

DIE INJEKTIONSARBEITEN IM ZUGE DER SANIERUNG DER KÖLNBREINSPERRE

Mag. G. Valentln

1. EINLEITUNG UND VORGESCHICHTE

Die Kraftwerksgruppe Malta der Österreichischen Draukraftwerke AG liegt in Kärnten, im östlichen Teil der Hohen Tauern.

Geologisch liegt das Projektgebiet im sogenannten Tauernfenster, wo unter der permomesozoischen Schieferhülle in einer gewaltigen Kuppelstruktur die penninischen Zentralgneise und deren "Altes Dach" zutage treten (Abbildung 1.1). Im Gebiet des oberen Maltatales, wo auch die Kölnbreinsperre errichtet wurde, dominieren massige Granodioritgneise, in denen schiefrige Einschaltungen als Reste des "Alten Daches" gedeutet werden können. Diese stehen zu den Zentralgneisen noch im primären Intrusionsverband und sind im wesentlichen auf die Randzonen dieser Gneise beschränkt.

Das bautechnische Kernstück der Kraftwerksgruppe Malta stellt die 200 m hohe Kölnbreinsperre dar. Diese, im Jahre 1977 fertiggestellte Gewölbemauer, schafft bei einer Kronenlänge von 626 m und einer Betonkubatur von 1,6 Mio. m³ einen Speicher für einen Nutzinhalt von rund 200 Mio. m³ Wasser.

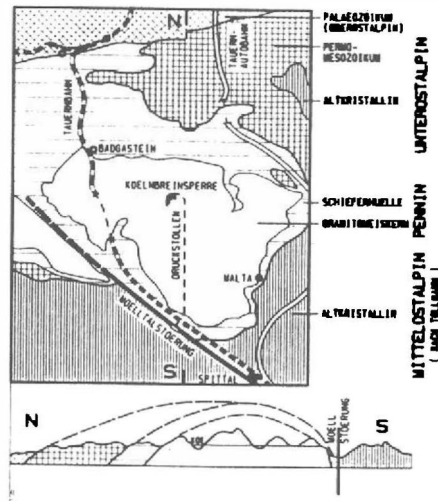


Abb. 1.1: Geologische Übersichtskarte (nach W. Demmer, 1992)

Für die Gründungsarbeiten dieser Bogensperre wurden umfangreiche ingenieurgeologische und felsmechanische Untersuchungen durchgeführt. Demnach kann für den glazial überprägten U-förmigen Talquerschnitt folgende Gesteinsunterteilung vorgenommen werden (Abbildung 1.2)

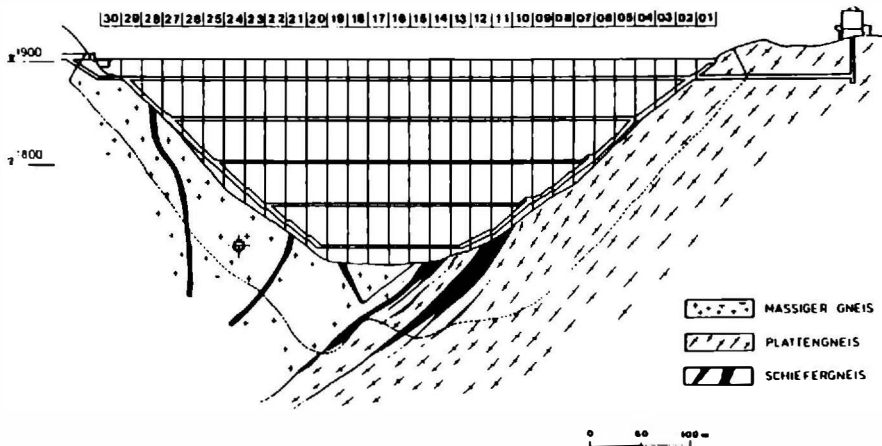


Abb. 1.2: Geologie an der Sperrenstelle - Ansicht von der Luftseite (aus Demmer W., Ludescher H., 1985)

- In der rechten Flanke dominieren weitgehend regellos körnige, kluftarme Granodioritgneise. Sie neigen zur Bildung von oberflächenparallelen Entspannungsplatten

Am Fuße der linken Talflanke treten Reste des "Alten Daches" zutage. Stark verschieferte Gesteine, ein bereichsweiser hoher Glimmeranteil sowie dünne schieferungsparelle Mylonitlagen charakterisieren diesen Bereich.

- Die linke Flanke wird von wenig geklüfteten Gneisen aufgebaut, die eine plattige Absonderung zeigen.

Die wichtigsten felsmechanischen Parameter sind aus den Abbildungen 1.3 und 1.4 ersichtlich.

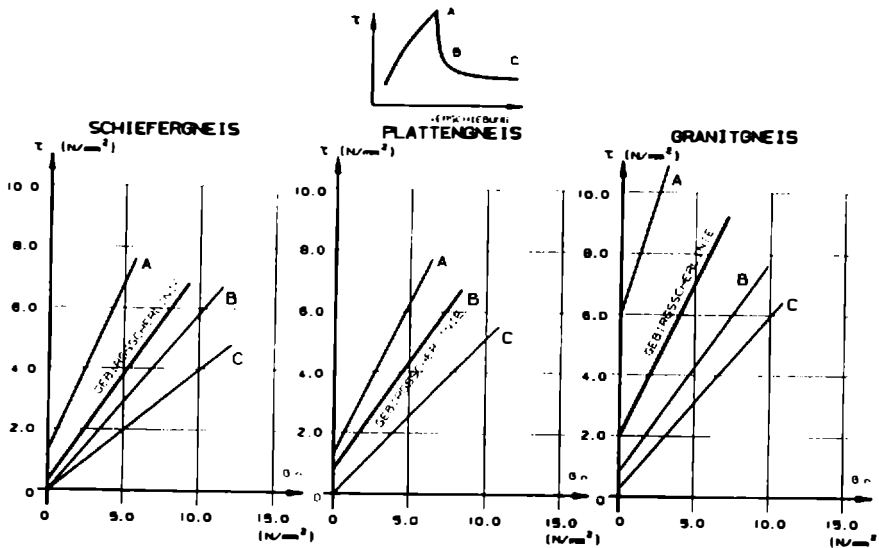
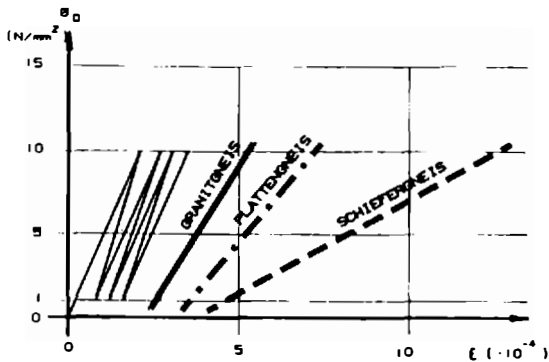


Abb. 1.3: Scherfestigkeit und Reibungswinkel des Gebirges



	VERFORMUNGSMODUL (N/mm ²)		
	1972	1986	
		AN D. GELÄNDE- OBERFLÄCHE	AB 10m TIEFE IN FELSUNTERGRUND
GRANITGNEIS	35 000	25 000	35 000
PLATTENGNEIS	23 000	LS	18 000
		RS	25 000
SCHIEFERGNEIS	17 000	LS	7 000
		RS	15 000

Abb. 1.4: Verformungsmodul des Gebirges

Im Zuge der ersten Einstauphasen, die zweimal zum Vollstau führten, mußte festgestellt werden, daß bei Überschreiten der Staukote 1860 m ü.A., das heißt rund 40 m unter Höchststau starke Sickerwasserverluste und bedeutende Kluft- und Sohlenwasserdruckerhöhungen an der Aufstandsfläche auftraten.

Umfangreiche Erkundungsarbeiten, wie das Abteufen von 33 000 lfm Bohrungen zeigten, daß sich im Sperrbeton der Kölnbreinsperre sowie in deren Gründungsbereich verschiedene Rißstrukturen ausgebildet hatten (Abbildung 1.5):

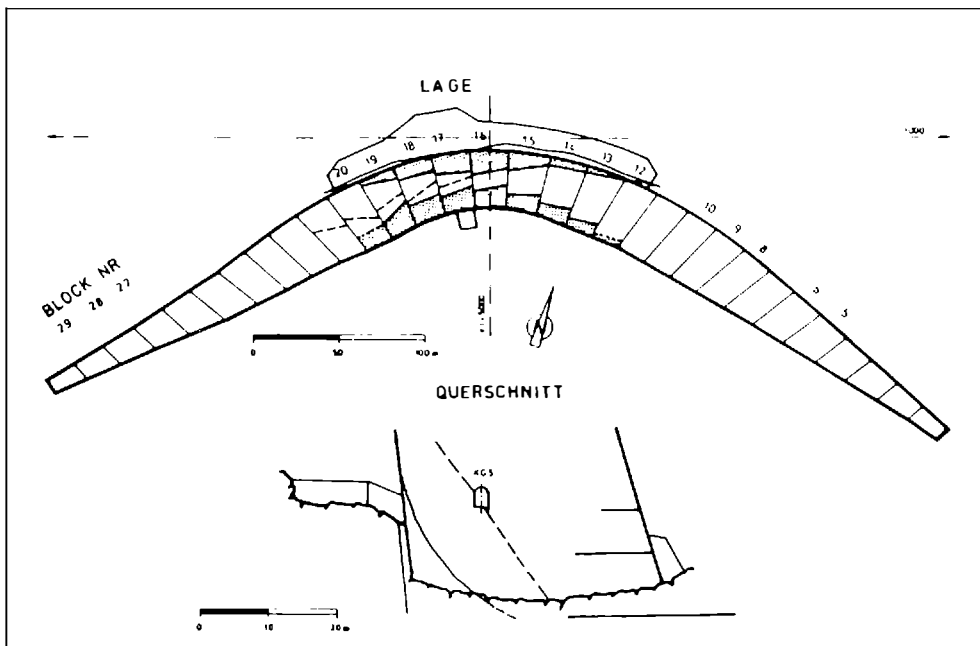


Abb. 1.5: Lage der Rißstrukturen

Im wasserseitigen Sperrbereich treten zwei, von der Aufstandsfläche zur Wasserseite steigende schalenförmige Rißsysteme auf. Diese, die höchsten Sperrblöcke durchschlagenden Trennflächen, sind bis heute wasserführend und wiesen beim Vollstau 1979 Gesamtöffnungsweiten bis 30 mm auf.

Die Risse im luftseitigen Sperrbereich verlaufen primär entlang horizontaler Betonierfugen. Ihre Entstehung ist auf zu hohe Zugspannungen beim Lastfall Eigengewicht bei leerem Becken zurückzuführen. Die maximalen Öffnungsweiten liegen bei 3,5 mm pro Riß.

Durch die plastische Verschiebung der Sperre entstand zwischen dem wasserseitigen Felsvorland und dem Betonkörper ein Vertikalriß, der zum Teil auch noch tief in den Gründungsfelsen eingreift.

Diese, im Fachkreis als Henny-Riß bekannte Struktur konnte hier weltweit zum ersten Mal in-situ beim Ausbruch von zwei begehbaren Schlitzen zur

seitlichen Abschottung des Vorbodens dokumentiert werden. Anhand der geologischen Dokumentation dieser Schlitzes, ist das unterschiedliche Rißmuster in den einzelnen Gesteinstypen zu erkennen (Abbildung 1.6):

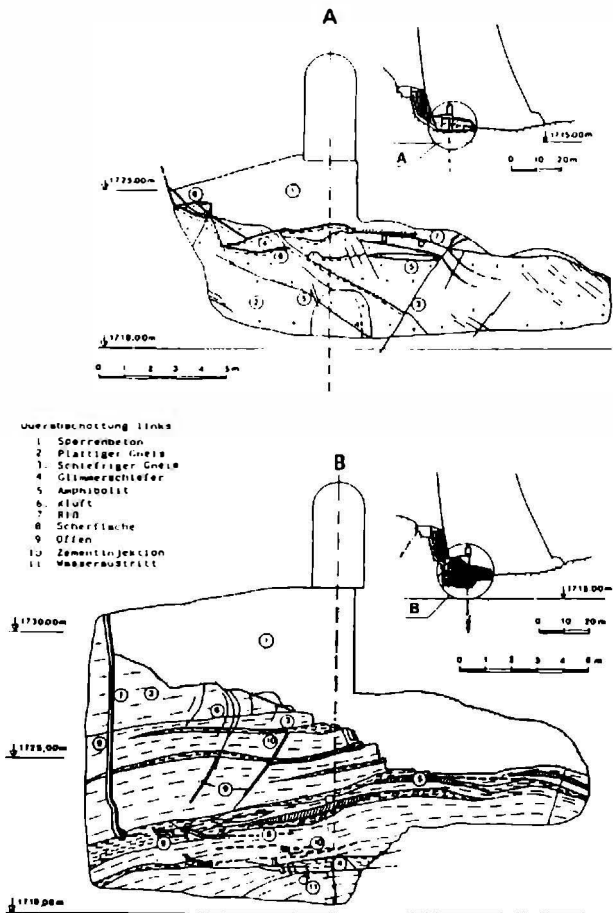


Abb.1.6: Geologische Dokumentation der Ausschottungsschlitzes (aus: Demmer W., Ludescher H. 1985)

Während in den weichen Schiefergesteinen die Auswirkungen der hohen Spannungen in eine Tiefe von rund 8 m ersichtlich sind, können im

kompakten Granodiorit lediglich in den obersten 2 m neu entstandene Risse festgestellt werden.

Aus der Forderung, für den Staubetrieb die hohen Sohlenwasserdrücke und unerwünschten Sickerwasserverluste zu verringern, wurden ab dem Jahre 1979 mehrere Sanierungsversuche durchgeführt (Abbildung 1.7):

REGELQUERSCHNITT

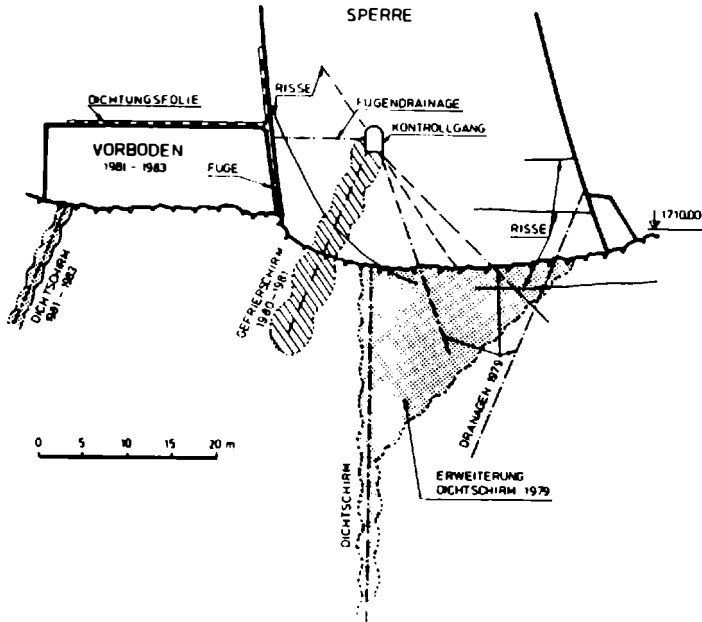


Abb. 1.7: Die Sanierungsmaßnahmen bis 1983 (aus Ludescher H., 1990)

1979 sind der Dichtschirm mit Zementinjektionen ergänzt und zusätzliche Dränagen abgeteufelt worden.

In den beiden darauffolgenden Jahren konnte mit Hilfe eines Gefrierschirmes eine deutliche Verbesserung der Situation erreicht werden. Als Dauerlösung erschien jedoch diese Maßnahme ungeeignet.

1981 bis 1983 wurde wasserseitig der höchsten Sperrblöcke ein Vorboden in Form einer bis 20 m starken Stahlbetonplatte eingebaut.

Die Risse im Sperrkörper sind während verschiedener Injektionskampagnen mit Zement, Polyurethan und Epoxyharz behandelt worden.

Diese unterschiedlichen Reparaturversuche zeigten im Laufe der Jahre jedoch nicht den gewünschten Erfolg. Daher beauftragte die Österreichische Draukraftwerke AG Herrn Dr. Lombardi, ein Sanierungsprojekt auszuarbeiten. Dr. Lombardi erkannte, daß die Risse im Inneren des Mauerquerschnittes primär auf hohe Hauptzugspannungen infolge großer Querkräfte zurückzuführen sind. Jener Überlegung zugrundeliegend wurde die Errichtung eines luftseitigen Stützgewölbes vorgeschlagen. Dieser Betonkörper, mit einem Volumen von rund einer halben Million Kubikmeter soll eine Abstützung der Kölnbreinsperre in der Größenordnung von 11.000 MN (1,1 Mio.t), das heißt rund 20 % der gesamten Wasserlast ermöglichen und entsprechend die Querkräfte im gleichen Maß reduzieren (Abbildung 1.8).

Als Kraftübertragungssystem wurde die Anordnung von 613 Neoprenelagern in neun Lagerreihen bei Nennlasten von 16 MN projektiert. Zusätzlich zu dieser Stützkonstruktion war die Sanierung der Risse mit Injektionen vorgesehen. Die Injektionsarbeiten sind daher ein wesentlicher Bestandteil des Sanierungskonzeptes. Das Ziel der Injektionen besteht darin, die Kontinuität hinsichtlich der Kraftübertragung und die Dichtigkeit in den gerissenen Zonen im Felsen und im Sperrbeton wiederherzustellen.

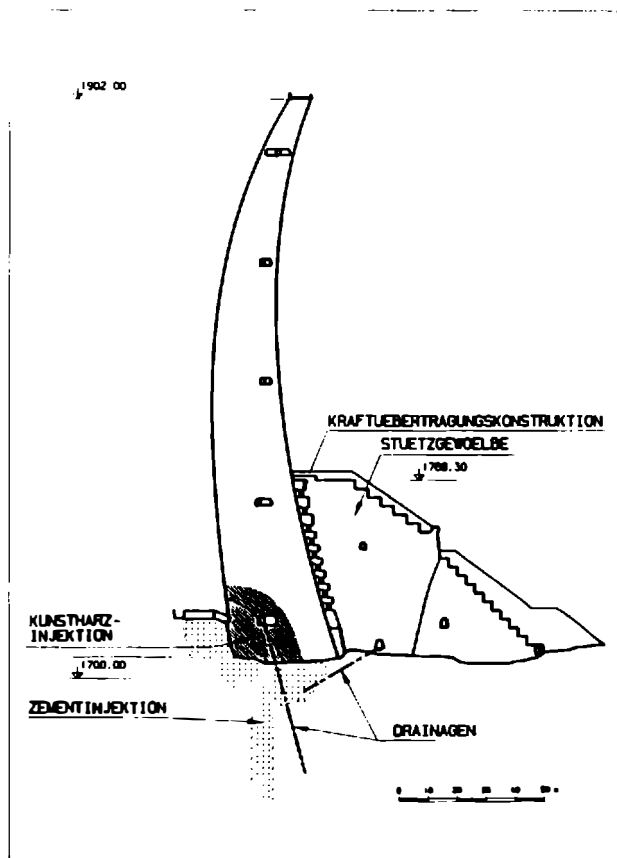


Abb.1.8: Das Sanierungsprojekt 1989

2. INJEKTIONSMITTEL

Für die Sanierung der Kölnbreinsperre werden, je nach Anforderung an das Verpreßgut, zwei Injektionsmittel verwendet: Es sind dies Zement und Kunstharz.

Das Fließverhalten dieser zwei Stoffe kann mit rheologischen Gesetzen beschrieben werden und hängt von einer Reihe von Parametern ab. Ist im Verpreßmittel keine Kohäsion vorhanden, so entspricht dies einer Newton'schen Flüssigkeit. Wie bei Wasser, kann bei vielen Kunstharzen die Kohäsion vernachlässigt werden. Zur Beschreibung des Fließverhaltens wird die stoffabhängige Viskosität konstant gesetzt. Im Gegensatz dazu, muß bei einer Bingham'schen Flüssigkeit zusätzlich die Kohäsion berücksichtigt werden. Dies bedeutet, daß z. B. eine Zementsuspension erst ab einer kritischen Schubspannung (Fließgrenze) zu fließen anfängt (Abbildung 2.1).

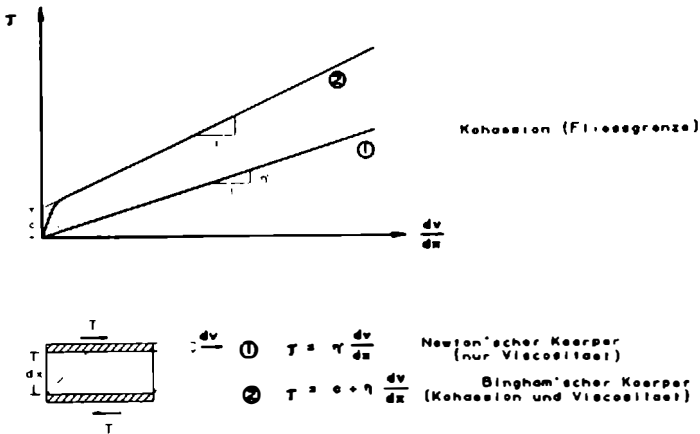


Abb.2.1: Charakteristische Fließkurven

Ausschlaggebend für eine Zementinjektion ist die Tatsache, daß auf Grund der ungelösten Zementkörner das Verpreßgut als Suspension mit einer inneren Reibung betrachtet werden muß. Weiters besteht die

Möglichkeit der Absonderung der Körner aus dem Gemisch. Dementsprechend können sehr dünne Risse nicht injiziert werden.

Als Regel gilt, daß für eine erfolgreiche Injektion die Spaltweite größer als der 5fache maßgebende Komdurchmesser (D85) sein soll. Der maßgebende Komdurchmesser ist jener Durchmesser, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 85 % unterschritten wird. Für einen mittleren Normzement bedeutet dies, daß die kritische Spaltweite bei rund 0,3 mm liegt. Speziell entwickelte Feinzemente mit Blaine-Ziffern von bis zu 15.000 können diese Grenze zwar heruntersetzen, keinesfalls aber eliminieren.

Bezüglich dem Wasser-Zement-Wert lehrt uns die Betontechnologie, daß die Festigkeit umgekehrt proportional zum Wasserüberschuß ist. Das heißt, die Wassermenge sollte so weit als möglich begrenzt werden. Auf der anderen Seite wird für den Injektionsvorgang genügend Wasser als Lubrikationsmittel benötigt, um das Auftreten von zu hohen inneren Reibungen zu vermeiden. Um durch einen niedrigen WZ-Wert die angestrebte Festigkeit des Zementsteines zu erreichen, kann mit Hilfe von Additiven die Fließeigenschaft verbessert werden. Stand der Technik ist, für Felsinjektionen ausschließlich stabile Suspensionen heranzuziehen.

Neben dieser eher traditionellen Zementinjektion werden bei der Kölnbreinsperre, insbesondere zum Sanieren der Betonrisse auch Epoxyharze verarbeitet. Da es sich dabei um reine Flüssigkeiten handelt, liegt die Grenze der Injizierbarkeit theoretisch im molekularen Bereich. In der Praxis zeigt sich, daß ein Epoxyharz mit einer Viskosität von 20.000 m.Pa.s Öffnungsweiten von unter 0,1 mm erreichen kann.

Die Injektionsarbeiten auf Kölnbrein werden unter strenger Beachtung der vorgeschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten und nicht nur nach rein empirischen Grundlagen geplant und durchgeführt. Neben ÖDK-eigenen Erfahrungen kommt das Knowhow der ausführenden Baufirmen hinzu. Namentlich sind dies die Firmen Insond, Sonderbau und Staug.

Zusätzliche theoretische Impulse kommen weiters von einer Arbeitsgruppe der International Society for Rock Mechanics, sowie vom österreichischen Arbeitskreis "Injektionen im Beton"

Als äußerst vorteilhaft für die zusätzliche Erkundung der einzelnen Injektionsbereiche sowie für die Interpretierung der Injektionsergebnisse erwies sich die Entscheidung, den Großteil der Injektionsbohrungen als Kernbohrungen auszuführen.

3. INJEKTIONSETAPPEN

Während der Felsaushub für den Stützkörper sowie die ersten Betonierarbeiten im Jahre 1989 in Angriff genommen wurden, war der Beginn der Injektionsarbeiten für 1990 vorgesehen. Entsprechend den verschiedenen Anforderungen an die Injektionen werden folgende Hauptinjektionsbereiche unterschieden (Abbildung 3.1):

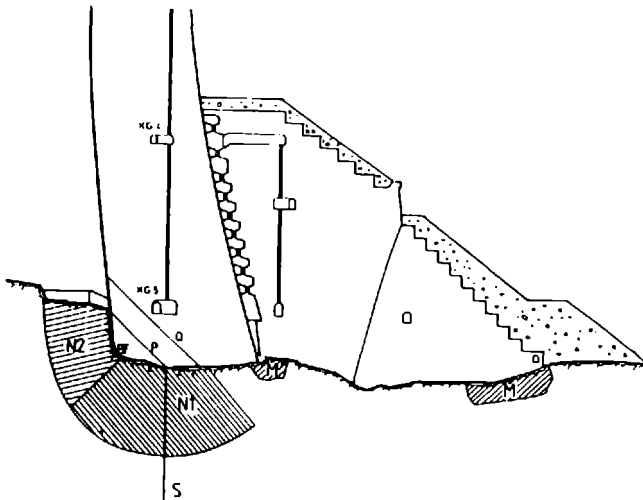


Abb.3.1. Schematische Darstellung der Injektionsbereiche

3.1 Dichtschirm (Etappe S)

Bei der Etappe S wurden als erste Maßnahme 13 Kontrollbohrungen je 40 m in der Dichtschirmebene der Kölnbreinsperre abgeteuft. Sie hatten die Aufgabe, den Ist-Zustand des ursprünglichen Dichtschirmes im Bereich des Talbodens zu untersuchen. Es wurden Wasserabpreßversuche, Bohrlochfermesehndierungen sowie Auswertungen der Bohrkern durchgeführt.

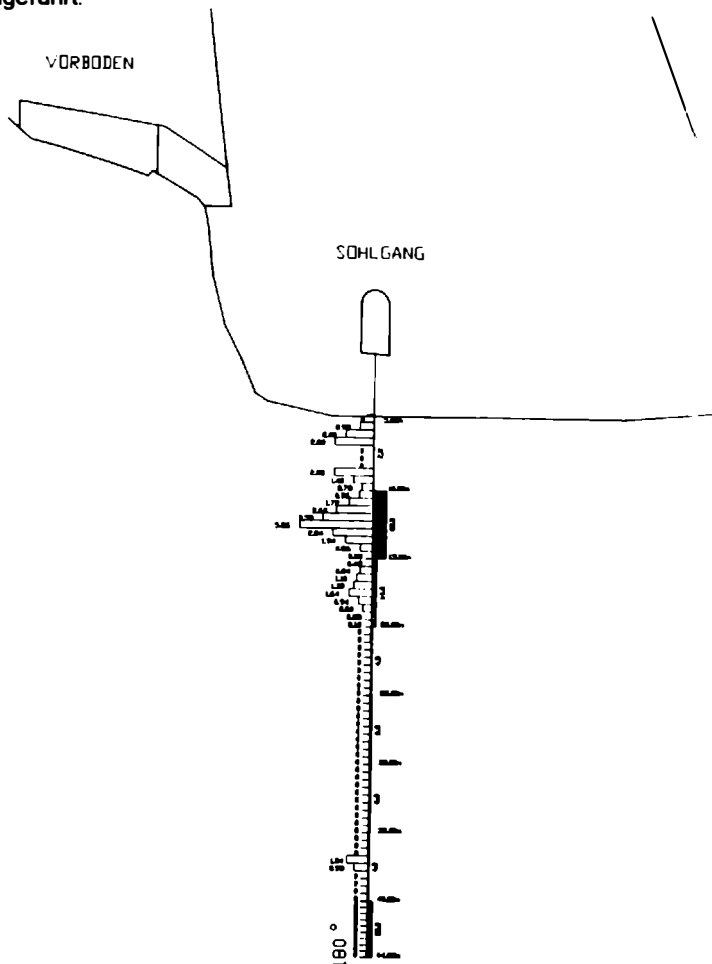


Abb. 3.2: Graphische Ergebnisse von Wasserabpreßversuchen und Zementinjektionen

Für die Wasserabpreßversuche ist eine Passenlänge von 5 m gewählt worden. Der Verpreßdruck betrug direkt unter der Aufstandfläche 15 bar, in der restlichen Felsstrecke 25 bar. Die Abbildung 3.2 zeigt ein Beispiel für die graphische Darstellung dieser Ergebnisse.

Während auf der linken Seite die Wasseraufnahmen für die einzelnen Druckstufen in l/min/m dargestellt sind, wird auf der rechten Seite das Injektionsvolumen einer Passe in kg/m ausgewiesen. Speziell der oberste Felsbereich zeigt hier in deutlicher Weise das unterschiedliche rheologische Verhalten von Wasser und einer Zementsuspension. Konnte beim Abpreßversuch eine Wasseraufnahme von fast 3 l/min/m erreicht werden, so verhielt sich das Gebirge unter den gleichen Druckverhältnissen bei der Injektion als dicht. Dies bestätigt offensichtlich, daß durch Zementsuspensionen sehr feine Risse nicht mehr erfaßt werden können. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, den Dichtschirm örtlich mit Kunstharz nachzuinjizieren. Speziell im Kontaktbereich zur Sperre ist eine möglichst perfekte Abdichtung von entscheidender Bedeutung, da hier der größte hydraulische Gradient auftritt und dieser Abschnitt des Dichtungsschirmes den Auftrieb in maßgebender Weise mitbestimmt.

Im allgemeinen kann gesagt werden, daß Wasserabpreßversuche nur in sehr beschränktem Maße nützliche Aussagen über die zu erwartende Aufnahme von Injektionsgut geben können. Dies trifft noch weniger zu, falls es sich um eine Bingham'sche Flüssigkeit handelt.

Bei den Untersuchungen in der Dichtschirmebene zeigte sich, daß dieser Bereich die Überbeanspruchungen des Untergrundes überraschend gut überstanden hat.

3.2 Felsbereich unter der Sperre (Etappe N1)

Beidseitig des Dichtungsschirmes sollte der Felsbereich unter der Sperre mit einer Zementsuspension behandelt werden. Eine Konsolidierung des überbeanspruchten Gebirges sowie eine Abdichtung desselben wurde in dieser Zone zum Ziel gesetzt. Die Mischrezeptur sah die Verarbeitung von

PZ 375 mit einem WZ-Faktor von 0,7 und der Beigabe von 0,5 % eines Verflüssigers vor.

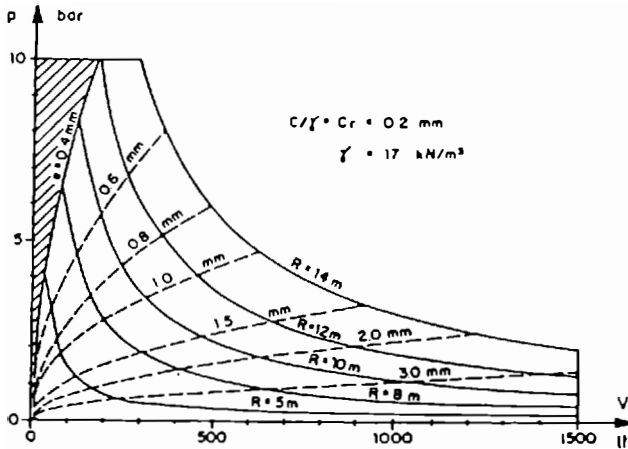
Da in diesem, wie auch in allen anderen Injektionsbereichen die unmittelbare Sperrennähe nur gewisse Spannungseinflüsse zuläßt, wird auf die Begrenzung der Injektionsenergie besonderes Augenmerk gelegt. Maßgeblich für die Beurteilung ist hier keinesfalls der an der Pumpe oder am Packer gemessene Druck, der im Spalt bis zu 75 % niedriger sein kann, sondern die gesamte Kraft, die sich aus Integration des Druckverlaufes über die injizierte Fläche ergibt. Aus dieser Betrachtung wurde von Dr. Lombardi ein Grenzwertkriterium abgeleitet, nach welchem sich die Spaltkraft aus dem Produkt des wirksamen Druckes in der Kluft und der mit Injektionsmaterial gefüllten Fläche zusammen setzt (Abbildung 3.3).

Werden die im wesentlichen mit Fernsehsondierungen in Bohrlöchern ermittelten Kluftöffnungsweiten in die Formel eingebracht, so erhält man eine grobe Abschätzung des Injektionsvolumens. Setzt man die als zulässig erachtete Hebungskraft konstant, so erhält man eine Hyperbel mit der Beziehung $P \cdot V$ ist konstant. Da diese Hyperbel ins Unendliche verläuft, werden sowohl für die Drücke als auch für die Volumina die beiden äußersten Äste gekappt.

Beim Injektionsvorgang startet die Kennlinie im Nullpunkt des Koordinatenkreuzes und steigt je nach der Aufnahmefähigkeit des Gebirges an. Während bei großen Aufnahmen sowie bei Umläufigkeiten die Injektionskurve eher einen flachen Verlauf annimmt, zeigt eine beschränkte Wegigkeit einen steilen Kurvenverlauf. Als Abbruchkriterium gilt die hyperbolische Grenzlinie, welche die zulässige Obergrenze für die Injektionsenergie darstellt.

Die Bestimmung des Druckes für das Einhalten dieser Injektionsregel wird bei Rate Null gemessen. Für die Praxis bedeutet dies, daß nach einem gewissen verarbeiteten Injektionsgutvolumen immer wieder die Injektionspumpe abgeschaltet und am Schreibstreifen der sich einstellende Ruhedruck beobachtet wird. Alleine durch diese Vorgangsweise kann eine annähernde Abschätzung des wahren Druckes in der Trennfläche vorgenommen werden. Weiters ist es möglich, auf

Grund der Form dieser Ruhedruckkurve Rückschlüsse auf die Trennflächengeometrie sowie auf die Sättigung des Injektionsbereiches zu ziehen.



MIT ZEMENT NICHT INJIZIERBAR

- p Injektionsdruck in Bar
- v Injektionsvolumen in Liter
- e Rissweite in Millimeter
- R Reichweite der Injektion in Meter
- C_r Relative Kohäsion der Injektionsmischung (Wasser-Zement) mit einer Dichte von 1,7

Abb.3.3: Beispiel eines Injektionsregeldiagrammes zur Bestimmung des Enddrucks (aus: Lombardi G., 1988)

Bei der Behandlung des Felsbereiches unter der Kölnbreinsperre wurde in diesem Sinne ein Energiekriterium gewählt, bei welchem das Produkt aus Druck (bar) und Menge (l) abzüglich des Bohrlochvolumens den Wert 7.500 für die obersten 5 m und 12.500 für die restliche Bohrstrecke nicht überschreiten darf.

Die Injektionsbohrungen wurden vom untersten Kontrollgang abgeteuft, der Abstand der Primärprofile betrug 6 m, die Passenlängen 5 m. Nach Injektionsbeendigung und dem Aushärten des Injektionsgutes ist eine zweite Etappe auf Lücke zu den Profilen der Ersten durchgeführt worden. Zusammengerechnet mit der ersten Phase der Dichtschirminjektion wurden so rund 14.000 Bohrmeter aufgeteilt auf 582 Bohrungen behandelt.

Eine Auswertung der Injektionsergebnisse (Abbildung 3.4) bestätigt die Bohrkernbefunde und die Erkenntnisse der Bohrlochfermesehondierungen, daß im Bereich der Verschiebungszonen neben weit durchstreichenden, offenen Einzelklüften auch unzählige schieferungsparallele Trennflächen mit keinen oder nur geringen Öffnungsbeträgen auftreten.

Diese können durch den Injektionsdruck wesentlich leichter aufgeweitet werden, zumal glimmerreiche Gesteine ein gewisses Maß an Verformungen zulassen. Die Reichweiten der Zementsuspensionen sind in den schieferungsparallelen Strukturen jedoch offensichtlich gering. Diese Schlüsse kann man aus den Ergebnissen der Sekundärinjektionen ableiten, deren Aufnahmen, verglichen mit jenen im Granodiorit, noch immer relativ hoch sind.

Der Hauptgrund für die große Primäraufnahmen unter den Blöcken 10 und 11 ist auf zahlreiche Umläufigkeiten bei den wasserseitigen Injektionsbohrlöchern zurückzuführen.

Im allgemeinen weisen aber die eher bescheidenen Gesamtzementaufnahmen darauf hin, daß sich das Gebirge in einem befriedigenden Zustand befindet. Die deutliche Abnahme der Mischgutaufnahme um rund 75 % von der Primär- zur Sekundärphase bestätigt eine erfolgreiche Injektion sowie ein gut gewähltes Bohrschema.

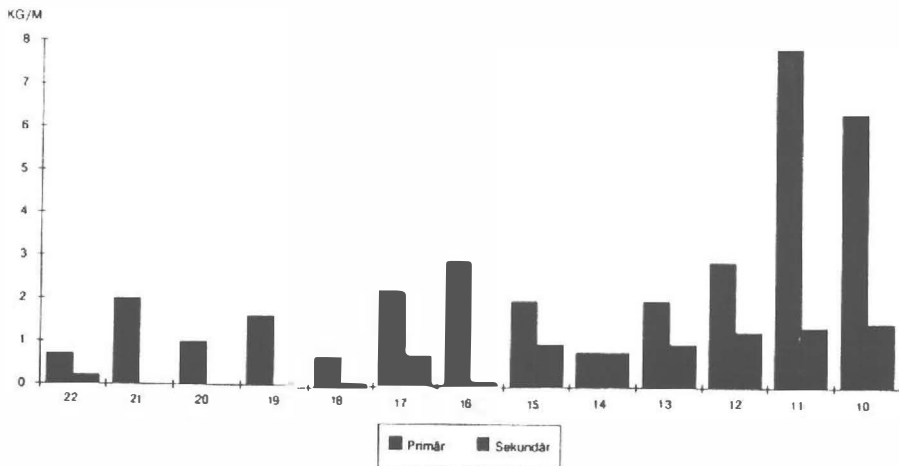


Abb.3.4: Durchschnittliche Zementaufnahme in den einzelnen Sperrenblöcken (Etappe N1)

3.3 Felsbereich unter dem Vorboden (Etappe 2)

Einer Konsolidierung des wasserseitigen Sperrenvorlandes kommt in zweierlei Hinsicht eine große Bedeutung zu. Einerseits soll der gut verdichtete Felskörper als Widerlager für das Auspressen der Risse im Beton dienen und andererseits eine verbesserte Abstützung der Sperre im Lastfall Eigengewicht sicherstellen (Abbildung 3.5).

Diese Injektionsmaßnahme wurde sofort zu Beginn der Bausaison 1991 in Angriff genommen. Für die Verpressung mit Zement waren nachfolgende Rahmenbedingungen einzuhalten: Als Energiekriterium durfte der maximale Injektionsdruck 30 bar bzw. 15 bar in unmittelbarer Nähe zum Betonkörper nicht überschreiten. Das Injektionsvolumen war mit 250 l pro 5 m Passe begrenzt (Abbildung 3.6).

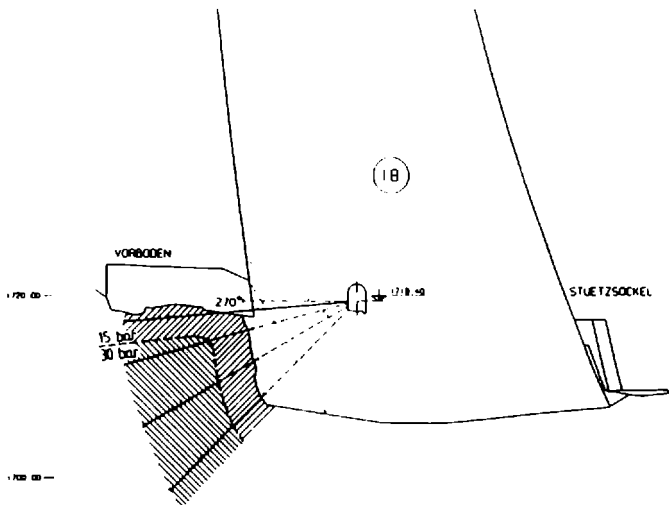


Abb.3.5: Schematische Darstellung des Injektionsbereiches N2

Die Injektionsbohrungen wurden in Rotationsbohrtechnik mit einem Durchmesser von 46 mm abgeteuft. Es war vorgesehen, diese Löcher zur Behandlung der folgenden Injektionsbereiche heranzuziehen:

Fels unter dem	
Vorboden	- Injektionsmaterial: Zement
Bewegungsfuge	- Injektionsmaterial: Mikrozement
Rißgruppe P	- Injektionsmaterial: Kunstharz
Rißgruppe Q	- Injektionsmaterial: Kunstharz

Um eine exakte räumliche Begrenzung dieser Injektionszonen zu erzielen und vor allem eine Vermischung der Zemente mit Kunstharz zu vermeiden, sind verlorene, aufblasbare Packer an die Bereichsgrenzen gesetzt worden. Dieser Packertyp ist weiters in jeder Passe der steigenden Zementinjektionsbohrungen angeordnet worden, um zu gewährleisten, daß das Verpreßgut nicht nach unten ausrinnt, sondern unter Druck abbindet.

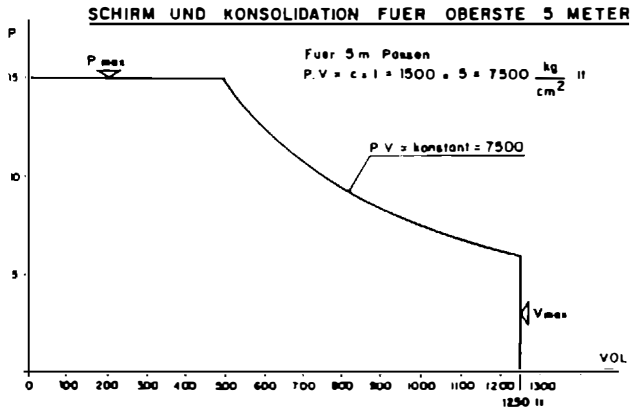
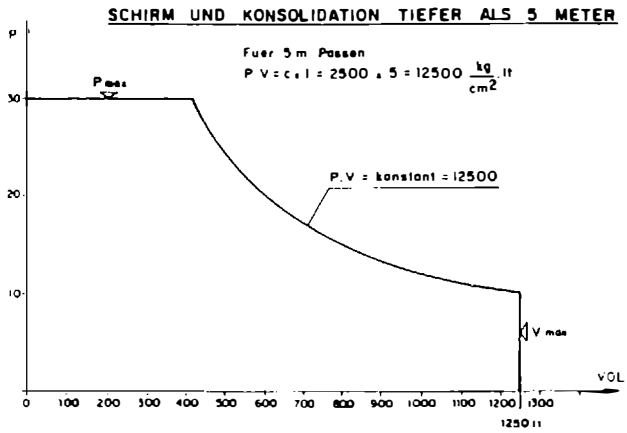


Abb. 3.6 Injektionsgrenzlinien für die Etappe N2 (aus: Lombardi G . 1990)

3.4 Bewegungsfuge (Etappe BF)

Die Bewegungsfuge, welche als Ablösungsriß zwischen Sperre und wasserseitigem Felsvorland zu verstehen ist, wurde nach dem Aushärten der in N2 eingepreßten Zementsuspensionen behandelt.

Geologische Untersuchungen von Bohrkernen sowie Fernsehsondierungen in zahlreichen Erkundungsbohrungen ergaben, daß die Bewegungsfuge keine einzelne, weit klaffende Struktur ist. Häufig bildet sie, primär im Felsbereich, aber zum Teil auch in den Sperrenbeton übergreifend, ein Rißbündel von bis zu fünf annähernd vertikalen Einrissen innerhalb einer etwa 1 m breiten Zone. Weiters konnte beobachtet werden, daß die Trennflächen zum Großteil durch vorangegangene Injektionskampagnen beziehungsweise durch eingeschwemmte Feinteile verschmutzt sind.

Schon im Jahre 1990 wurden Überlegungen bezüglich des innerhalb der Bewegungsfuge zu verpressenden Injektionsmaterials angestellt. 1991 sollten zahlreiche Laborversuche, Experimente auf der Baustelle sowie in-situ-Injektionsversuche die definitive Entscheidungsfindung unterstützen.

Da bei dieser Injektionsphase relativ dünne Risse erfaßt werden mußten und weiters eine hohe Anforderung an die Druckfestigkeit des ausgehärteten Injektionsmittels gestellt wurden, fiel die Wahl schließlich auf Feinzement.

Die Feinzemente, die auch unter den Bezeichnungen Ultrafeinzemente oder Mikrozemente bekannt sind, gehen auf die Entwicklung eines japanischen Zementherstellers zurück. Erste Aufmerksamkeit erregte das Produkt hierzulande infolge von Veröffentlichungen amerikanischer Autoren zu Anfang der achtziger Jahre.

Der Unterschied zu den herkömmlichen Zementen liegt primär in der Mahlfineheit. Danach sind Mikrozemente bis zu dreimal feiner als die üblichen Normenzemente, die Blaineziffer erreicht Werte von bis zu 15.000 (cm²/g). Verschiedenste Versuche ergaben, daß diese Zementleime Rißöffnungsweiten bis zu 0,1 mm erfassen können. Für die

Haftzugfestigkeit konnten überraschend hohe Werte von bis zu 2 N/mm^2 nachgewiesen werden.

Bei der Sanierung der Kölnbreinsperre sollte sich jedoch herausstellen, daß Injektionsgeräte und Verpreßtechniken, welche bei der Verarbeitung von herkömmlichen Zementsuspensionen angewendet werden, für den Feinzement nicht uneingeschränkt geeignet sind.

Als entscheidende Erkenntnis ergab sich, daß die Förderleitung bis zum Einpreßort möglichst kurz und das jeweils vorbereitete Mischgutvolumen klein gehalten werden muß. Dadurch wird ein frühzeitiger Erhärtungsprozeß hintangehalten.

3.5 Risse im Sperrbeton (Etappen P und Q)

Die Injektion der Risse im Sperrkörper nimmt eine besondere injektionstechnische Stellung innerhalb des Sanierungsprogrammes ein. Anfänglich bestand der Wunsch, in den Rissen mit eingepreßtem Kunstharz eine zugfeste Verklebung zu erzielen. Umfangreiche Bohrlochfernsehsondierungen sowie Auswertungen der Bohrkerns zeigten jedoch, daß die Wandungen dieser Trennflächen durch verschiedene Injektionsmittel von vorangegangenen Dichtungsversuchen großteils bereits stark verunreinigt waren. Ein großflächiger, zugfester Kraftschluß konnte daher durch Injektionen nicht mehr garantiert werden. In diesem Sinne wurde das Hauptziel auf die Abdichtung der Rißbereiche beschränkt.

Die Kunstharzbehandlung dieser Diskontinuitätsflächen sollte in zwei Phasen durchgeführt werden die Primärinjektion im Jahre 1991 bei Staulagen bis 1840 m ü.A., das heißt rund 60 m unter Vollstau und im darauffolgenden Jahr bei höheren Staulagen und somit größeren Rißöffnungsweiten die Sekundärinjektionen.

Bei der Injektionsdurchführung wurden die Bereiche P und Q durch das Setzen von verlorenen Packern räumlich getrennt. Diese Abgrenzung war notwendig, da die Rißgruppen grundsätzlich verschiedene Charakteristika aufweisen.

Während zum Beispiel die Rißgruppe P aus ein bis zwei weit offenen Strukturen besteht, welche bei Stauspiegeländerungen ein deutliches Rissespiel zeigen, setzt sich die Rißgruppe Q aus einem Bündel von sehr feinen Trennflächen mit einem geringeren Bewegungsspiel zusammen. Jede dieser Behandlungszonen stellt somit unterschiedliche Anforderungen an die Injektionstechnik.

Der zur Verschließung der Risse im Beton der Kölnbreinsperre verwendete Kunststoff, ein Epoxyharz namens Rodur von der Firma Rodio hergestellt, wird in vier verschiedenen Variationen angefertigt. Die Viskositätswerte liegen zwischen 4.000 und 48.000 m.Pa.s. Um eine bessere Identifizierung der jeweiligen Rodursorte bei nachfolgenden Kontrollbohrungen durchführen zu können, ist eine Einfärbung des Verpreßgutes vorgenommen worden.

Zur Überwachung unerwünschter Verformungen innerhalb des Sperrenkörpers, werden während der Injektion in konkreten Tiefen von Gleitmikrometer-Meßstrecken fernablesbare Mikrometer eingebaut. Zusammen mit Extensometermessungen können mögliche Verformungen direkt am Schreibstreifen der Injektionspumpe beobachtet werden. An den von der Firma Insond entwickelten Pumpeneinheiten werden weiters die Injektionsmenge, der Druck am Bohrlochmund und wahlweise das Produkt aus Menge und Druck oder die Injektionsrate aufgezeichnet.

Die speziell für die Sanierung der Kölnbreinsperre entwickelte Injektionsdatenerfassung "AIDEK" gewährt während der Feldarbeit eine laufende Kontrolle dieser Abläufe. Synchron zu dem an der Pumpe installierten Fünf-Band-Schreiber werden alle Daten umgeformt und in die Bauleitung fernübertragen, wo die einzelnen Injektionsprozesse on-line über Bildschirm mitverfolgt werden können. Gleichzeitig wird dieses Informationspaket über eine Modemleitung nach Klagenfurt übertragen und auf Disketten gespeichert, um für periodische Auswertungen und begleitende Kontrollen jederzeit greifbar zu sein.

Für die Injektionsetappe P welche die Behandlung von 215 Bohrlöchern mit Kunstharz vorsah, ist folgendes Energiekriterium definiert worden: Das maximale Verpreßvolumen lag bei 50 l/Bohrloch, der

Ruhedruck, gemessen 6 Minuten nach dem Abstellen der Pumpe, durfte 30 bar nicht übersteigen. Auf Grund der hohen Viskosität des Kunstharzes war es erlaubt, den maximalen Arbeitsdruck bis 70 bar zu erhöhen.

Beim Injektionsvorgang war vorgesehen, die untersten Bohrungen eines Blockes zuerst mit Rodur zu beaufschlagen und dann die Injektionsfront über den Riß von Bohrloch zu Bohrloch kontinuierlich von unten nach oben zu treiben. Die vorangegangenen Rißbehandlungen sowie die staubedingten, geringen Rißöffnungsweiten verhinderten jedoch eine gleichmäßige Ausbreitung des Kunstharzes. Es mußte festgestellt werden, daß nur etwa 20 % aller Bohrlöcher eine gegenseitige Verbindung zeigten.

Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei der nachfolgenden Injektionsetappe Q beobachtet werden. Als Energiekriterium wurde hier bei größeren Rißöffnungen das der Injektionsetappe P angewendet. Sie konnten durch höhere Injektionsmittelaufnahmen bei der Vorauffüllung sowie über die Druckentwicklung bei Injektionsbeginn erkannt werden.

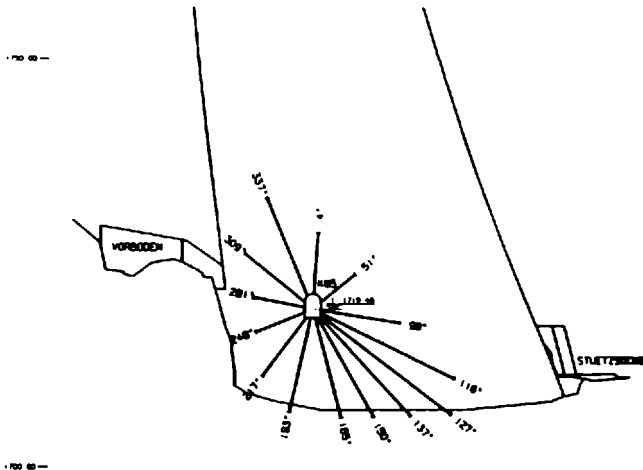


Abb.3.7: Charakteristisches Bohrschema zur Behandlung der Rißgruppe Q

Zeichneten sich hingegen infolge des raschen Druckaufbaues bei kleinen Injektionsmengen geringe Öffnungsweiten ab, so wurde der Arbeitsdruck auf 90 bar gesteigert. Der maximale Ruhedruck ist in diesem Fall mit 30 bar beibehalten worden. Die Kontrolle des Ruhedruckes erfolgte jedoch schon nach je 5 l Verpreßvolumen, wobei der Beobachtungszeitraum auf 20 Minuten ausgedehnt wurde. Unter Anwendung dieser gefühlvollen Injektionstechnik sollte ein Rissetreiben in jenen Strukturen, die nicht bis zur Wasserseite reichen, vermieden werden.

4. INJEKTIONSAUSWERTUNG UND INTERPRETATION

Stellvertretend für alle anderen Injektionsbereiche soll hier nur über die Auswertung der Rißinjektionen im Sperrkörper berichtet werden.

Auf der Grundlage der bekannten Rißfläche sowie des verarbeiteten Verpreßvolumens, ist eine theoretische Überlegung bezüglich der Stärke des injizierten Rodurfilmes durchgeführt und graphisch dargestellt worden (Abbildung 4.1)

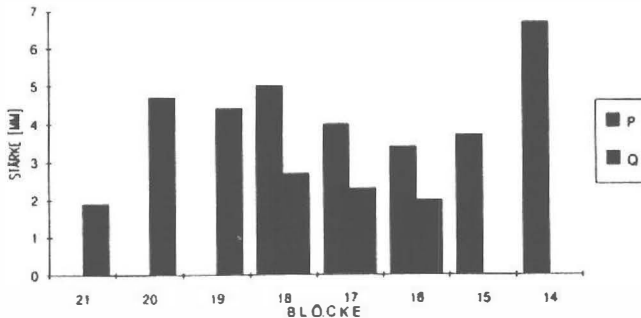


Abb.4.1 Theoretische Stärke des injizierten Rodurfilmes in den Rißgruppen P und Q

Bei der Etappe P kann man die größere Filmstärke im Block 14 dadurch erklären, daß in diesem Bereich die Bewegungsfuge, das heißt der Ablösungsriß zwischen Sperre und Felsvorland, zum Teil entlang der Rißgruppe P ausgebildet ist und speziell hier, auf Grund der weichen Schiefergesteine im Untergrund, die größten plastischen Verformungen stattgefunden haben.

Bei der Injektionsetappe Q zeigen die Blöcke 19 und 20 unerwartet hohe Werte. Eine Erklärung dafür mag in der sehr engmaschigen Bohrlaufteilung liegen, welche in diesem Bereich gewählt werden mußte. Sie ermöglichte die augenscheinlich gute Verbreitung des Kunstharzes. Diese Vermutung könnte natürlich auch bedeuten, daß in den anderen Sperrenblöcken, wo die Aufnahmen deutlich geringer sind, der Bohrlaufabstand etwas zu groß gewählt wurde.

Bei der Auswertung von 60 Kontrollbohrungen mittels Fernsehsonde und Kernaufnahme ist neben den üblichen Parametern wie Rißstärke, Öffnungsweite, Injektionsmaterial etc. auch eine qualitative Abschätzung des Injektionszustandes vorgenommen worden. Hierbei werden folgende Klassen unterschieden:

- Klasse I: Riß ausgezeichnet, satt injiziert
- Klasse II: Riß gut injiziert, stellenweise leicht klaffend
- Klasse III: Riß größtenteils mit Injektionsgut verfüllt, jedoch deutlich klaffend
- Klasse IV: Riß größtenteils klaffend
- Klasse V: kein Injektionsgut vorhanden

In der folgenden Abbildung (4.2) ist eine prozentuelle Abschätzung der Injektionsqualität für die Bereich P und Q dargestellt. In diesem Zusammenhang sei nochmals erwähnt, daß pro Bohrloch bis zu vier Einzelstrukturen ein und derselben Rißgruppe aufgeschlossen wurden.

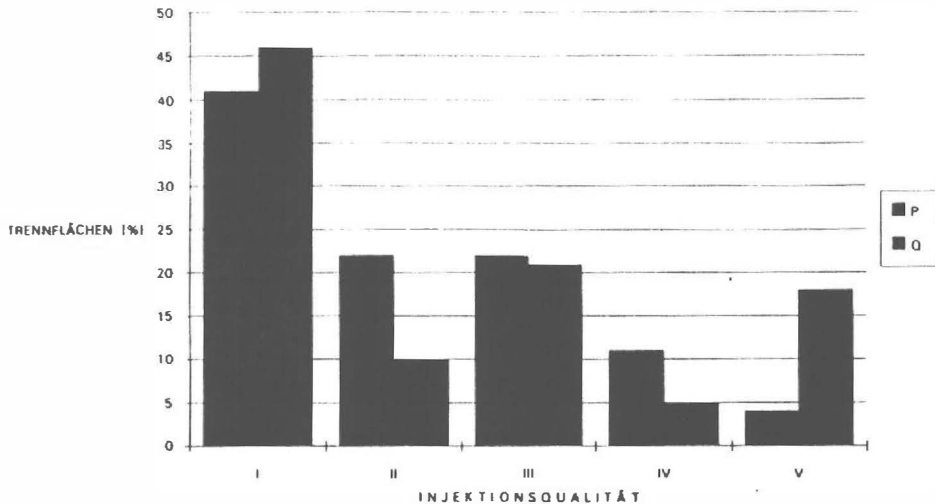


Abb.4:2: Injektionsqualität in den Bereichen P und Q

Es zeigt sich, daß sowohl in der Rißgruppe P als auch in der Rißgruppe Q über 40 % aller erfaßten Trennflächen ausgezeichnet injiziert sind. Während im Injektionsbereich P eine kontinuierliche Abnahme zur Qualitätsklasse V ersichtlich ist, wurden im Bereich Q 18 % aller Trennflächen nicht vom Injektionsgut erfaßt. Die Durchschnittsbewertung beträgt in P 2,1; in Q liegt sie mit 2,4 qualitätsmäßig knapp darunter.

Treten pro Passe mehrere Strukturen auf, so zeigte sich, daß meist nur ein Riß vom Injektionsgut vollständig erfaßt wird. Die benachbarten Risse weisen zum Großteil einen schlechteren Verfüllungsgrad auf. Es konnten hier folgende Werte ermittelt werden: Ist in einer Passe ein Einzelriß vorhanden, so liegt die durchschnittliche Qualitätsklasse bei 1,7. Bei zwei Rissen sinkt die Qualität auf 2,1 und setzt sich die Rißgruppe aus vier Trennflächen zusammen, so verringert sich die Injektionsgüte auf 2,9.

Diese Beobachtung deutet darauf hin, daß sich die Injektionsfront stets entlang des Weges des geringsten Widerstandes fortbewegt. Liegt eine teilweise geschlossene Struktur neben einem offenen Riß, so wird diese entweder durch die Spaltkraft des Injektionsmittels im Nachbarriß zusammengedrückt oder erst dann vom Verpreßgut erfaßt, wenn der

Widerstand im offenen Riß größer wird als jene Kraft, durch welche ein Öffnen der schmälere Struktur erreicht wird.

Diesem Umstand dürfte es auch zuzuschreiben sein, daß im Bereich Q, wo bekanntlich mehrere parallele Risse den Sperrenkörper durchtrennen, eine etwas schlechtere Injektionsqualität erreicht wurde als in der Rißgruppe P

Als weitere Begründungen, daß nicht alle Trennflächen vom Injektionsgut perfekt verschlossen wurden, mögen folgende Erklärungen gelten:

Ein Großteil aller Risse zeigt deutliche Spuren vergangener Injektionskampagnen. Diese Füllungen können ein großflächiges Ausbreiten des Kunstharzes verhindern. Es wurde die interessante Beobachtung gemacht, daß mit Polyurethan vorbehandelte Risse nur sehr selten von der Rodurinjektion erfaßt werden konnten.

Ein weiteres Hemmnis für ein ungehindertes Vordringen der Injektionsfront liegt in der Tatsache, daß die Stauspiegellhöhe während der Injektion nur zwischen 1810 m und 1840 m ü.A. lag, das heißt in jenem Bereich, bei welchem die Rißöffnungsweiten noch relativ gering sind.

Die Profilabstände für die Injektionsbohrlöcher waren mit 3 m generell etwas zu groß. Diese Erkenntnis ergibt sich durch die Beobachtung, daß die auf Lücke abgeteufte Kontrollbohrungen bereits unterschiedliche Verfüllungsqualitäten aufweisen. Im Gegensatz dazu steigen die Qualitäten mit zunehmender Nähe an das Injektionsprofil.

Daß die Verformungsmessungen im Sperrenkörper so gut wie keine Reaktionen auf die Injektionen zeigten, ist gesagt, daß die Energiekriterien und hier insbesondere der maximale Ruhedruck von 30 bar offensichtlich zu vorsichtig gewählt wurden.

Für die Sekundärinjektion im Jahr 1992 ist unter Berücksichtigung dieser Überlegung abzuleiten, daß die Kunstharzverpressungen bei etwas größeren Rißöffnungsweiten, das heißt bei höheren Staulagen,

durchgeführt werden sollten. Bezüglich der räumlichen Anordnung der Bohrlöcher sind die Abstände im allgemeinen etwas zu verringern. Mit dieser Vorgangsweise sowie mit einer Erhöhung des Injektionsdruckes sollte es möglich sein, einen befriedigenden Verfüllungsgrad in den Rissen zu erreichen.

5. ABSCHLIEßENDE BEMERKUNGEN

Im Zuge des Sanierungsprojektes für die Kölnbreinsperre sind bis jetzt rund 90 t Zement und 65 t Kunstharz in einer Gesamtbohrlochlänge von 40.000 m verpreßt worden. Weiters wurden während der letzten drei Bausaisonen folgende Leistungen erbracht: Im Sommer 1989 wurden der Felsaushub für die Gründung des künftigen Stützgewölbes durchgeführt und die Kiesaufbereitung sowie die Betonmischanlage installiert. Vor Beginn des Wintereinbruches waren bereits 65.000 m³ Massenbeton eingebracht. Im Jahre 1990 galt das Hauptaugenmerk den Betonierarbeiten. Innerhalb eines halben Jahres gelang es, rund 373.000 m³ Beton zu verarbeiten.

Im Sommer 1991 wurden der restliche Beton eingebracht und die Kraftübertragungselemente der ersten sieben Lagerreihen eingebaut. Nach dem ersten Durchgang der Blockfugeninjektionen sowie der Konsolidierung lokaler Felsbereiche unter dem Stützkörper konnte dieser noch vor Wintereinbruch gänzlich eingeschüttet werden.

Im November 1991 erreichte der Stauseespiegel mit 1880 m ü.A., das heißt 22 m unter Vollstau, den für diese Saison höchsten genehmigten Wert. Während der gesamten Aufstauphase konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Werten an den Kraftübertragungselementen und dem Rechenmodell festgestellt werden (Abbildung 5.1). Die Hysterese, welche sich bei der Darstellung der Gesamtlagerkraft gegen die Stauhöhe ergibt, ist zum Großteil auf den Temperatureinfluß aber auch auf zeitverzögerte, elastische Verformungen zurückzuführen.

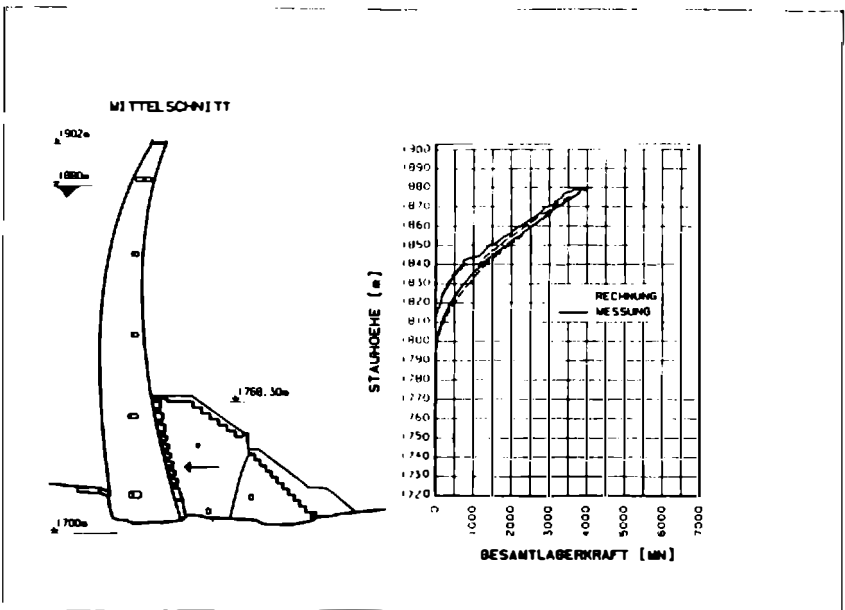


Abb.5.1: Abstützkräfte während der Stauperiode 1991/92

In der Bausaison 1992 sollen an den obersten zwei Lagerreihen die Neoprenelemente eingebaut werden. An Injektionsarbeiten ist, wie bereits erwähnt, die Sekundärinjektion der Risse im Beton sowie der Anschluß des Dichtschirmes an den Sperrkörper vorgesehen. Daneben werden lokale Nachinjektionen durchgeführt.

Nach einem weiteren Zwischenaufstau ist der Vollstau frühestens für die Wintermonate 1993/94 vorgesehen.

QUELLENVERZEICHNIS:

- Clar, E., Demmer, W. "Die Geologie der Kraftwerksgruppe Malta", Österr. Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft, 32. Jg., 1979.
- Demmer, W., Ludescher, H.: "Measures taken to reduce uplift and seepage at Kölnbrein dam", ICOLD-Kongreß Lausanne, 1985.
- Hollub, B., Marschallinger, R.. "Die Zentralgneise im Hochalm-Ankogel-Massiv (östliches Tauernfenster).
Teil I: Petrographische Gliederung und Intrusionsfolge",
Mitteilungen der Österr. Geologischen Gesellschaft, 81. Band,
1989
- International Society for Rock Mechanics, Arbeitsgruppe Felsinjektionen:
"Zwischenbericht", 1992.
- Lombardi, G.. "Injection des massifs rocheux", Mitteilungen der Schweizer Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Biel, 1987
- Lombardi, G.. "KW Malta - Sanierung der Kölnbreinsperre. Grundsätzliche Überlegungen zur Injektion der Sperre und des Untergrundes", Gutachten, 1988.
- Lombardi, G.. "KW Malta Sanierung der Kölnbreinsperre Injektionskampagne 1990 Ausführungsbestimmungen", Gutachten, 1990
- Ludescher, H.. "Die Sanierung der Kölnbreinsperre", Österr. Ingenieur- und Architektenzeitschrift, 135. Jg., 1990.
- Ludescher, H.. "Felsmechanische Untersuchungen anlässlich der Verstärkung der Kölnbreinsperre" Felsbau, Mai 1991
- Oberhuber, P.. "Remedial Works for the Kölnbrein Dam: Design and Analysis", ICOLD-Kongreß Wien, 1991.
- Österr. Draukraftwerke AG: "Sanierung der Kölnbreinsperre. Projektierung und Ausführung.", Eigenverlag, 1991.

WEITERFÜHRENDE LITERATUR:

Brue, D.A. "Major dam rehabilitation by special geotechnical construction techniques; a state-of-practice review", The Institute for Engeneering Research, Foundation Kollbrunner Rodio, Nummer 5, Zürich, 1991.

Feder G.: "Ansprechdruckversuche an Injiziermedien beim Übergang vom Bohrloch zum Riß", Unveröffentlichter Bericht, Montanuniversität Leoben, Institut Prof. Golser, Leoben, 1990.

Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers: "Grouting, soil improvement and geosynthetics", Kongreß New Orleans, 1992.

Kiss, S.: "Darstellung transienter Druckentwicklungen nach Injektionsunterbrechungen und Interpretation nach Grundsätzen des "Well testing", Diplomarbeit an der Montanuniversität Leoben, Institut Prof. Heinemann, Leoben, 1992.

Nonveiller, E.. "Grouting - Theory and Practice", Elsevier, 1989.

Stadler, G.: "Transient pressure analysis of Rodur epoxy grouting in concrete and rock at Kölnbrein dam, Austria", Dissertation an der Montanuniversität Leoben, Institut Prof. Heinemann, Salzburg, 1992.

Widmann, R. et al.. "Injektionen in Fels und Beton", Felsbau, August 1991.

**Autor: Mag. G. Valentin
Österr. Draukraftwerke AG
Kohldorfer Straße 98
A-9010 Klagenfurt**