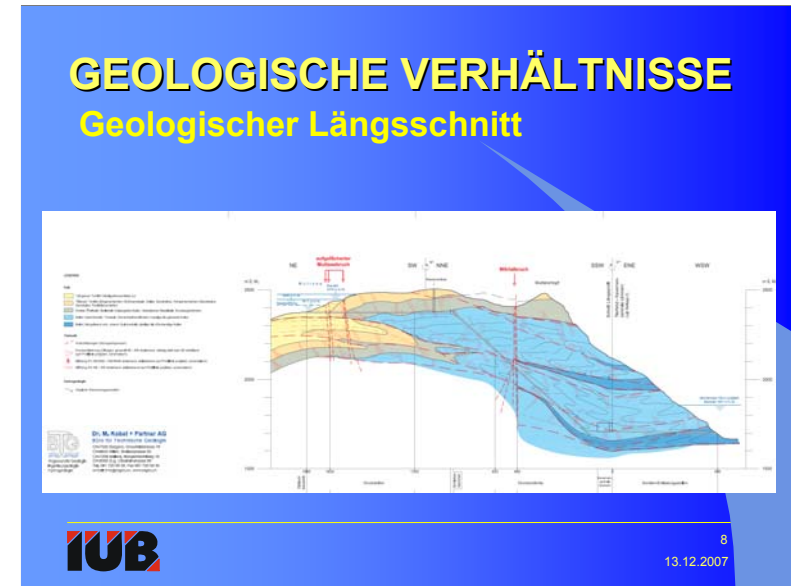
6  
13.12.2007

Die beiden Kavernen sind gegenüber den Triebwasserleitungen abgknickt. Wie später gezeigt wird hat dies einen besonderen Grund.



Die Maschinenkaverne (links im Bild) hat gemäss Vorprojekt eine Breite von 26 m und eine Höhe von rund 50 m.

Die Trafokaverne ist rund 23 m breit und ebenso hoch. Für die Bedienung der Unterwasserschützen sind einzelne Schächte vorgesehen.



Im Projektgebiet wird das Limmernkristallin durch autochthone Sedimente der Trias und des Juras, den parautochthonen Schuppen von Malm, Kreide und Tertiär sowie von Paketen des Nordhelvetischen Flysches und des darüber geschobenen Wildflysches überlagert.

Das Bild zeigt die geologischen Verhältnisse in einem Längsschnitt durch den Druckstollen und die Druckschächte, die Kavernen und den Drainagestollen. Die Kavernen kommen in den Quintnerkalk der parautochthonen Schuppen zu liegen, welcher massig gebankt vorliegt.

Die scheinbare Abbiegung der Schichten im Kavernenbereich ist durch die Abknickung des Längenprofils im Grundriss bedingt.

Der Gebirgswasserspiegel wird unter dem Niveau der Kavernen vermutet, was allerdings durch Sondierungen noch bestätigt werden muss.

Die Verhältnisse im Bereich der Kavernen werden zur Zeit durch einen Erkundungsstollen aufgeschlossen, von welchem aus der gesamte Kavernenbereich mittels Kernbohrungen detailliert abgeklärt wird. Der Stollen hat mittlerweile den Kavernenbereich erreicht. Die geologische Prognose hat sich aus heutiger Sicht bestätigt.

## GEOLOGISCHE VERHÄLTNISSSE

### Klüftung

- **Schichtung  $S_0$**   
Tritt als Trennflächen nur untergeordnet in Erscheinung
- **Hauptklüftung K1**  
Massgebliches, hochgradig durchtrennendes Klufsystem lokal zu Klufscharen gebündelt
- **Klufsystem K2**  
Kluftabstand oft 1 – 5 m, Durchtrennung mit Reichweiten 3 - 10 m

Stereographische Projektion  
Trennflächen im Bereich Schichtungen und Klüftung

Anzahl Messpunkte  
K1: 10  
K2: 10  
K3: 10  
K4: 10

9  
13.12.2007

Der Malmkalk ist im Projektgebiet grobbankig ausgebildet. Er ist zudem leicht metamorph überprägt und weist eine Druckschieferung auf, welche generell mit  $40 - 60^\circ$  nach SSE einfällt.

Der Fels wird von einem Hauptklufsystem K1 und zwei bis 3 Nebenkluftsystemen (K2, K3 und K4) durchzogen.

Im Kavernenbereich werden 3 Klufscharen prognostiziert wie aus der Klufdarstellung ersichtlich ist.

- Die Schichtung streicht NE – SW und fällt mittelsteil nach SE ein. Sie tritt ebenso wie die Schieferung als Trennflächen nur untergeordnet in Erscheinung.

- Das Hauptklufsystem K1 streicht etwa SE – NW und ist steil stehend und ist hoch durchtrennend. Sie können lokal zu plattigen Klufscharen im dm-Abstand gebündelt sein.

- Für die Kavernenzentralen haben noch die Klüfte K2 eine Bedeutung, welche hier vermutlich mittelsteil nach NW einfallen.

- Wie aus der obigen Darstellung ersichtlich ist, streichen die K1-Klüfte praktisch rechtwinklig zur Kavernenachse. Damit ist auch der Grund für die abgedrehte Lage der Kavernen erklärt. Sie wurde so orientiert, dass die Hauptklüfte die Kavernen in einem möglichst günstigen Winkel schneiden.

## FELSMECHANIK

### Gebirgseigenschaften

- **Gesteinsfestigkeit**  
 $\sigma_c$   $120 \pm 20 \text{ MN/m}^2$
- **Gebirgsfestigkeit**  
 $\varphi$   $39 \pm 3^\circ$   
 $c$   $8 \pm 4 \text{ MN/m}^2$
- **Elastizitätseigenschaften**  
E-Modul  $25 \pm 5 \text{ GN/m}^2$   
 $\nu$  0,3
- **Klüfte**  
 $\varphi$   $33 \pm 3^\circ$   
 $C$   $1 \dots 4 \text{ MN/m}^2$

10  
13.12.2007

Die vertikale Überlagerung der Kavernen beträgt rund 500 m, was auf dem Niveau der Kavernen Spannungen von rund 13 Mpa bewirkt.

Aus den Scherparametern für das Gebirge kann eine Gebirgsfestigkeit von etwa 16 - 54  $\text{MN/m}^2$  abgeleitet werden.

## FELSMECHANIK

### Gefährdungsbilder

- Durchgehende Klüfte K2 zwischen den Kavernen
- Überschreitung der Gebirgsfestigkeit
- Überschreitung der Scherfestigkeit in den Klüften lokal am Ausbruchrand

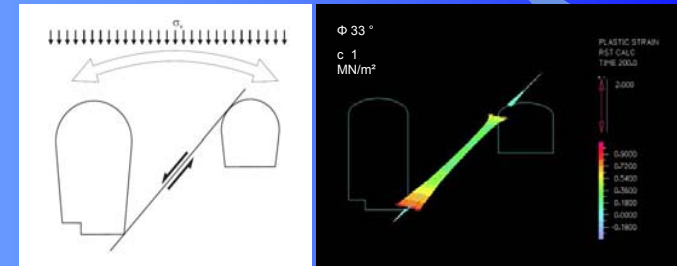
11  
13.12.2007

Für die Stabilität der Hohlräume sind folgende Gefährdungsbilder erkannt worden:

- Durchgehende Klüfte K2 zwischen den Kavernen. Dieser Fall kann nur eintreten, wenn die Klüfte des Systems K2 über grössere Strecken durchlaufen. Laut geologischer Prognose kann er mit grosser Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.
- In Kombination mit der Schichtung oder Schieferung könnten sich auch grosse Felskeile in den Paramenten lösen.
- Die Gebirgsfestigkeit am Ausbruchrand wird überschritten.
- In ungünstig am Ausbruchrand verlaufenden Klüften wird die Scherfestigkeit überschritten.

## FELSMECHANIK

### Durchgehende Klüfte K2 zwischen den Kavernen

12  
13.12.2007

• In der Kluft wird auf der gesamten Breite die Scherfestigkeit überwunden. Es kommt zu Bewegungen in der Kluft, was zu grossräumigen Spannungsumlagerungen führt. Ein solches Ereignis kann unter Umständen sehr plötzlich eintreten und möglicherweise ein Mikrobeben auslösen. Im Bild rechts sind als Resultat einer FE-Berechnung mit den Scherparametern  $\phi = 33^\circ$  und  $c = 1 \text{ MN/m}^2$  die plastischen Deformationen dargestellt. Die Verschiebungen am Ausbruchrand betragen maximal etwa 5 cm.

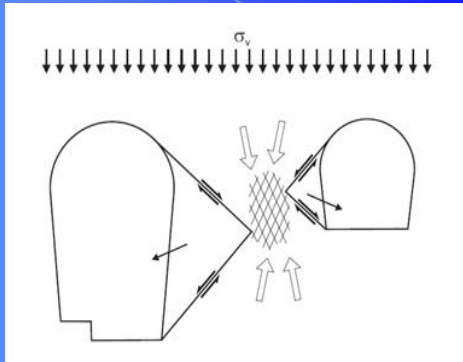
• Beträgt die Kohäsion in der Kluft  $4 \text{ MN/m}^2$ , sind die Scherbewegungen nicht durchgehend. Die maximale Horizontalverschiebung erfolgt etwa in halber Profilhöhe und beträgt dann rund 7 mm.

Der genaueren Kenntnis der Orientierung der Klüfte sowie deren Durchtrennungsgrad und Oberflächenbeschaffenheit kommt somit eine grosse Bedeutung zu.

Sollten die laufenden geologischen Abklärungen eine derart ungünstige Konstellation als möglich aufzeigen, müsste eine Vergrösserung des Kavernenabstandes in Betracht gezogen werden.

## FELSMECHANIK

### Durchgehende Klüfte K2 zwischen den Kavernen



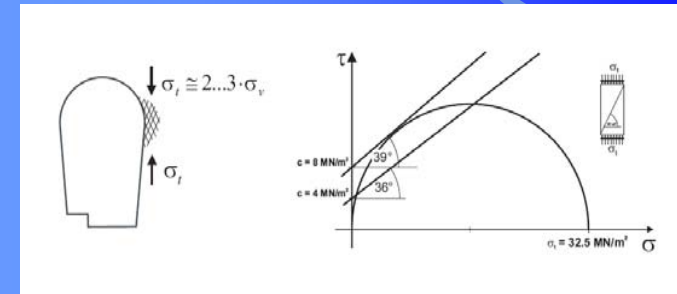
IUB

13  
13.12.2007

Tritt zu den K2 Klüften noch eine weitere Kluftchar hinzu, z.B. Schichtungsfugen, können sich unter dem Überlagerungsdruck auch grosse Felskeile lösen und sich in Richtung der Hohlräume verschieben. Der durch ihr Gewicht verursachte Druck muss mit Ankern aufgenommen werden. Dadurch werden diese Keile praktisch spannungsfrei und der Gesamte Gebirgsdruck muss nun durch den verbleibenden Felspfeiler abgetragen werden. Somit kann dort die Gesteinsfestigkeit überschritten werden und es kommt wiederum zu einer grossräumigen Spannungsumlagerung.

## FELSMECHANIK

### Überschreitung der Gebirgsfestigkeit



IUB

14  
13.12.2007

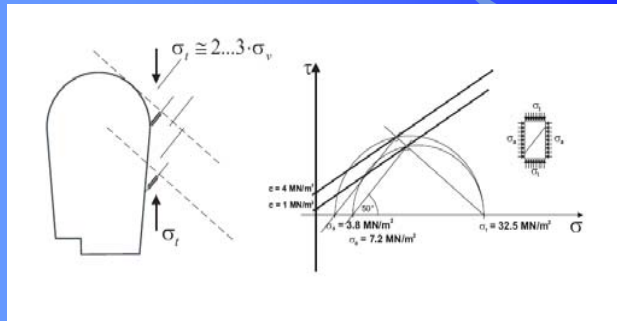
Die Spannungen am Ausbruchrand betragen etwa das 2- bis 3-fache der primären Überlagerungsspannung und entsprechen somit etwa der mittleren Gebirgsfestigkeit. Damit kann es lokal, d.h. bei ungünstiger Orientierung der Klüftung in Bezug zur Hauptspannungsrichtung zu Auflockerungen des Felsverbandes durch Scherung in den Klüften kommen.

Mit Spritzbeton und schlaffen Felsankern ist zu verhindern, dass sich solcherart entfestigte Partien ganz lösen und niederbrechen können.



## FELSMCHANIK

### Überschreitung der Scherfestigkeit in den Klüften



IUB

15  
13.12.2007

Am Mohr'schen Spannungskreis werden die Spannungsverhältnisse an vertikalen Paramenten und mit einer Neigung der Klüfte von  $50^\circ$  zur Horizontalen aufgezeigt.

Um eine Überschreitung der Scherfestigkeit zu verhindern, müsste bei einer Kohäsion von  $c = 4 \text{ MN/m}^2$  mit Vorspannankern ein Ausbauwiderstand von rund  $3,8 \text{ MN/m}^2$  aufgebracht werden, was praktisch nicht möglich ist. Der entstehende Auflockerungsdruck ist deshalb mit schlaffen Felsankern aufzunehmen.

## AUSBRUCHSICHERUNG

### Grundsätze

- Sicherung von losen Felskeilen oder entfestigten Zonen in Kalotte und Paramenten
- Keine permanente vorgespannte Anker
- Schlaffe, nicht korrosionsgeschützte Felsanker werden für die definitive Sicherung nicht berücksichtigt

IUB

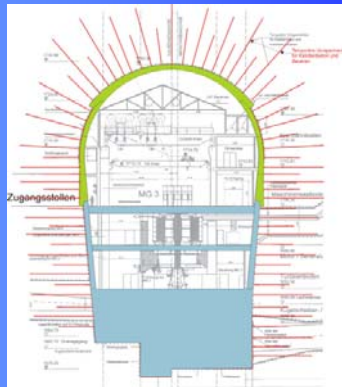
16  
13.12.2007

Aus den vorangegangenen Darlegungen geht hervor, dass die Ausbruchsicherung vor allem die Aufgabe hat, das Herausfallen von sich lösenden Felskeilen oder von entfestigten Felspartien sowohl in der Kalotte wie auch im Parament zu verhindern.

Aus Unterhaltsgründen sollen für die definitive Ausbruchsicherung keine permanenten Vorspannanker eingesetzt werden.

Für die definitive Sicherung werden schlaffe, nicht korrosionsgeschützte Mörtelanker nicht berücksichtigt.

## AUSBRUCHSICHERUNG



IUB

17  
13.12.2007

Die definitive Hohlrumsicherung wird somit wie folgt gestaltet:

- Über dem Maschinenboden soll ein Betongewölbe den Auflockerungsdruck aufnehmen. Zu diesem Zweck wurde das Gewölbe gegenüber dem Vorprojekt verbreitert, was eine gewölbte Form auf fast die ganze Höhe ergibt. Die so entstandene Mehrbreite ist in den unteren Stockwerken willkommen, sie kann zur Aufnahme von Lüftungskanälen und diversen Leitungen etc. genutzt werden.
- Alternativ wäre auch die im Vorprojekt vorgesehene Form möglich, der Auflockerungsdruck in den Paramenten müsste dann mit schlaffen, permanenten Ankern aufgenommen werden.
- Da infolge der grossen Höhe der fertig ausgebrochenen Kavernen praktisch keine nachträglichen Verstärkungen der Sicherung mehr möglich sind, ist bereits die temporäre Sicherung massiv auszubilden. Aus diesem Grund wird im Zuge des Ausbruchs der Kalotte bereits das definitive Betongewölbe eingebracht.
- Die Paramente unterhalb des Maschinenboden werden im Endzustand über die Zwischendecken abgestützt. Der grösste Anteil der Kräfte wird direkt vom Gebirge auf die Decken übertragen, so dass die Wände nur relativ geringe Biegemomente zu übernehmen haben.

Für die temporäre Sicherung des Ausbruchs werden schlaffe Mörtelanker und Spritzbeton verwendet. Mit etwa 8 – 12 m langen Ankern werden grössere Keile am ausbrechen gehindert, die kürzern Anker sichern allfällige dazwischen ausbrechende Keile. Der Spritzbeton hat die Aufgabe einer Sicherung gegen das Herausbrechen von Steinen und kleinern Blöcken.

## QUERSCHNITTGESTALTUNG

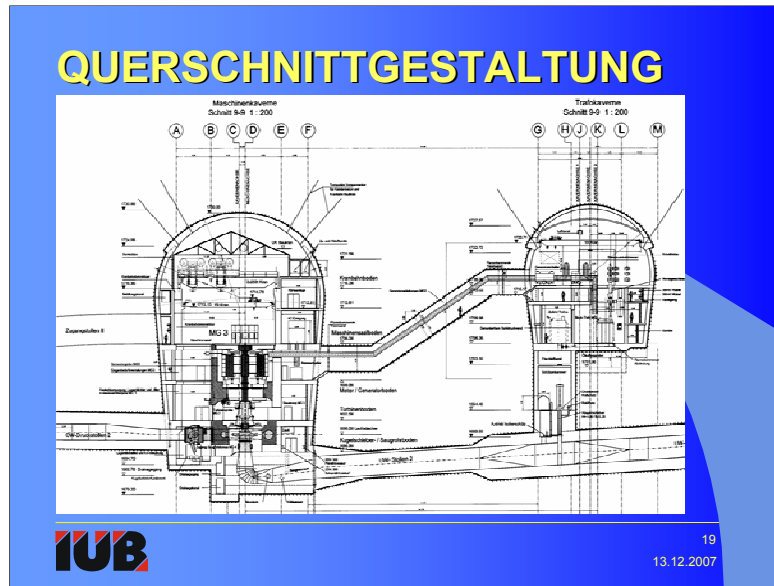
- Raumbedarf für Elektromechanik und Nebenanlagen (Lüftung, Kühlung, Kabel, Leitungen)
- Bezüglich Felsmechanik günstige Formgebung

IUB

18  
13.12.2007

Die Gestaltung der Kavernenquerschnitte wird einerseits durch den Raumbedarf der elektromechanischen Ausrüstung samt Nebenanlagen bestimmt.

Andererseits haben felsmechanische Überlegungen zur Bestimmung der Querschnittsform beigetragen. Wie bereits erwähnt wird durch eine möglichst Runde Form des Querschnitts oberhalb des Maschinenboden ein statisch günstiger Querschnitt zur Aufnahme des Auflockerungsdrucks erreicht.



Die Breite der Maschinenkaverne beträgt nun maximal rund 30 m und der Trafokaverne 23.5 m.

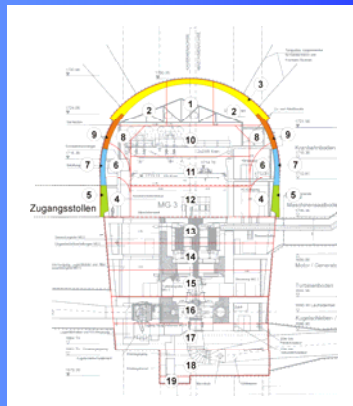
## AUSBRUCHVORGANG Randbedingungen

- Grosse Querschnittshöhe
- Sicherheit
- Kurze Bauzeit
- Transportwege
- Logistik: im Winter erschwert (Schutterung, Betonzufuhr)
- Baulüftung

Der Ausbruchvorgang wird durch die folgenden Randbedingungen bestimmt:

- Wegen der grossen Höhe der Querschnitte muss der Ausbruch im Groben von oben nach unten ausgeführt werden.
- Aus Sicherheitsgründen ist eine absolut zuverlässige Sicherung der Kalotte während des weiteren Ausbruchs erforderlich. Aus wirtschaftlichen Überlegungen wird deshalb die Kalotte nach dem Ausbruch sofort definitiv verkleidet.
- Um eine kurze Bauzeit zu erreichen, soll parallel zum Ausbruch der Kalotte möglichst an andern Stellen gearbeitet und die temporäre Sicherung eingebracht werden.
- Die für den Betrieb notwendigen Stollen sollen für den Abtransport des Ausbruchmaterials möglichst genutzt werden. Zur Erschiessung des Kalottenvortriebs muss ein zusätzlicher Stollen vorgetrieben werden.
- Zu berücksichtigen ist auch die Höhenlage des Projektes. Es handelt sich um eine Gebirgsbaustelle mit beschränkten Zugangsmöglichkeiten von aussen. Die saisonalen Möglichkeiten zur Belieferung mit Zuschlagstoffen für die Betonaufbereitung sind noch genauer zu untersuchen.
- Schliesslich soll die Etappierung jederzeit eine ausreichende Belüftung der einzelnen Vortriebsorte ermöglichen.

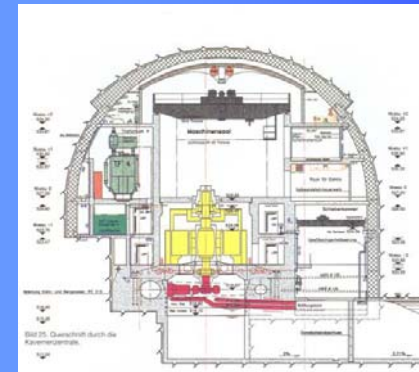
## AUSBRUCHVORGANG



IUB

21  
13.12.2007

## Kavernenzentrale Amsteg



Querschnitt durch die  
Kavernenzentrale

IUB

22  
13.12.2007

Der Bauvorgang für die Kavernen wird derzeit noch eingehend studiert. Der hier aufgezeigte Ausbruchvorgang stellt eine mögliche Variante dar. Aufgezeigt wird eine Variante mit einem Ortsbetongewölbe in der Kalotte.

- Zur Erschliessung des Kalottenvortriebs wird zunächst ein zusätzlicher Stollen erstellt. Anschliessend wird zunächst ein Firststollen vorgetrieben. Anschliessend wird die Kalotte auf die ganze Breite ausgebrochen. In genügendem Abstand wird mit der Betonierung des Kalottengewölbes begonnen. Damit kann eine geringe Spriesshöhe für die Schalung erreicht werden.
- Parallel dazu werden durch einen andern Erschliessungsstollen auf der Höhe des Maschinensaalbodens beidseitig und nach beiden Richtungen Widerlagerstollen vorgetrieben. Anschliessend werden darin die Gewölbewiderlager betoniert.
- In der nächsten Phase werden diese Widerlagerstollen aufgefistert und die Paramente weiter hochgezogen. Mit dem Ausbruchmaterial wird die erste Ausbruchetappe wieder verfüllt.
- Im nächsten Schritt erfolgt der etappenweise Durchbruch an den Schultern mit sofortigem Schliessen des Betongewölbes.
- Nun wird der Stross sukzessive von oben nach unten abgebaut und die Paramente mit Ankern und Spritzbeton gesichert. Für die letzte Phase der Schutterung kann ein Schacht zum Drainagestollen erstellt werden.

Ein Ausbruchvorgang ähnlich dem dargestellten kam bei der Kavernenzentrale des Kraftwerks Amsteg zur Anwendung.

Die Hauptabmessungen der Kaverne betragen ca. 30 x 30 x 90 m (B x H x L).



Der Ausbruchvorgang gestaltete sich wie folgt:

- Phase 1 (rot)  
Vortrieb eines Paramentstollens rechts (in Vortriebsrichtung gesehen), Vortrieb eines Schrägstollens auf ein tieferes Niveau.
- Phase 2 (violett)  
Vortrieb des Firststollens und eines Paramentstollens links auf dem tiefsten Niveau in Gegenrichtung, absenken der Sohle des Paramentstollens rechts und betonieren des Paraments rechts.
- Phase 3 (blau)  
Aufweitung der Kalotte, Betonieren des Kalottengewölbes, absenken der Sohle des Paramentstollens links, betonieren des Paramentes. Vortrieb eines Paramentstollens links auf höherem Niveau.
- Phase 4 (grün)  
Durchbruch zwischen unterem und oberem Paramentstollen links, betonieren der Paramente. Etappenweiser Durchbruch der Schultern rechts und links und betonieren des Gewölbeschlusses.
- Phase 5 (gelb)  
Abbau des Kerns und Ausbruch der Turbinenschächte etc..



# Kavernenzentrale Amsteg



Kalottenaufweitung

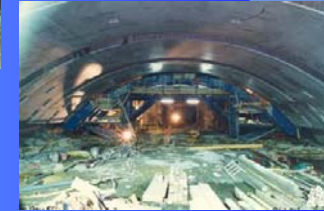


25  
13.12.2007

# Kavernenzentrale Amsteg



Betonieren der Kalotte in Segmenten



26  
13.12.2007

# Kavernenzentrale Amsteg



Betonieren der Kalotte in Segmenten



27  
13.12.2007

# Kavernenzentrale Amsteg



Ausbruch Paramentstollen und Betonieren der Paramente



28  
13.12.2007

## Kavernenzentrale Amsteg



Ausbruch der Schulter und  
Gewölbschluss



29  
13.12.2007

## Kavernenzentrale Amsteg



Stressabbau



30  
13.12.2007



## Kavernenzentrale Amsteg



Mit Ausnahme der Turbinenschächte ist der Ausbruch beendet



31

13.12.2007