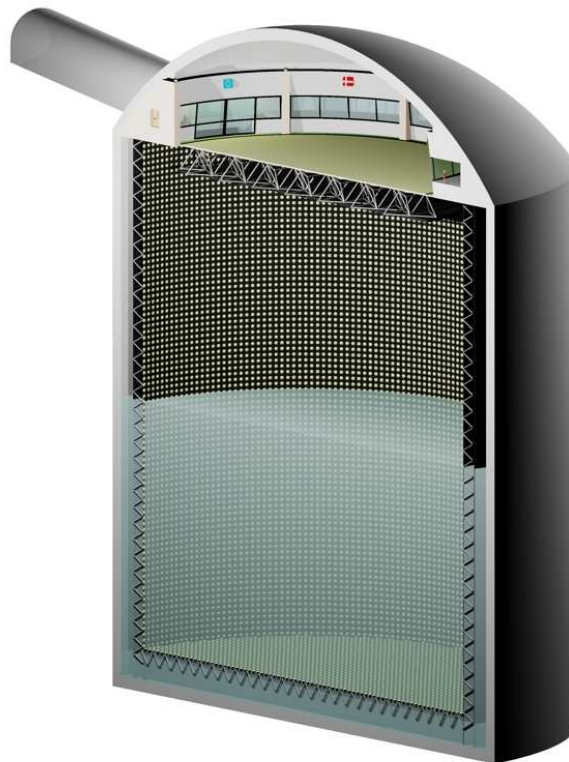


FELSMCHANISCHE ASPEKTE BEI DER PROJEKTIERUNG VON GROSSEN KAVERNEN



DIPL. ING. ETH FRANCESCO AMBERG

Swiss Tunnel Congress 2012

13. – 15. Juni 2012, Luzern

102.1-R-245

 **Lombardi**

Minusio, August 2012

-	02.08.2012	wet	AF
-	10.01.2012	AF	AF/KM
Version	Datum	Erstellt	Geprüft

Lombardi AG Beratende Ingenieure

Via R. Simen 19, Postfach 1535, CH-6648 Minusio

Telefon +41(0)91 735 31 00, Fax +41 (0)91 743 97 37

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG	1
2. FELSMECHANISCHE GRUNDLAGEN	1
2.1 Verformungen und echter Gebirgsdruck	1
2.2 Stabilitätsprobleme und Auflockerungsdruck	2
2.3 Machbarkeit von grossen Querschnitten	4
3. VERGLEICH ZWISCHEN KAVERNEN UND TUNNEL	6
4. QUERSCHNITTGESTALTUNG	8
5. AUSBRUCH UND SICHERUNG	10
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN	11
7. LITERATUR	12

ZUSAMMENFASSUNG

Bei zunehmenden Hohlraumabmessungen werden die Probleme bezüglich Felssicherung anspruchsvoller, die Machbarkeit grosser Querschnitte hängt jedoch primär von den Felseigenschaften ab und nur untergeordnet von der Ausdehnung des Ausbruches. Jede Kaverne stellt ein Einzelobjekt dar, welches speziell optimiert werden kann und welches erlaubt, je nach Fall, Sonderlösungen zu berücksichtigen.

1. EINLEITUNG

Kavernen treten im Rahmen eines breiten Spektrums von Anwendungen auf: in Minen, für den Bevölkerungsschutz, in Zusammenhang mit Wasserkraftanlagen, bei Tunnel als Verzweigungsbauwerke oder Lüftungszentralen, für Parkgaragen, als Lagerhallen für Öl und Gas, für Sport und Freizeit, für Forschungen, usw. Gegenüber Tunnel unterscheiden sie sich in einer grösseren Spannweite, einer begrenzten Länge, sowie einer spezifischen und lokalen Anpassung der Baumethoden.

Die Kavernen wurden insbesondere mit der Entwicklung der Wasserkraft nach dem zweiten Weltkrieg gebaut. Die derzeitige laufende Reduktion der Baukosten und die zunehmenden Anforderungen in allen Bereichen bewirkten, dass neue grössere und tiefliegende Kavernen erstellt werden. Die Probleme werden damit anspruchsvoller, auch weil durch die Reduktion der Baukosten schlechtere Felsbedingungen einfacher betrachtet werden.

Im Rahmen dieser Entwicklung möchte der vorliegende Beitrag grundlegende Überlegungen bezüglich des felsmechanischen Verhaltens eines Hohlraums darlegen, sowie die spezifischen Aspekte und einzelne Sonderverfahren und Optimierungsmöglichkeiten, welche bei der Planung von Kavernen berücksichtigt werden können, hervorrufen.

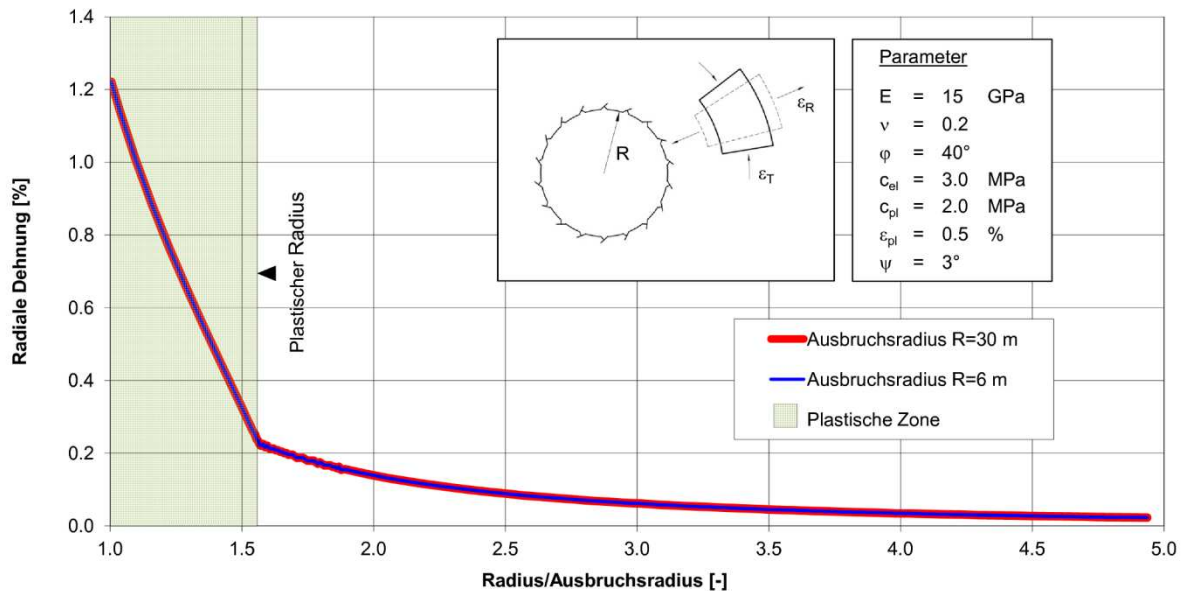
2. FELSMECHANISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Verformungen und echter Gebirgsdruck

Die durch den Aushub eines Hohlraumes im Gebirge hervorgerufenen Verformungen können anhand analytischer Formeln sowie anhand numerischer Berechnungen ermittelt werden. Wir wollen nicht ins Detail dieser üblichen Rechenmethoden gehen, die ermittelten Resultate zeigen jedoch, dass:

- die Dehnungen und Verzerrungen im Gebirge unabhängig von den Hohlraumabmessungen sind,
- die Ausdehnung der plastischen Zone, d.h. der Bereich wo die elastische Festigkeit überschritten ist, proportional zur Abmessung des Hohlraumes ist, und
- die radialen Verschiebungen proportional zur Abmessung des Hohlraumes sind.

Die Dehnungen und Verzerrungen im Gebirge hängen somit nur vom initialen Spannungszustand und von den Eigenschaften (Verformbarkeit und Festigkeit) des Gebirges ab (**Figur 1**). Diese Tatsache ist für die Beurteilung des Verhaltens einer grossen Kaverne von besonderer Bedeutung: der Fels wird beim Aushub einer grossen Kaverne so verformt und belastet, wie beim Aushub eines üblichen Tunnels.



Figur 1: Dehnungen und Stauchungen im Gebirge infolge Aushub Hohlraum

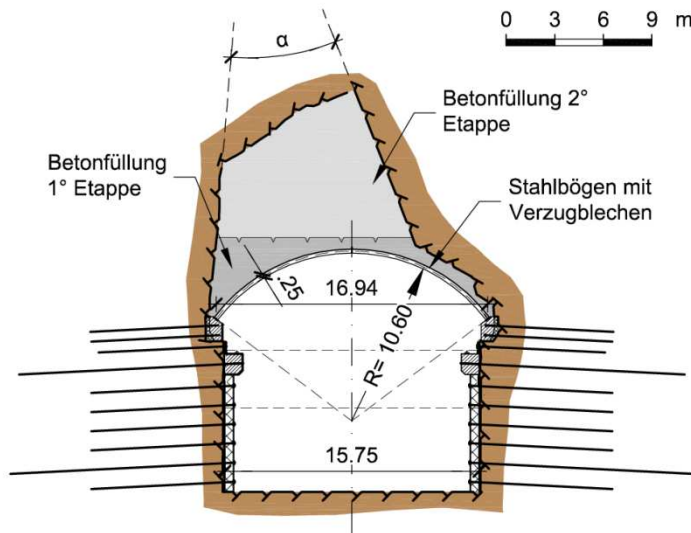
Bei einer Kaverne sind somit keine neuen Phänomene zu erwarten, welche nicht auch in einem Tunnel vorkommen: ein Anker wird durch die Verformungen im Gebirge gleich gedehnt und ein Betongewölbe gleich gestaucht. Wenn die Sicherungsmittel genügend duktil und belastbar sind, so ist ein gutes Verhalten sowohl bei einem grossen als auch bei einem kleineren Querschnitt zu erwarten.

Der einzige Unterschied zwischen einer grossen Kaverne und einem Tunnel ist die Ausbreitung der Zone, welche den Einfluss der Spannungsumlagerung stärker erfährt. Wie erwähnt sind die Ausdehnung der plastischen Zone und die Verschiebungen am Ausbruchsradius entsprechend grösser. Falls in einem Tunnel mit 6 m Durchmesser Konvergenzen bis 10 cm auftreten, so sind z.B. bei einer Kaverne mit 30 m Spannweite und 50 m Höhe Konvergenzen zwischen 50 und 80 cm zu erwarten.

2.2 Stabilitätsprobleme und Auflockerungsdruck

Die Stabilität von Blöcken in der Kalotte oder an den Paramenten hängt von den Diskontinuitätseigenschaften im Gebirge ab. Raue und geschlossene Klüfte sind für die Stabilität günstiger, während glatte und gefüllte Diskontinuitäten können auch wesentliche Niederbrüche verursachen. Die potentielle Tiefe des Überprofils gegenüber den Hohlraumabmessungen hängt primär von der Reibung

der Klüfte ab. Selbstverständlich spielt bei einem Niederbruch auch die ungünstige Raumstellung der Klüfte eine Rolle, deren mögliche Kombinationen und Variationen entlang eines Untertagbauwerks jedoch vielseitig sein können. Der Kollaps bei Ponte de Pedra zeigt, dass grössere Bruchkörper möglich sind (**Figur 2**). Der kleine Schnittwinkel α zwischen den beiden seitlichen Gleitflächen ist als Zeichen einer geringen Reibung zu beurteilen.



Figur 2: Kollaps bei der Kaverne von Ponte de Pedra.

Generell können die Abmessungen möglicher Bruchkörper direkt aus den Hohlraumabmessungen bestimmt werden. Die Persistenz der Klüfte sollte mit Vorsicht als begrenzendes Kriterium betrachtet werden, da ein Bruchkörper auch aus mehreren Klüften der gleichen Familie entstehen kann. Zusätzlich ist für eine grosse Kaverne das Gebirge verhältnismässig stärker geklüftet als bei einem kleinen Querschnitt. Es sind somit keine günstigeren Voraussetzungen für die Stabilität von potentiellen Bruchkörpern bei einer Kaverne gegenüber einem Tunnel zu erwarten.

In einem bestimmten Gebirge muss man somit davon ausgehen, dass die Tiefe möglicher Niederbrüche tendenziell proportional zum Ausbruchsradius ist; ebenso wie der daraus resultierende Auflockerungsdruck.

Schlussendlich sind die erforderlichen Sicherungsmittel proportional zum Ausbruchsradius im Quadrat:

- die Anker müssen nicht nur stärker oder dichter, sondern auch länger sein,
- die eventuelle Auskleidung muss wegen der grösseren Auflockerungsdrücke sowie des grösseren Krümmungsradius des Bogens verstärkt werden.

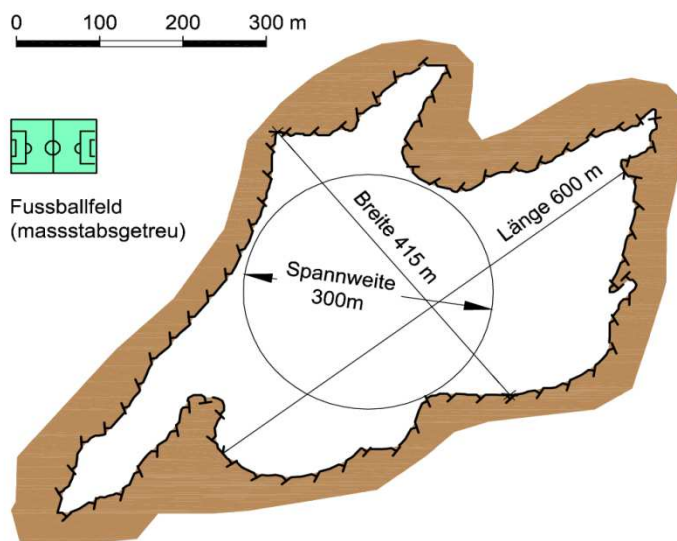
Wenn man betrachtet, dass die Stabilität der Blöcke auch durch die Kohäsion beeinflusst wird, so sind zusätzliche Phänomene zu beobachten. Eine gewisse Kohäsion kann für die Stabilität der Kalotte eines Tunnels hinreichend sein, könnte aber für diejenige einer grossen Kaverne ungenügend sein.

Die Tatsache, dass die erforderliche Felssicherung proportional zum Ausbruchradius im Quadrat ist, bewirkt, dass theoretisch zwei Hohlräume gesamthaft weniger Sicherungsmittel benötigen als nur ein Hohlraum mit dem gleichen Gesamtquerschnitt. Für Wasserkraftanlagen kann diese Tatsache bei der Entscheidung zwischen getrennter Trafokaverne oder Trafos in der Maschinenkaverne berücksichtigt werden; dazu müssen aber auch die Verbindungsstollen sowie andere Aspekte gesamthaft betrachtet werden, um die optimale Lösung vorzuschlagen.

2.3 Machbarkeit von grossen Querschnitten

In der theoretischen Einführung wurde erwähnt, dass das Gebirge bei einer grossen Kaverne gleich verformt und belastet wird, wie bei einem üblichen Tunnel und, dass bei grossen Querschnitten grössere zu stabilisierende Blöcke zu erwarten sind. Durch dieses Verhalten wird die Machbarkeit einer grossen Kaverne nicht in Frage gestellt. Es sind lediglich aufwändigere Sicherungsarbeiten für die Stabilisierung der grösseren Blöcke vorzusehen. Es stellt sich die Frage: Wo liegt dann die Grenze für einen Hohlraum in Untertagebau?

Natürlich entstandene Karsthöhlen können riesige Dimensionen haben. In Sarawak (Malaysia) erreicht die Höhle Lubang Nasib Bagus eine Spannweite von über 300 m (**Figur 3**). La Verna, in den französischen Pyrenäen, erreicht eine Spannweite von rund 250 m.



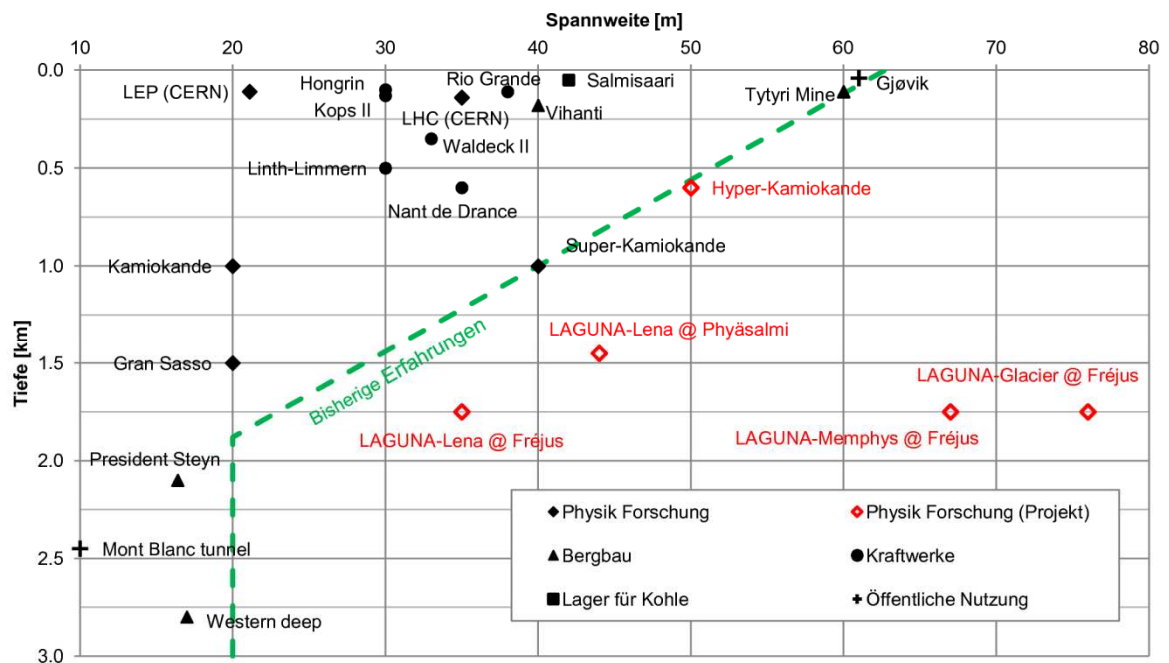
Figur 3: Grundriss der grössten Höhle der Welt: Lubang Nasib Bagus in Sarawak (Malaysia)

Die von Menschen erstellten Kavernen erreichen kleinere Abmessungen, aber die grössten erreichen dennoch Spannweiten von rund 60 m, wie die Tytyry Mine in Finnland. Diese Minen sind für die Öffentlichkeit nicht zugänglich.

Die grösste öffentliche Kaverne ist diejenige von Gjøvik Ice Rink Cavern in Norwegen, welche 1994 für die olympischen Winterspiele gebaut wurde. Diese Kaverne ist 62 m breit, 25 m hoch und 91 m lang. Die Ausbruchssicherung besteht praktisch aus 6 m langen Ankern und 10 cm Spritzbeton [1].

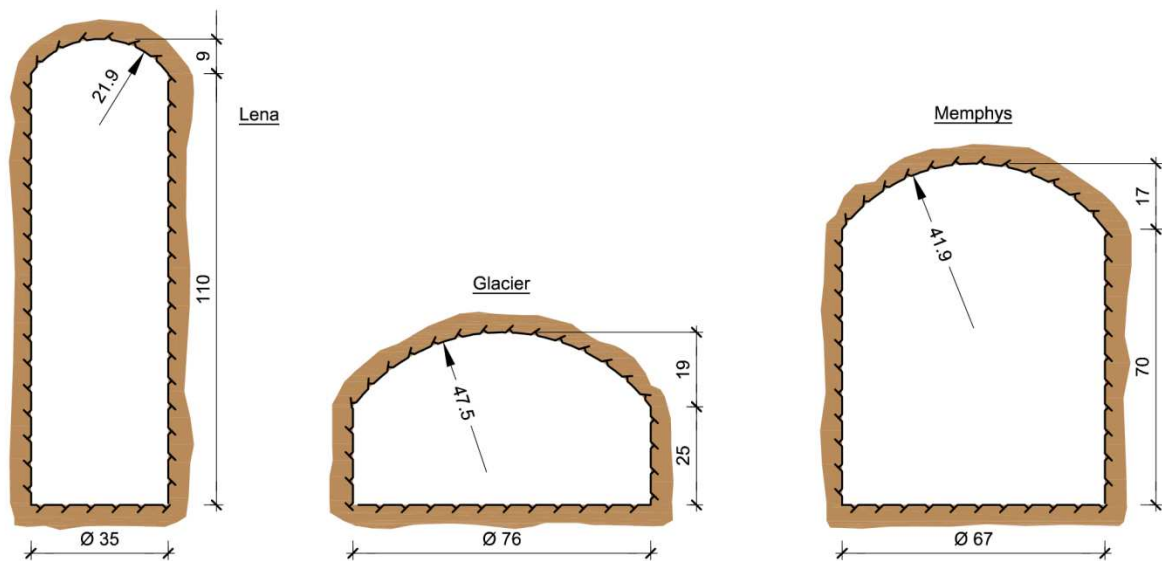
Diese bescheidene Sicherung ist primär der hohen natürlichen Horizontalspannungen zurückzuführen, welche ermöglichen es, trotz der sehr geringen Überdeckung (25 bis 55 m), eine ausreichende Bogenwirkung über der Kalotte zu aktivieren. Im Fall der Gjøvik-Kaverne sind sehr günstige Voraussetzungen vorhanden, welche dieses Sonderbauwerk ermöglicht haben. Beim Ausbruch oberflächennaher Kaverne sind die hohen Horizontalspannungen in manche Fälle für Hebungen an der Oberfläche verantwortlich, während normalerweise Setzungen zu erwarten sind.

Figur 4 zeigt die Spannweite in Funktion der Überdeckung für eine Anzahl ausgewählter Kavernen.



Figur 4: Weite und Überdeckung verschiedener Kavernen.

Wie aus Figur 4 zu entnehmen ist, kann bei den bestehenden Kavernen eine Grenze festgelegt werden. Eine deutliche Überschreitung dieser Grenze ist im Rahmen des Europäischen Projektes LAGUNA vorgesehen (Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics), welches sich derzeit in der Studie befindet. Das Forschungsprojekt sieht vor, riesige Tanks (Detektor) unterirdisch zu erstellen, welche durch die Überdeckung geschützt zur Durchführung physikalischer Untersuchungen von Neutrinos genutzt werden sollen. Ein potentieller Ort für ein solches Labor befindet sich entlang des Fréjus Strassentunnels, zwischen Frankreich und Italien. Je nach Detektortyp, sind verschiedene Kavernenformen vorgesehen (**Figur 5**). Die grösste Spannweite beträgt 76 m für den Detektor „Glacier“, während für „Memphys“ 3 Kavernen von je 67 m Durchmesser vorgesehen sind.



Figur 5: Zylinderförmige Kavernen für LAGUNA in Frejus (Physikforschungsanlage, Vorprojekt)

Die im Rahmen von LAGUNA bei Frejus vorgesehenen Kavernen weisen vertikale, gerade Wände auf, wobei sie in horizontaler Richtung gekrümmt sind. Die Machbarkeit solcher riesigen Kavernen wird als realistisch betrachtet, obwohl das Fréjusmassiv lediglich durchschnittliche geologische Bedingungen im Falle einer sehr grossen Überdeckung aufweist. Die Machbarkeit bei Frejus ist auch durch eine ausreichende Duktilität des Kalkschiefers gewährleistet, welche das Gefährdungsbild des Bergschlages ausschliesst und die Effekte einer allfälligen Anisotropie im initialen Spannungszustand beschränkt.

Somit werden neue Grenzen erreicht. In der Tat erlaubte dies auch schon die Gjøvik Kaverne. Die Idee entstand bereits in den sechziger Jahren, wo man ebenfalls beweisen wollte, dass die Erstellung von Kavernen mit einer ausreichenden Grösse für Atomkraftwerke möglich ist [2]. Merkwürdigerweise ist festzustellen, dass weltweit, trotz aller Sicherheitsvorteile für die Bevölkerung, keine unterirdischen Atomkraftwerke zu finden sind. Die Erstellung von Wasserkraftwerken in Kavernen stellt heutzutage dahingegen eine übliche Lösung dar.

3. VERGLEICH ZWISCHEN KAVERNEN UND TUNNEL

Es gibt zahlreiche Aspekte, welche sowohl für Kavernen als auch für Tunnel gültig sind: diese umfassen die Gesetze der Felsmechanik, die zur Verfügung stehenden Sicherungsmittel und die Abbaumethoden. Es gibt jedoch auch verschiedene Aspekte welche beide Bauwerke unterscheiden.

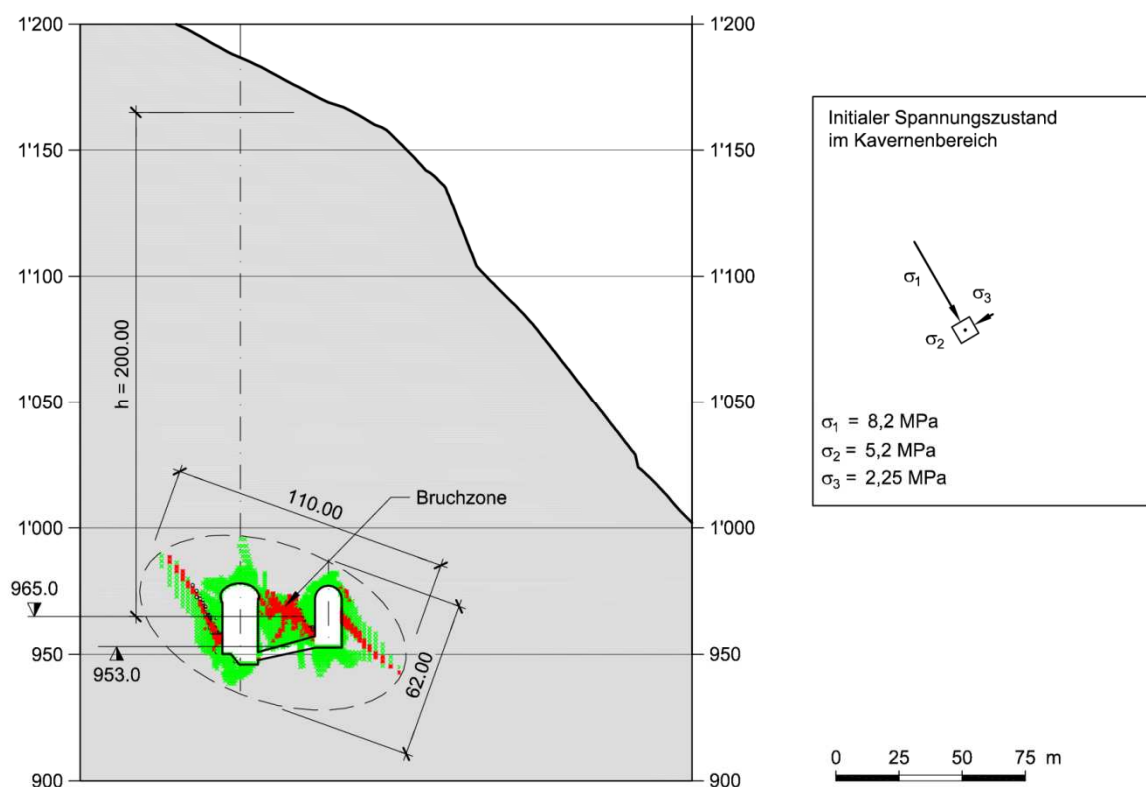
Jede Kaverne stellt ein Einzelobjekt dar, welches speziell optimiert werden kann. Für die Kavernen können spezifische geologische Untersuchungen gut geplant werden, während man für einen Tunnel oft mit unvollständigen und punktuellen Informationen zu rechnen hat.

Die Lage und die Orientierung einer Kaverne kann mit einer grösseren Freiheit als für einen Tunnel gewählt werden. So ist z.B. eine gleichmässige Geologie vorzuziehen sowie grössere Störzonen zu vermeiden. Bei einem Tunnel kann hingegen die Durchquerung einer Störzone oft nicht umgangen werden, da die Trassierung vom Startpunkt zum Endpunkt ohnehin durchfahren werden muss.

Die Orientierung und die Auslegung einer Kaverne kann in Funktion der lokalen Bedingungen gewählt werden. Zu berücksichtigen sind:

- Die Orientierung der Trennflächen (Klüfte, Schieferung) um die Stabilität der höheren und breiteren Wände zu begünstigen (dafür kann die Kaverne gedreht oder so ausgelegt werden, dass die massgebenden Wände stabiler sind);
- Die allfällige Orientierung des anfänglichen Spannungszustandes .

Figur 6 zeigt die Kaverne Sarapullo der Wasserkraftanlage Toachi-Pilaton, bei der die Stabilitätsbedingungen des Felsfeilers zwischen den beiden Kavernen infolge des durch den Hang beeinflussten initialen Spannungszustandes gemindert werden. Es wurde daher eine andere Orientierung der Kaverne vorgeschlagen.



Figur 6: Einfluss des initialen Spannungszustandes auf dem Bruch zwischen den beiden Kavernen.

Es ist jedoch von grosser Bedeutung, dass im Laufe der Projektierung genügend Spielraum geschaffen wird, so dass immer die Möglichkeit besteht, die Kaverne in Funktion der gewonnenen geologischen Kenntnisse zu optimieren.

Die Gesetze der Felsmechanik sind für beide Bauwerke, sprich. Kavernen und Tunnel, gleich. Bei Kavernen, insbesondere für Wasserkraftwerke, muss natürlich der Einfluss diverser Interaktion mit erforderlichen Stollen und Nebenbauwerken betrachtet werden. Beim Bau des Kraftwerkes Beles, in Äthiopien, hat z.B. die Durchörterung der Verbindungsstollen zwischen Trafokaverne und Hauptkaverne diverse Risse in der Sicherung der Hauptkaverne verursacht [3].

Im Weiteren sind Unterschiede bei den Baumethoden zu erkennen. Ein grosser Querschnitt kann aus ausführungstechnischen Gründen nicht im Vollvortrieb ausgehoben werden. Oft ist daher der erste Teilaushub als Erkundungsstollen vorgesehen, welcher nützliche Informationen für eine eventuelle letzte Anpassung der Kavernenlage liefern kann.

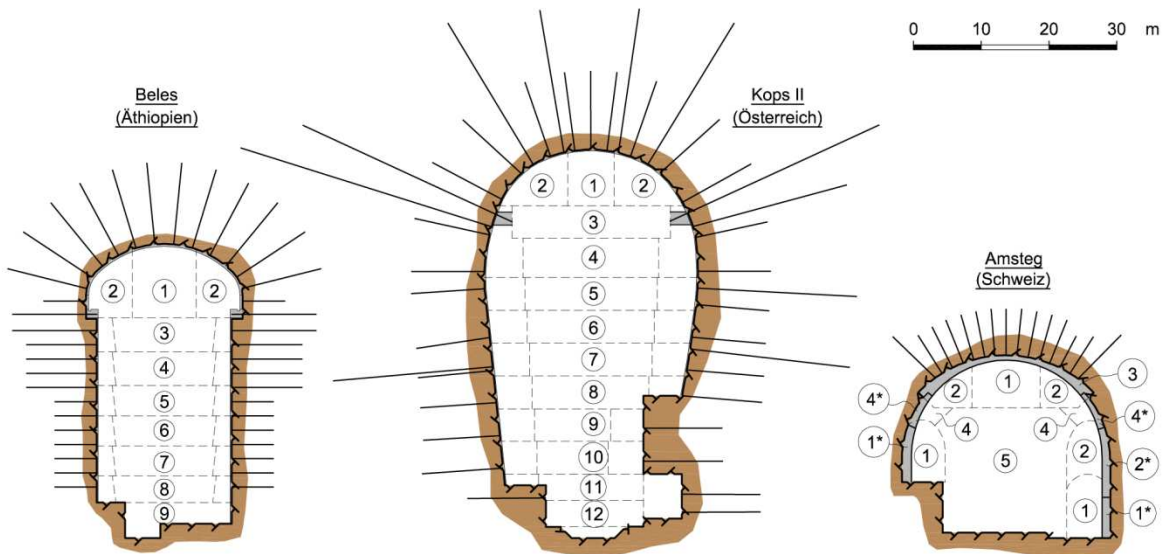
Ein Tunnel ist ein lineares Bauwerk, welches eine Optimierung der Baumethoden und der Sicherungsmassnahmen im Laufe des Vortriebes erlaubt. Bei den Kavernen fehlt hingegen die genügende Länge, um relevante Optimierungen zu erzielen. Zudem liefern die Teilausbrüche nicht immer genügende Informationen, um die Stabilitätsbedingungen der gesamten Kaverne zuverlässig zu beurteilen.

Weitere zahlreiche Unterschiede können problemlos gefunden werden. Die hier erwähnten Aspekte wollen und können sicherlich nicht ausreichend sein. Die wichtigsten Unterschiede sind sicherlich, dass jede Kaverne ein Einzelobjekt darstellt, welches an die spezifischen geologischen Gegebenheiten angepasst werden kann. Ein Tunnel ist hingegen ein langes Bauwerk, welches oft unterirdisch die gegebenen geologischen Bedingungen unausweichlich durchqueren muss. Die geeignete Baumethode für einen Tunnel resultiert aus einem Kompromiss der verschiedenen Bedingungen entlang des Trassees.

4. QUERSCHNITTGESTALTUNG

Figur 7 zeigt 3 typische Querschnitte von Kraftwerkskavernen. Die Kaverne mit Vertikalwänden entspricht der üblichsten und meist angewandten Form: sie kann das Maschinenhaus optimal einbeziehen, ist einfach zu erstellen und stellt für zahlreiche Fälle die ideale Lösung dar.

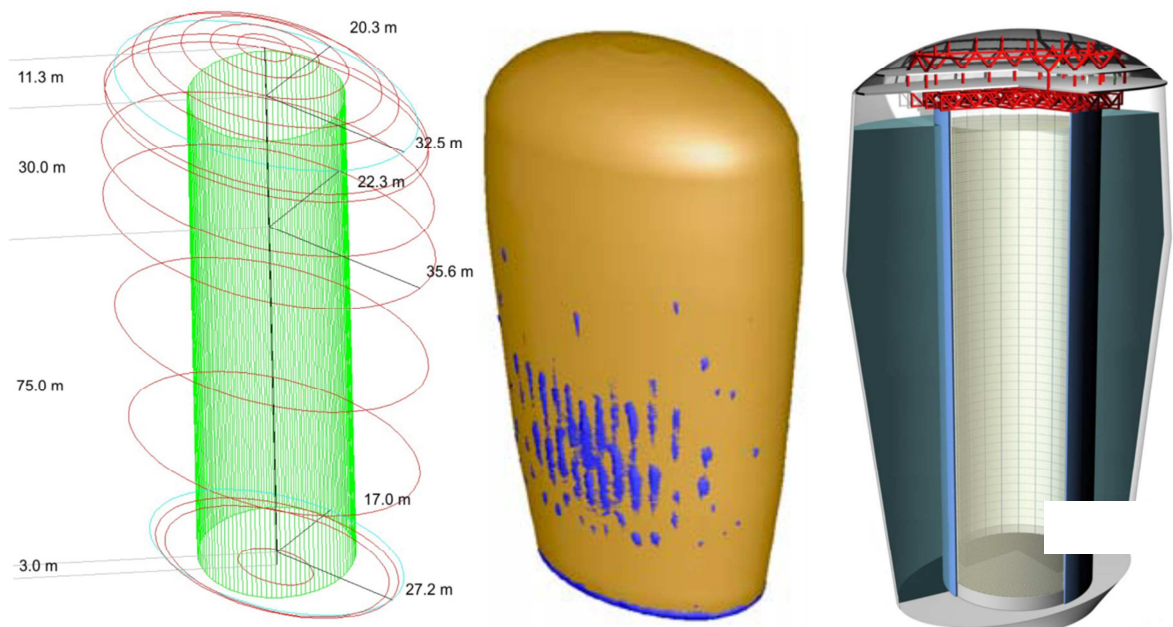
Für tiefliegende Kavernen, d.h. wenn der Spannungszustand gegenüber dem Felswiderstand relevant wird und bergschlagartige Abplatzungen oder plastische Verformungen auftreten, ist oft ein runderer Querschnitt von Vorteil. Dasselbe gilt für sehr grosse Querschnitte.



Figur 7: Drei typische Querschnitte von Kraftwerkskavernen (Amsteg aus [4]).

Beim Gefährdungsbild „nachbrüchiges Verhalten und Auflockerungsdruck“, stellt die Kaverne bestehend aus einer sich nach unten fortsetzenden Kalotte (siehe Figur 7, rechts) eine geeignete Lösung dar.

Als besonderes Beispiel der Ausrundung stellt die für die LAGUNA vorgeschlagene Kaverne in Finnland dar [5]. Um schlussendlich einen zylindrischen Tank (Detektor) zu errichten, ist ein elliptische Hohlraumvorgehen (Figur 8).



Figur 8: Elliptische Kaverne für LAGUNA bei Phyäsalmi, Finnland (Physikforschungsanlage, Vorprojekt aus [5]).

Wie aus **Figur 8** zu entnehmen ist, wird durch diese besondere Form viel Totraum geschaffen. Die ausgerundete Form erlaubt jedoch die Tangentialspannungen am Ausbruchrand unterhalb der für den Bergschlag geschätzten Grenzwerte zu halten. Die Kaverne weist im Plan eine elliptische Form auf, da in Finnland der natürliche Spannungszustand richtungsabhängig ist. Der Fels hat eine sehr hohe Druckfestigkeit, so dass das Gebirge trotz einer Überdeckung von 1200 m elastisch bleibt.

Selbstverständlich werden ausgerundete Kavernen nicht nur für besondere Fälle vorgeschlagen. Im Allgemeinen ist eine Ausrundung der Vertikalwände für das felsmechanische Verhalten der Kaverne günstig. Eine solche Lösung wurde für zahlreiche Zentralen für Wasserkraftanlagen angewendet (z.B. Waldeck II, Kops II, Linth-Limmern, Nant de Drance).

5. AUSBRUCH UND SICHERUNG

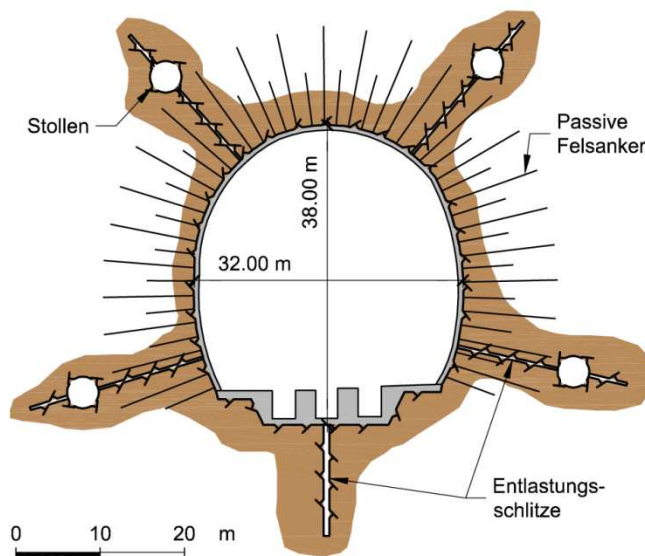
Die Kavernen mit geraden Vertikalwänden oder diejenigen mit abgerundeten Wänden werden typischerweise von oben nach unten ausgehoben. Die Kalotte wird in 2 bis 3 Teilausbrüche unterteilt, je nach Kavernenabmessung. Ausbruch, Primärsicherung und Verkleidung greifen kontinuierlich ineinander. In der Kalotte soll die definitive Sicherung gleich eingebaut, sei es mit Spritzbeton und Anker oder mit einem Betongewölbe. Mit jeder weiteren Abteufung durch den Aushub wird die nachträgliche Zugänglichkeit in die Firste erschwert. Die Wände werden ebenfalls progressiv mit der Abteufung gesichert. Schonendes Sprengen trägt generell zur Erhaltung der Gebirgseigenschaften zu Gunsten einer geringeren Nachbrüchigkeit bei.

Im mittleren und unteren Bereich trägt das Maschinenhaus zur definitiven Sicherung bei, während im oberen Bereich, wie in der Kalotte, Spritzbeton mit Ankern oder Ortsbetonwände zur Anwendung kommen können. Die Sicherungsmittel im oberen Bereich müssen unter Umständen auch die Auflagerkräfte des allfälligen Firstgewölbes aufnehmen können.

Eine Alternative stellt die sogenannte deutsche Bauweise dar, welche insbesondere für die Kavernen mit einer sich nach unten fortsetzenden Kalotte zur Anwendung kommt (z.B. Amsteg, siehe Figur 7). Die Methode sieht vor, bei jedem Teilausbruch entlang der Kalotte gleich das definitive Gewölbe einzubauen. Typischerweise wird mit zwei Ulmenstollen und einem Firststollen angefangen. Die Ulmenstollen werden dann progressiv ausgehoben, während der Firststollen ausgeweitet wird. Nach jeder Ausbruchsetappe wird ein Teil des Betongewölbes erstellt, bis der Ringschluss gewährleistet ist. Nach Erstellung des Gewölbes kann der Kern der Kaverne leicht und in voller Sicherheit abgeteuft werden. Die Methode scheint bei potentiellen Konvergenzen weniger geeignet zu sein, da die definitive Sicherung sehr früh eingebaut wird. In Abwesenheit von relevanten Konvergenzen stellt diese Methode jedoch immer eine anerkannte Alternative dar, insbesondere bei nachbrüchigem Gebirge. Weiter erlaubt sie die provisorische Sicherung zu minimieren und gleichzeitig eine solide und dauerhafte Innenschale einzubauen. Eine ähnliche Methode kann auch für die Erstellung des Firstgewölbes bei einer Kaverne mit Vertikalwänden angewendet werden (Kaverne Timpagrande in Italien).

Für tieferliegende Kavernen ist der Spannungszustand so hoch, dass die elastische Festigkeit überschritten wird. In einem Bereich um den Hohlraum herum entwickelt sich eine plastische Zone, dort wo übermässige Spannungslagerungen Bewegungen und neue Risse im Gebirge verursachen. Diese Bewegungen reduzieren die Stabilitätsbedingungen von Blöcken und tragen zur Erhöhung des Auflockerungsdruckes bei. Im Kapitel 1.2 wurde gezeigt, wie sich die Problematik der Stabilität von Blöcken bei Kavernen gegenüber kleineren Querschnitten verstärkt. In gewissen Fällen wurden interessante Lösungen vorgeschlagen, um die Effekte der plastischen Zone und die damit verbundene Festigkeitsminderung zu reduzieren.

Für die Kaverne Gran Sasso wurde die Erstellung von Entlastungsschlitzten vorgeschlagen (**Figur 9**), welche eine Entspannung in tangentialer Richtung erlaubten [6]. Die Kaverne befindet sich mit einer Überdeckung von 1500 m in einem Gebirge von geringer Qualität. Zweck dieser Entlastungsschlitzte war es, der Einfluss der Plastizität auf das Gebirge um die Kaverne herum zu vermeiden und damit die Stabilität des Hohlraumes zu verbessern. Die grosse Kaverne wurde schlussendlich nicht gebaut, an seiner Stelle dafür eine kleinere. Solche Entlastungsschlitzte sind nach Kenntnis des Autors auch in anderen Fällen nie realisiert worden. Die Idee ist somit theoretisch geblieben. Die Vorteile für die Stabilität der Kalotte oder der Seitenwände sind bestimmt vorhanden, vielleicht aber nicht immer einfach nachweisbar.



Figur 9: Vorgeschlagene Entlastungsschlitzte zur Entspannung des Gebirges für die Kaverne des physikalischen Labors Gran Sasso (nicht realisiert).

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Kavernen stellen für den Ingenieur eine anspruchsvolle Aufgabe bezüglich Planung, Sicherung und Ausführung dar. Das bereits bei Tunnel vorliegende komplexe Zusammenwirken von Einbau und Gebirge wird zusätzlich durch den sukzessiven Ausbruch und, insbesondere bei Wasserkraft-

zentralen, durch die Iteration mit Nebenhohlräumen sowie den häufig zahlreichen Zugängen weiterhin erschwert.

Die Projektierung von Kavernen lässt generell eine breite Auswahl von Lösungsvorschlägen zu und erlaubt, je nach Fall, die Einwirkung von Sonderverfahren zu betrachten.

Die zukünftige Weiterentwicklung mit tendenziell immer grösseren und tieferliegenden Kavernen sowie die Ausweitung der Anwendungen, auf z.B. Kernkraft oder auf die Energiespeicherung mit Druckluft, wird weitere Gelegenheiten der Projektierung bieten.

Bereits derzeitige laufende Projekte werden, falls diese bis zur Ausführung kommen sollten, die bisherigen Grenzen der Erfahrung überschreiten und weiter verschieben. Die theoretischen Überlegungen zeigen, dass man die neuen Herausforderungen zuversichtlich angehen kann.

7. LITERATUR

1. Grønv, E.: The importance of in-situ rock stress in design and construction of sub-surface opening. International Symposium on: Utilization of underground space in urban areas, Sharm El-Sheikh, Egypt (November 2006)
2. Duffaut, P.: Large caverns, design and construction. Networks of Underground Research Laboratories for International, Inter-disciplinary Innovations, ISRM 12th International Congress on Rock Mechanics, Beijing (September 2011)
3. Amberg, F.: Risiken beim Bau von Kavernen Beispiele von Beles und Ponte De Pedra. Beitrag zum Kolloquium, Bergmännisches Auffahren von grossen Querschnitten Professur für Untertagebau, ETH Zürich Schweiz (Dezember 2007)
4. Dudas, A.: Erfahrungen beim Bau einer grossräumigen Kaverne am Beispiel der Kraftwerkzentrale Amsteg. Tunnel 4/96
5. Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd: LAGUNA Design Study, Feasibility Study for LAGUNA at PYHÄSALMI. Bericht EU, FP 7: Work Package 2: Deliverable 2.1 (April 2010)
6. Lombardi, G.: Particularites des grandes cavernes. International Congress on Large Underground Openings, Firenze (Juni 1986)