

# **Risiken beim Bau von Kavernen — Beispiele von Beles und Ponte de Pedra**

Francesco Amberg

Lombardi AG

# RISIKEN BEIM BAU VON KAVERNEN BEISPIELE VON BELES UND PONTE DE PEDRA

Beitrag zum Kolloquium

Bergmännisches Auffahren von grossen Querschnitten

Professur für Untertagbau, ETH Zürich, 13.12.2007

von Francesco Amberg, Lombardi AG, Beratende Ingenieure



## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG	1
2. KRAFTWERKSANLAGE BELES	1
2.1 Projektbeschreibung	1
2.2 Geologie	2
2.3 Projektentwurf	3
2.4 Ausführung	6
3. KRAFTWERKSANLAGE PONTE DE PEDRA	7
3.1 Projektbeschreibung	7
3.2 Ursprünglicher Projektentwurf und Ausführung	8
3.3 Instandsetzung	9
4. SCHLUSSFOLGERUNGEN	10

## 1. EINLEITUNG

Die Erstellung der Kraftwerksanlagen Beles (Äthiopien) und Ponte de Pedra (Brasilien) wurden an Totalunternehmungen vergeben, die sowohl für die Projektierung wie auch für die Ausführung zuständig waren.

Die Minimierung der Kosten liegt unter solchen Umständen im Vordergrund einer Arbeitsgemeinschaft, da die Gesamtkosten der Anlagen bereits in der Offertenphase festgelegt werden.

Um eine hohe Leistung zu erzielen stehen die involvierten Parteien oft unter Druck, was in manchen Situationen zur Annahme gewisser Risiken führen kann. Der Projektingenieur muss sich in vielen Situationen an die spezifischen Bedingungen der Baustelle und die Bedürfnisse der Unternehmung anpassen. Ein Anteil an Improvisation ist dabei in Kauf zu nehmen.

Diese Ausgangslage war bei der Projektierung und Ausführung der Kraftwerkanlage Beles zu spüren und war ebenfalls beim Bau der Kaverne von Ponte de Pedra mit im Spiel, bei der sich ein grosser Niederbruch ereignete.

Im vorliegenden Beitrag wird auf die Projektierung und Ausführung der Kaverne Beles eingegangen und anschliessend wird das Ereignis bei der Kaverne Ponte de Pedra präsentiert.

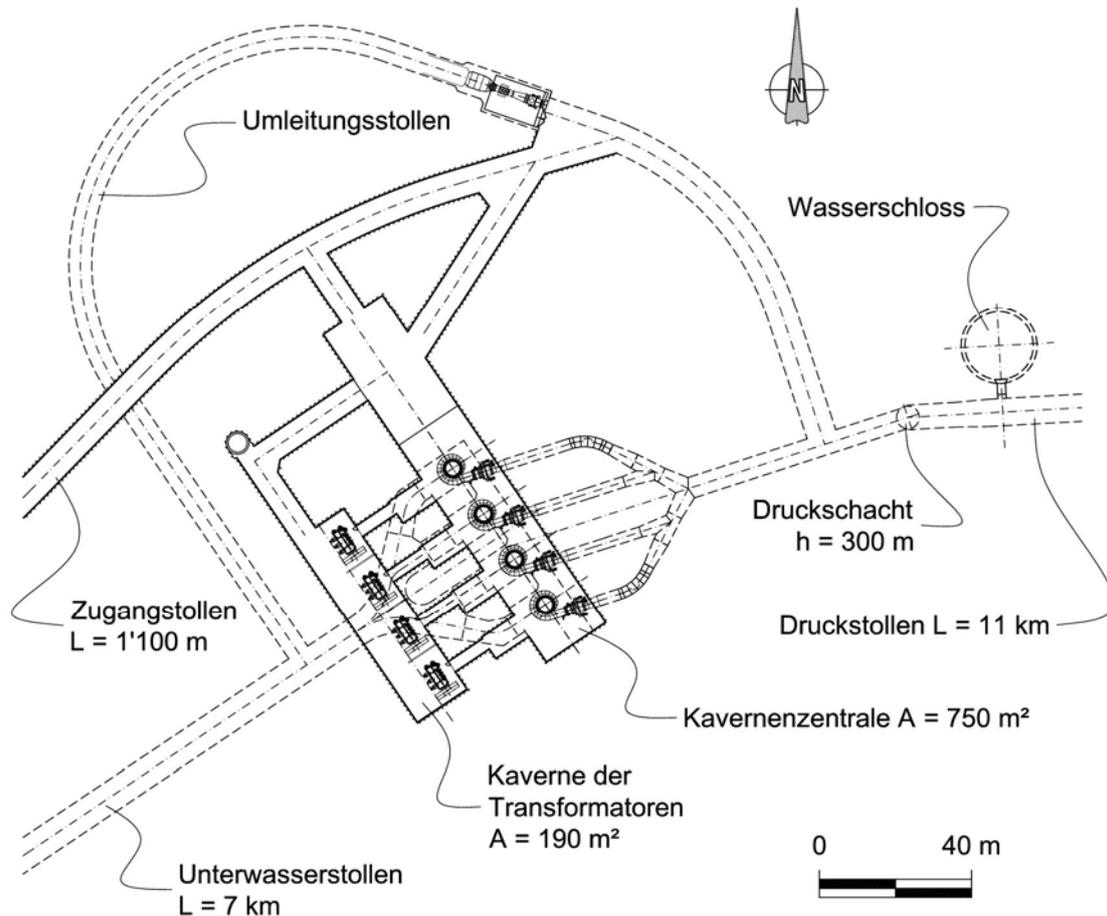
## 2. KRAFTWERKSANLAGE BELES

### 2.1 Projektbeschreibung

Die Kraftwerksanlage Beles befindet sich in der Bergregion im Nord-Osten von Äthiopien und betrifft die Umleitung des Blauen Nils direkt am Ausfluss des Tana-sees. Die Ausbauwassermenge beträgt  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  und die installierte Leistung erreicht 460 MW.

Die Anlage besteht aus der Wasserfassung im natürlichen See Tana, dem 11 Km langen Druckstollen, dem 300 m hohen Druckschacht, der Kavernenzentrale und dem rund 7 km langen Unterwasserstollen.

Die Kavernenzentrale weist eine Höhe von 43 m, eine Breite von 19 m und eine Länge von 105 m auf. Ihre Querschnittfläche erreicht  $750 \text{ m}^2$ . Die Kaverne wird mit 4 Francis Turbinen von je 115 MW ausgerüstet (Figur 1).



Figur 1: Situation der Kavernenzentrale

Die Arbeiten werden von der italienischen Unternehmung Salini ausgeführt, während für die Projektierung das Ingenieurbüro Pietrangeli in Rom zuständig ist. Lombardi AG wurde von diesem Büro beauftragt, die Sicherungsmassnahmen aller konventionellen Ausbruchsarbeiten einschliesslich der Kaverne zu dimensionieren. Unsere Tätigkeit startete im November 2005, praktisch gleichzeitig mit den Ausbruchsarbeiten zur Erstellung des rund 1 km langen Zugangstollens zur Kaverne.

## 2.2 Geologie

In der Region der Kraftwerkanlage sind tertiäre vulkanische Formationen zu finden, welche vorwiegend aus Basalten und Tuffgesteinen bestehen. Basalte entstehen aus dünnflüssigen Laven, welche grosse Flächen abdecken können und horizontale Schichten bilden.

Die Region wurde von expansiven tektonischen Bewegungen interessiert, welche den Graben beim Tanasee verursacht haben. Es sind somit hauptsächlich Verwerfungen zu finden während grössere Überschiebungen ausgeschlossen werden können.

Die Lage der Kaverne wurde anhand der Ergebnisse einer geologischen Aufnahme der Oberfläche festgelegt. Dabei kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die tieferen und älteren Schichten von weiteren Brüchen durchquert sind.

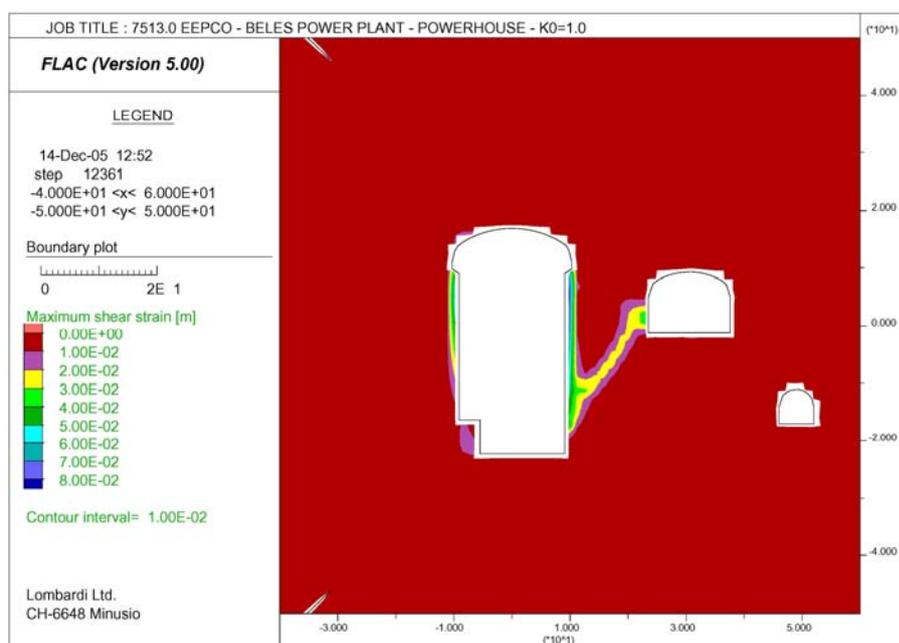
Vertikale Sondierbohrungen erlaubten die Felseigenschaften in der Nähe der Kaverne zu erkunden. Auf Kavernenniveau sind ausschliesslich Basalte mit einer guten Festigkeit zu erwarten.

Die Gebirgsstruktur ist durch horizontale Schichten mit vertikalen Klüften charakterisiert. Im ganzen kann der Fels als mittlere bis gute Qualität gemäss der Klassifikation von Bienawski eingestuft werden.

Dem Zugangstollen entlang erwies sich das Gebirge als standfest.

### 2.3 Projektentwurf

Der erste Entwurf der Kavernenzentrale sah eine relativ flache Kalotte vor (Breite 20 m, Radius 16 m) und einen seitlichen Abstand zur Transformatorenkaverne der zu gering war. In der Tat zeigten die Berechnungen eine mögliche Ausbildung eines Bruches zwischen den beiden Hohlräumen (Figur 2).

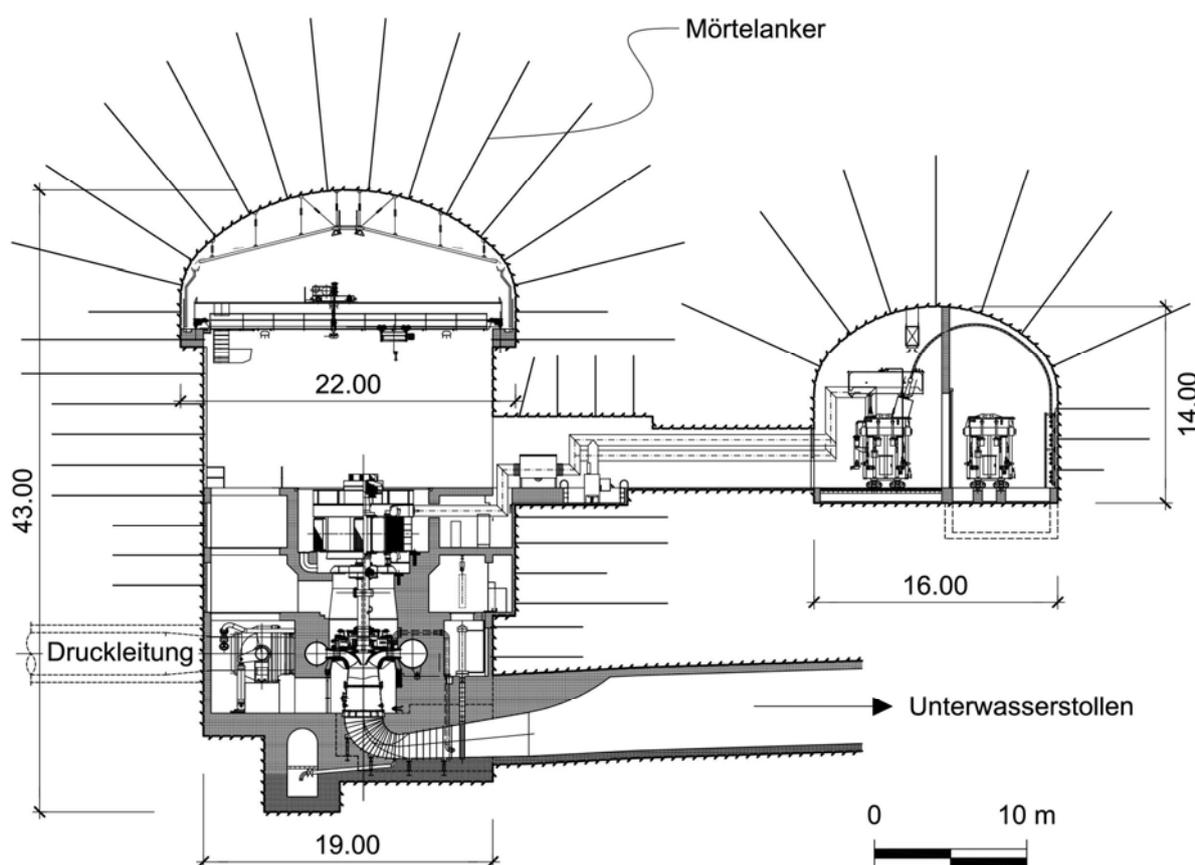


Figur 2: Mögliche Ausbildung eines Bruches zwischen beiden Kavernen

Diese beiden erwähnten Schwachpunkte des Projektes konnten noch kurz vor den Ausbruchsarbeiten durch entsprechende Anpassungen eliminiert werden.

Die Ausbruchssicherung der Kavernenzentrale besteht in der Kalotte aus einer systematischen Ankerung mit vollvermörtelten Stabankern (Nennlast 400 kN, 2.5x2.5 m, L=12 m) und 40 cm Spritzbeton und, in den 25 m hohen vertikale Wände, aus einer systematischen Ankerung (Nennlast 246 kN, 2.0 x 2.0 m, L= 6÷10 m) und 25 cm Spritzbeton. Kleinere Felsblöcke mussten zusätzlich nach Bedarf mit provisorischen Ankern befestigt werden.

In der oberen Hälfte der Kaverne bildet die Ausbruchssicherung auch die definitive Verkleidung (Figur 3).

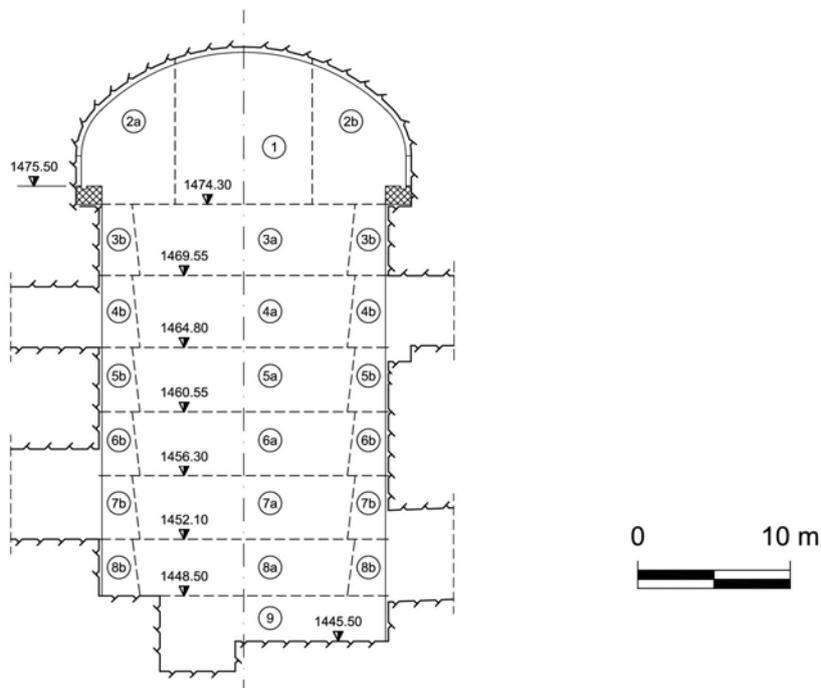


Figur 3: Querschnitt der Kavernen mit definitiven Sicherungsmassnahmen

Der Ausbruch der Kalotte wurde in drei Teilausbrüche unterteilt (Figur 4). Der zentrale Teil, mit einer Querschnittsfläche von rund 90 m<sup>2</sup> wurde über die gesamte Länge der Kaverne ausgebrochen und gesichert. Danach folgten beide seitlichen Aufweitungen, welche ebenfalls definitiv gesichert wurden.

Das Abteufen erfolgte in Etappenhöhen von 4 bis 5 m. Das Ausbruchmaterial wurde durch die verschiedenen Zugänge zur Kaverne entsorgt, welche auf unterschiedlichen Koten liegen.

Zum Profilieren der Wände wurde vorgeschlagen, beim Abbau einer Strosse zuerst das Kernmaterial zu entfernen und anschliessend die beiden Paramentpartien unter Anwendung eines schonenden Sprengvortriebs abzubauen. Aus Kostengründen wurde dies aber von der Unternehmung nicht ausgeführt.



Figur 4: Querschnitt der Kavernen mit Ausbruchetappen

Um das Verhalten der Hauptkaverne während dem Bau zu überwachen, wurden 7 Querschnitte mit je 9 Zielmarken für Konvergenzmessungen mit Theodolit eingerichtet. Sonst es wurde kein weiteres Messsystem für die Überwachung vorgesehen.

Das Projekt konnte so den örtlichen Randbedingungen angepasst werden und war in Bezug auf die vermuteten Gebirgsverhältnisse angemessen ausgelegt.

## 2.4 Ausführung

Die Arbeiten an der Kavernenzentrale sind mit dem Ausbruch des zentralen Teils der Kalotte im Juni 2006 gestartet. Die Lombardi AG hatte keine ständige Präsenz auf der Baustelle und wurde nur sporadisch nach Bedarf involviert.

Die erst 20 m nach der Ortsbrust ausgeführten Konvergenzmessungen zeigten keine Bewegungen. Dies bestätigte die Standfestigkeit des Hohlraums, aber ermöglichte keine detaillierte Überprüfung der Projektannahmen.

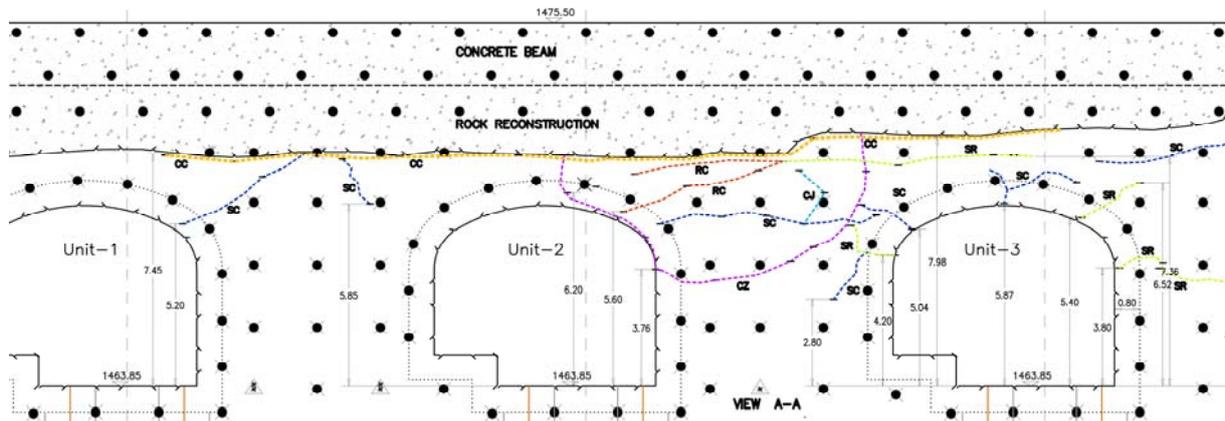
Nach Ausbruch von 2/3 der Kalottenlänge wurde eine Störzone mit Kataklasit angetroffen, welche senkrecht zur Kavernenachse liegt und eine Stärke von 5 bis 10 m aufweist. Ihre Auswirkung war aber kaum zu bemerken. Im Oktober 2006 war die Kalotte ausgebrochen und gesichert.

Das Baustellenpersonal der Unternehmung beurteilte die Sicherung der Kalotte als grosszügig, und fragte um eine mögliche Reduzierung der Sicherungsmassnahmen. Gemäss unserer Einschätzungen vor Ort war aber die Situation nicht so eindeutig: der Fels ist nämlich sehr steif, aber mit verschiedenen relativ glatten Klüften durchzogen. Wir konnten die Unternehmung überzeugen, dass besonders in dieser Situation die Gefahr eines Sprödbruches nicht zu unterschätzen war.

Während des Abteufens waren praktisch keine Konvergenzmessungen mehr möglich. Die Bohrgeräte verursachten viel Staub, wodurch die Zielpunkte ständig mit Felspulver überdeckt wurden. Zusätzlich waren die Zielpunkte nach den Sprengungen oft beschädigt. Das Verhalten des Hohlraumes war während dieser Phase ungenügend kontrolliert.

Nach Beginn der vier Verbindungsstollen zur Kaverne der Transformatoren sind Risse im Spritzbeton bei der Kavernenzentrale aufgetreten (Figur 5). Die Verbindungsstollen waren noch nicht gesichert.

Die Erklärung und der Mechanismus konnten nur vor Ort beurteilt werden, und nach gegenseitigem Einverständnis mit der Unternehmung wurde somit eine Baustellenbesichtigung organisiert. Wegen eines Missverständnisses wurden leider die Risse am Vortag mit neuem Spritzbeton überdeckt, was unsere Beurteilung eindeutig nicht vereinfachte. Nach einigen Untersuchungen wurde beschlossen, dringend eine Verstärkung der Sicherungsmassnahmen der vier Verbindungsstollen zu erstellen.



Figur 5: Auftritt von Risse im Spritzbeton nach Beginn der Querstollen

Im August 2007 war die Kavernenzentrale nach rund einem Jahr vollständig ausgebrochen.

Die Überprofile erreichen im unteren Teil der seitlichen Wände teilweise bis über 2 m und in der Kavernensole bis 3 m. Diese Überprofilen waren nicht geologisch bedingt, sondern mit dem Sprengungsablauf verbunden.

Insgesamt sind die Arbeiten gut und erwartungsgemäss erstellt worden.

Es soll aber erwähnt werden, dass während der Ausführung wenig investiert wurde, um das Verhalten der Kaverne zu überprüfen. Im Mittelpunkt des Interesses derartiger Baustellen stehen eindeutig die Vortriebsleistungen.

### 3. KRAFTWERKSANLAGE PONTE DE PEDRA

#### 3.1 Projektbeschreibung

Die neue Kraftwerkanlage Ponte de Pedra befindet sich am Fluss Rio Correntes, and der Grenze zwischen den Staaten Mato Grosso und Mato Grosso do Sul in Brasilien.

Die Anlage besteht aus der Wasserrfassung mit einem 10 km langen Oberwasserkanal, dem 250 m hohen Druckschacht, der Kavernenzentrale und dem Unterwasserstollen. Die vorgesehene Leistung beträgt 180 MW bei einer Ausbaumassermenge von 80 m<sup>3</sup>/s.

Die Kaverne weist eine Höhe von 30 m, eine Breite von 16 m und eine Länge von 55 m auf. Die Querschnittsfläche beträgt 450 m<sup>2</sup>.

Während des Ausbruches der Kalotte fand am 29. Januar 2003 ein erster lokaler Einsturz statt. Dies als Folge des Ausbruchs eines Querstollens. Zwei Tage später lösten sich plötzlich Gesteinsblöcke aus der Kalotte, und zwar auf die gesamte Kavernenlänge aber noch mit relativ bescheidener Tiefenausdehnung. Am 6. März 2003, hingegen erfolgte der Totaleinsturz der Kalotte mit einem Felsvolumen von insgesamt 1500-1700 m<sup>3</sup> Fels.

Lombardi AG wurde demzufolge von der Arbeitsgemeinschaft CIGLA-SADE beauftragt, die Instandsetzungsarbeiten sowie die Fertigstellungsarbeiten der Kavernenzentrale zu projektieren und während den Ausbrucharbeiten beratend beizustehen.

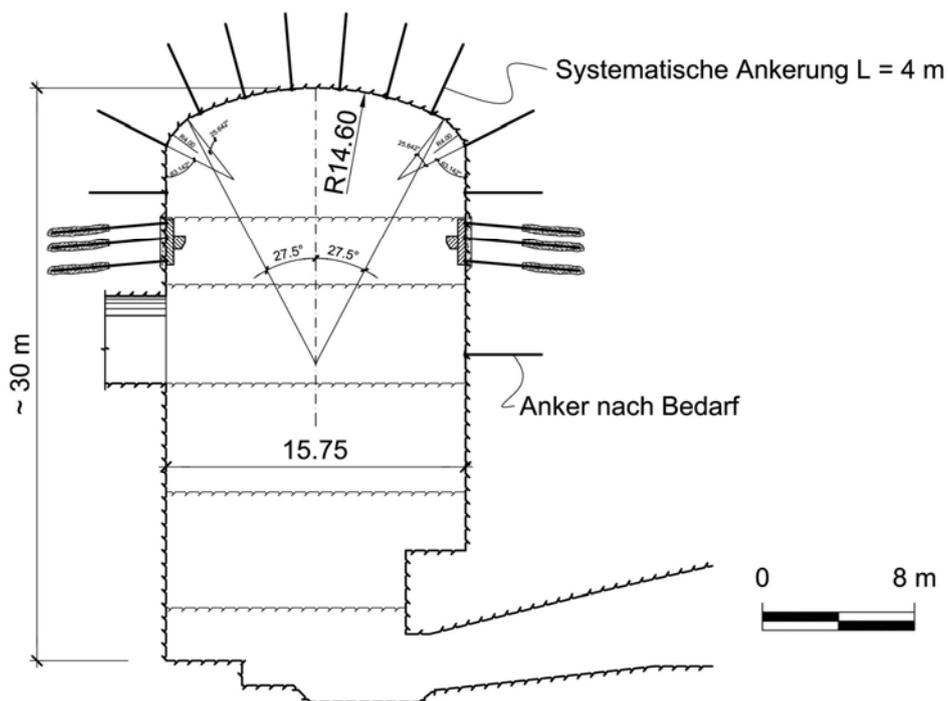
### 3.2 Ursprünglicher Projektentwurf und Ausführung

Die Überdeckung bei der Zentrale beträgt 250 m und unterteilt sich in Sandstein im oberen Teil und Granit auf Kavernenhöhe. Eine Sondierbohrung erlaubte die Felseigenschaften zu erkunden.

Die Festlegung der Felssicherungsmassnahmen basierte auf der Methode von Barton. Dabei werden die Gebirgseigenschaften mit dem sogenannten Q-Wert bewertet, welcher den Einfluss mehrerer Kriterien einschliesst, und damit die Sicherungsmassnahmen mit Rücksicht auf die Hohlraumabmessungen festgelegt.

Das Projekt setzte gute Felseigenschaften voraus ( $Q \geq 25$ ) und wurde dementsprechend dimensioniert. Die Sicherungsmassnahmen in der Kalotte bestanden aus einer Spritzbetonversiegelung und 4 m langen Ankern. In den Wänden waren Anker nur nach Bedarf zu setzen (**Figur 6**).

Die Ankerlänge liegt im Bereich der für diese Spannweite nach dem Q-System vorgeschlagenen Länge, scheint aber in Bezug auf die flache Kalotte eher kurz zu sein.



Figur 6: Sicherungsmassnahmen gemäss ursprüngliches Projektes

Während dem Ausbruch der Kalotte wurden grössere Klüfte mit einer tonig-lehmigen Füllung beobachtet. Später erwies sich dieses Kluffüllmaterial auch als wasserlöslich.

In der Ausführungsphase fehlte aber jegliche kritische Beurteilung der angetroffenen Verhältnisse in Bezug auf die Projektannahmen.

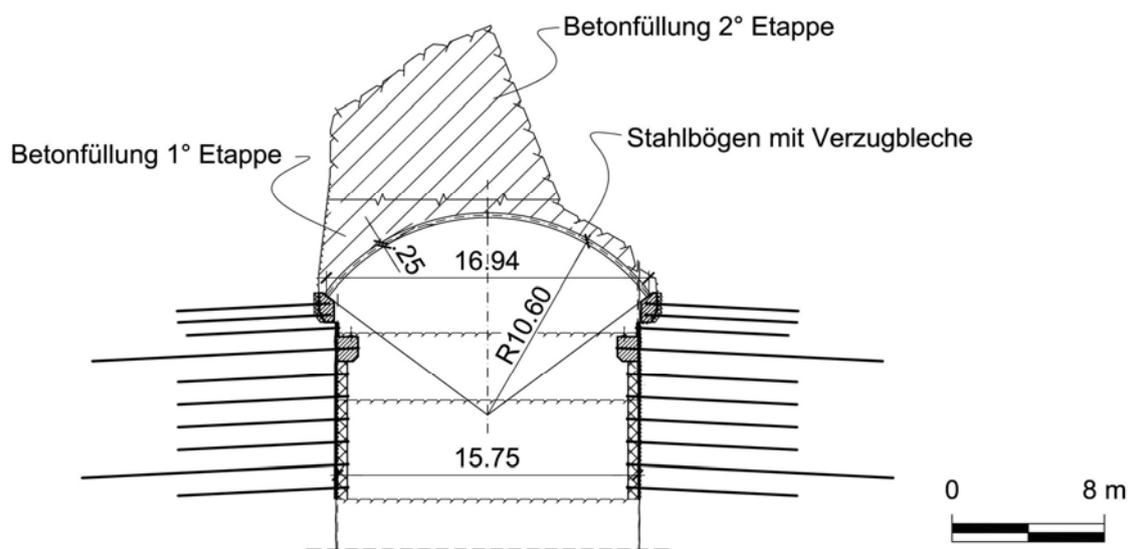
Die Felssicherungsmassnahmen waren für die effektiv angetroffenen Gebirgseigenschaften eindeutig ungenügend und konnten den imposanten Niederbruch keineswegs verhindern.

Der Niederbruch konnte sich über die gesamte Kavernenlänge erstrecken, da die Klufftorientierung in Bezug auf die Orientierung der Kaverne besonders ungünstig war.

### 3.3 Instandsetzung

Die Überprofile in der Kalotte waren bis 10 m hoch und die Gesamthöhe über der Kalottensohle betrug bis rund 16 m. Zusammen mit der Bauunternehmung wurde beschlossen, das gesamte Überprofil mit Beton zu füllen, damit sich oberhalb der Kalotte ein neuer Gewölbeträgung im Gebirge aufbauen konnte.

Die Kalotte wurde mit massiven Stahlbögen und Verzugsblechen gesichert und anschliessend hinterfüllt (Figur 7). Die Hinterfüllung wurde in zwei Etappen ausgeführt, wobei die erste im First bis 1 m über die Stahlprofile erstellt wurde. Nach Erstellen einer provisorischen Versteifung der ersten Etappe, erfolgte die Füllung des oberen Teils des Hohlraumes.



Figur 7: Instandsetzung der Kaverne nach dem Niederbruch (Darstellung nur des oberen Teils der Kaverne)

Die Sicherheitsmassnahmen der seitlichen Wände der Kaverne wurden neu aufgrund der effektiven Gebirgseigenschaften dimensioniert. Das Kranwiderlager wurde schliesslich auf Betonpfeiler abgestützt.

Die Instandsetzung der Kalotte wurde Mitte Mai 2003 abgeschlossen und somit konnte der Ausbruch der Kaverne weiter nach unten erfolgen.

Ende August 2003 war die Kavernenzentrale erfolgreich ausgebrochen und gesichert.

#### 4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die zutreffende Dimensionierung der Felssicherungsmassnahmen von unterirdischen Hohlräume, insbesondere bei Grossquerschnitten, ist eine schwierige Aufgabe, welche mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Deswegen sind möglichst zutref-

fende Einschätzungen zusammen mit einem guten Verständnis des statischen Verhaltens bei der Projektierungsphase notwendig. Eine sorgfältige Überwachung und Prüfung der Projektannahmen während der Ausführung sind zur planmässigen und erfolgreichen Erstellung unentbehrlich.

Die Überprüfungen während der Ausführung sind leider oft unzureichend, insbesondere bei Bauvorhaben, die mit Totalunternehmensverträgen realisiert werden. Der Druck auf die Kosten fördert die Unterschätzung und Vernachlässigung potentielle Gefährdungsbilder, was in besonderen unglücklichen Situationen auch zu grösseren negativen Auswirkungen führen kann.

Die guten Bedingungen für eine erfolgreiche Ausführung müssen deshalb mit vorsichtigen Einschätzungen in der Projektierungsphase bestimmt werden, da während der Ausführung laufende Projektanpassungen kaum mehr möglich sind, besonders wenn es sich um eine Verstärkung der Sicherungsmassnahmen handelt.

Das Einhalten von gewissen grundlegenden Projektierungskonzepten und Ausführungsregeln erweist sich von besonderer Bedeutung, wenn die Ausführung als Totalunternehmensvertrag vorgesehen wird.