

# AlpTransit und Sicherheit der Talsperren : Erkenntnisse im Lötschberggebiet

Autor(en): **Kobelt, Alfred / Pougatsch, Henri**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **96 (2004)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939596>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# AlpTransit und Sicherheit der Talsperren

## Erkenntnisse im Lötschberggebiet

### Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- Das Kraftwerk Lötschen
- Projekt AlpTransit Lötschberg – Bau des Zugangstollens Ferden
- Voraussage des Verhaltens des Bergmassivs
- Untersuchungen zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Staumauer Ferden
- Überwachung der Staumauer Ferden
- Lehre aus geologischer Sicht

### Einleitung

■ Alfred Kobelt, Henri Pougatsch

Die im Herbst 1978 an der Staumauer Zeuzier durchgeführten Lotmessungen haben ungewöhnliche Deformationen aufgezeigt. Durch diese Deformationen hat die Staumauer derart starke Beschädigungen erlitten, dass ein normaler Betrieb während längerer Zeit nicht mehr möglich war. Gründliche Abklärungen ergaben, dass die Ursache der festgestellten Mauerverformungen eine weiträumige, muldenförmige Geländesetzung von 2 bis 3 km Ausdehnung war, hervorgerufen durch den Wasserertrag im Gebirge infolge des Ausbruchs eines Sondierstollens für den projektierten Rawiltunnel.

Das gleiche Phänomen wurde mit einem Präzisionsnivellement entlang der Gotthardpassstrasse festgestellt, wo Setzungen bis zu 12 cm gemessen wurden. Durch dieses Gebiet führen bekanntlich zwei grosse unterirdische Bauwerke, der Gotthard-Eisenbahn- und der Gotthard-Strassentunnel.

Im Lichte der Erkenntnisse aus dem Fall Zeuzier hat das Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) im Rahmen der beiden AlpTransit-Projekte darauf bestanden, dass bestimmte Vorkehrungen zu treffen seien. Es sollte vermieden werden, dass sich der Fall Zeuzier bei den in der Nähe der Tunnelachsen liegenden Stauanlagen Santa Maria, Nalps und Curnera (beim Gotthard-Basistunnel) und Ferden (beim Lötschberg-Basistunnel) wiederholt. In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV) wurde eine Übereinkunft erzielt, in welcher festgehalten ist, dass die Stauanlagen durch den Tunnelvortrieb in keiner Weise beeinträchtigt werden dürfen, sei es in Bezug auf die Sicherheit

der Staumauern oder in Bezug auf allfällige Wasserverluste aus den Speicherseen. Ferner müsse ein Überwachungssystem eingerichtet werden, um so rasch wie möglich eine sich abzeichnende Geländeformung oder eine allfällige anomale Verformung der Staumauern, der Widerlager oder ihrer Umgebung feststellen zu können. Dies erfordert Beobachtungen am Standort der Staumauern, im umgebenden Gelände wie auch im Tunnel.

Zudem sind die Bundesorgane über eingekommen, eine fachübergreifende Expertengruppe zu bilden. Seitens des BWG sind die Herren Dr. Giovanni Lombardi, Bauingenieur, Dr. Toni R. Schneider, Geologe, und Kurt Egger, Vermessungsspezialist, verpflichtet worden. Im Rahmen ihres Auftrags hatten diese Experten das Verhalten des Felsuntergrundes sowie die Empfindlichkeit der Staumauern und deren Widerlager bezüglich Verformungen abzuklären. Ferner war eine Erweiterung der Talsperrenüberwachung zu realisieren, einerseits für die Beweissicherung und andererseits als Frühwarnsystem («Alarmglocke») während der Bauausführung. Die Vorgabe des BWG dazu war die Entwicklung eines wirksamen und wirtschaftlichen Messsystems unter Berücksichtigung der Lehren aus Zeuzier.

Der Ausbruch des von Goppenstein zum Zwischenangriff Ferden führenden Fensterstollens sowie der anschliessende Vortrieb der beiden Röhren des Basistunnels von diesem Zwischenangriff und von den Südportalen waren die ersten AlpTransit-Baustellen, die eine Stauanlage tangierten, nämlich die im Lötschentale liegende Stauanlage Ferden. Inzwischen ist der Fensterstollen ausgebrochen, und die beiden Röhren des Basistunnels haben den kritischen Bereich der Stauanlage durchörtert (Bild 11). Somit können erste Erkenntnisse über die Beeinflussung der Stauanlage durch den Untertagebau gewonnen werden.

Um einen möglichst umfassenden, multidisziplinären Einblick in die Problematik zu geben, schien es interessant, darüber hinaus auch noch die Stauanlage Ferden, deren Überwachung und die im Rahmen der Realisierung der Lötschbergachse vorgesehenen Arbeiten hier vorzustellen sowie über die Untersuchungen der Expertengruppe zu berichten. Es werden dabei die Abklärungen betreffend der Voraussage des Gebirgsverhaltens und der Empfindlichkeit der betroffenen Staumauer auf Geländedeformationen dar-

gelegt. Ferner werden das Konzept des erweiterten geodätischen Überwachungssystems erläutert und die erhaltenen Messresultate präsentiert und beurteilt. Die Veröffentlichung dieser Beiträge ist das Ergebnis einer Zusammenarbeit aller Beteiligten. Wir hoffen, die Leser und Leserinnen können sich damit ein Bild über die für die Sicherheit einer Stauanlage getroffenen Vorkehrungen machen, welche sich bei der Realisierung eines in ihrer Nähe befindlichen Tunnelprojekts ergeben.

### Das Kraftwerk Lötschen

■ Hermann Salzgeber

Das im Jahre 1975 in Betrieb gesetzte Kraftwerk Lötschen nützt die Gewässer der Lonza zwischen den Gemeinden Ferden und Gampel/Steg aus. Von der auf Kote 1311,00 m ü.M. liegenden Stauhaltung wird das Wasser durch einen 6,85 km langen Druckstollen und einen 1,31 km langen Druckschacht geführt. Mit einem Bruttogefälle von 664 m und einer Ausbauwassermenge von 21,2 m<sup>3</sup>/s werden in der Zentrale Steg zwei vertikalachsige Pelton-turbinen mit einer Gesamtleistung von 114 MW gespeist.

Die Jahresproduktion der Anlage beträgt im Mittel ca. 324 GWh, wovon aber nur etwa 15% auf die Winterperiode entfallen.

Das Einzugsgebiet der Lonza erreicht bei der Wasserfassung eine Fläche von 139,2 km<sup>2</sup>, wovon etwa 25% vergletschert sind.

### Stauanlage Ferden

Die Lonza wird bei Goltschried unterhalb Ferden durch eine Bogenstaumauer von 67 m Höhe und mit einer Kronenlänge von 112,50 m auf Kote 1311,0 m ü.M. aufgestaut. Dadurch entsteht ein künstlicher See von etwa 1300 m Länge mit einem nutzbaren Inhalt von 1,72 Mio. m<sup>3</sup>.

Die Mauerkrone auf Kote 1314,0 m ü.M. liegt etwa 30 m unter der Lötschentalestrasse. Die Staumauer mit dem Ausgleichsbecken ist daher von der Talstrasse aus kaum sichtbar.

Die in Bild 2 dargestellte Bogenmauer weist wegen der am rechten Ufer herrschenden besonderen Fundationsbedingungen ein künstliches Widerlager auf. Zu bemerken sind noch die im Mauerkörper vorhandenen Öffnungen der beiden Grundablässe, welche direkt unter dem Fassungsbauwerk auf der







Bild 1. Bogenstaumauer mit Ausgleichsbecken Ferden.

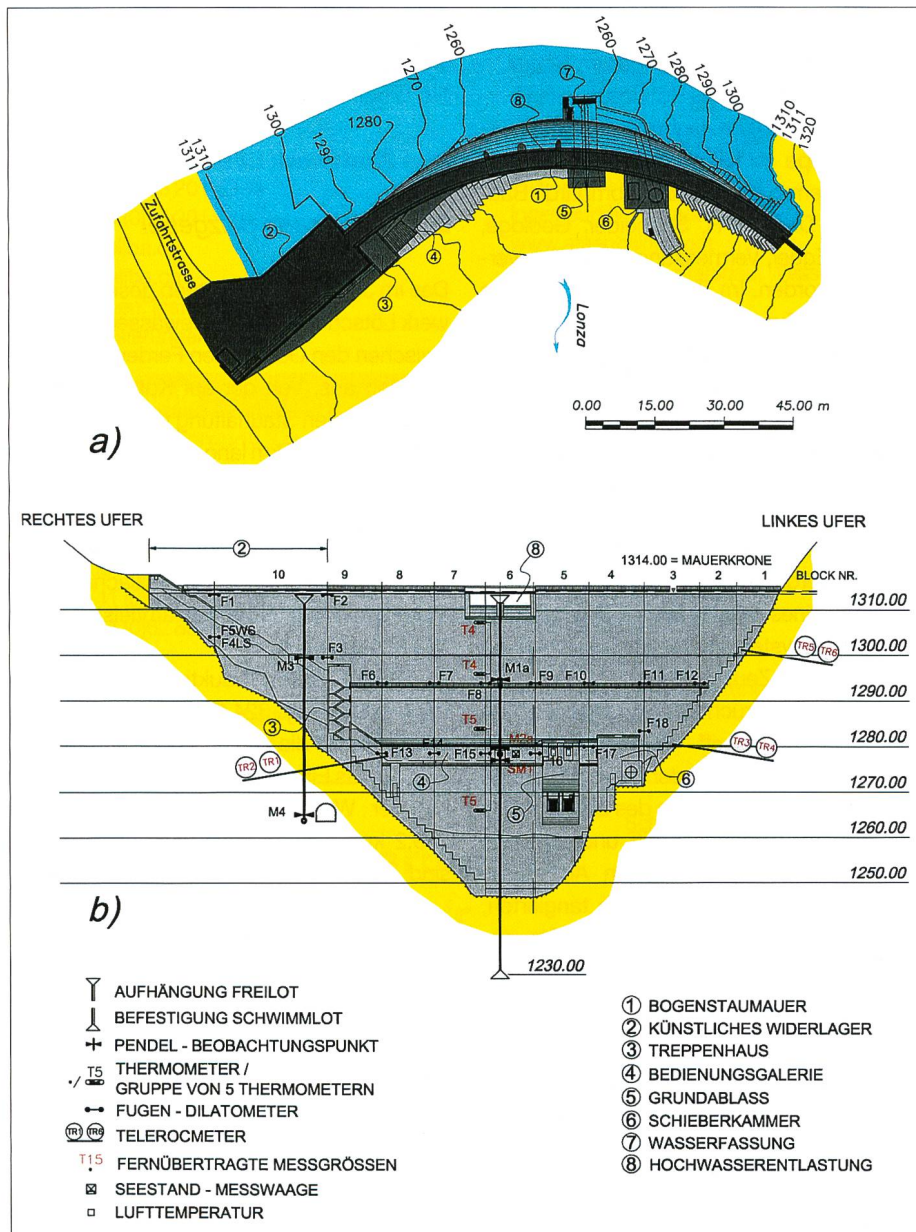


Bild 2. Situation (a) und luftseitige Abwicklung (b) der Bogenstaumauer Ferden mit Messeinrichtung.

Höhe des ursprünglichen Flussbettes angeordnet sind. Sie können bei Vollstau und totaler Öffnung je  $110 \text{ m}^3/\text{s}$  ableiten. Die 1998 umgebaute Hochwasserentlastung auf der Mauerkrone vermag zudem  $163 \text{ m}^3/\text{s}$  abzuleiten. Im Vergleich dazu betragen ein  $HQ_{100} = 119 \text{ m}^3/\text{s}$  und ein  $HQ_{1000} = 175 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Der Geschiebe- und Sedimenteintrag in den Stausee hat in den letzten Jahren zugenommen, so beträgt heute seine Jahresfracht  $40\,000\text{--}50\,000 \text{ m}^3$  gegenüber ca.  $25\,000 \text{ m}^3$  in den ersten Betriebsjahren. Mit Seegrundspülungen alle zwei Jahre will man die Verlandung verhindern. Beim Hochwas-

serereignis vom Oktober 2000 gelangten ca.  $120\,000 \text{ m}^3$  Geschiebe und Feststoffe in das Ausgleichsbecken. Durch diesen sehr hohen Geschiebe- und Sedimenteintrag war schon im Folgejahr eine weitere Grundspülung nötig.

### Druckstollen und Druckschacht

Der  $6850 \text{ m}$  lange Druckstollen durchfährt in der linken Talflanke auf etwa  $6000 \text{ m}$  Gneise; die letzten  $800 \text{ m}$  im Gebiet vor Hohtenn liegen im Granit. Das Gefälle beträgt  $0,2\text{--}0,6\%$  und der Durchmesser variiert zwischen  $2,80 \text{ m}$  und  $3,60 \text{ m}$ . Der gefräste Druckstollen konnte teilweise unverkleidet belassen werden.

Der  $1310 \text{ m}$  lange Druckschacht befindet sich in granitischem Gebirge. Er ist über die gesamte Länge mit einer Stahlpanzerung ausgekleidet. Der Innendurchmesser des Druckschachtes beträgt  $2,10 \text{ m}$ .

### Überwachung der Bogenstaumauer

Die zur Überwachung der Bogenstaumauer installierten Messinstrumente sind in Bild 2 dargestellt. Ein Vertikalschnitt durch den mit der Hochwasserentlastung versehenen zentralen Block ist in Bild 3 a dargestellt. Dieser ist mit einem Freilot und einem Schwimmot sowie gesamthaft  $18$  Thermometern ausgerüstet. Der Block Nr. 5 mit den Öffnungen beider Grundablässe und der darüber liegenden Bedienungskammer ist in Bild 3 b dargestellt. Neben den monatlichen Kontrollmessungen vor Ort, die seit dem Bau der Sperre durchgeführt werden, wurde im Frühjahr 1997 ein automatisches Messsystem eingeführt. In einer Ablesefrequenz von  $6$  Stunden werden folgende Messgrößen automatisch erfasst:

- Seestand
- 2 Pendel im Hauptschnitt radial/ tangential
- 6 Telerockmeter
- 18 Betontemperaturen
- 1 Lufttemperatur

Zudem werden die beiden Pendel in der Zentralen Leitstelle der EnAlpin AG fernüberwacht.

Die automatisch erfassten Messgrößen werden in einem Data-Logger gespeichert und ein Mal wöchentlich über Modem fernabgefragt.

Mit der für die Talsperre installierten Überwachungssoftware MIC ist es möglich, Bewertungen unmittelbar durchzuführen. Anhand des gemessenen Wasserstandes sowie der Temperaturverteilung im Mauerkörper berechnet das Überwachungsprogramm den Einfluss beider Faktoren auf die Verformung der Mauer. Dies geschieht, indem die gemessene Verformung so korrigiert wird, dass sie sich auf einen fixen Referenzbelastungsfall der Mauer bezieht. Im Falle der Bogenstaumauer Ferden wurde als Referenzbelastungs-



fall ein Seestand von 1300 m ü.M. und eine Betontemperatur von 0°C gewählt. Die so ermittelte Vergleichsverformung sollte rein theoretisch im Laufe der Zeit konstant bleiben. Wegen nicht exakter Übereinstimmung des mathematischen Modells mit der Realität sind Abweichungen nicht zu vermeiden. Zur Interpretation des Mauerverhaltens müssen daher Toleranzgrenzen beigezogen werden. In Bild 4 sehen wir die Vergleichsverformung für den Punkt P3 in radialer Richtung. Im Oktober 1998 wurde die Hochwasserentlastung auf der Staumauerkrone umgebaut und die Lot-aufhängung um 3 m tiefer gelegt. Die Veränderung der Vergleichsverformung ist feststellbar.

Neben diesem Überwachungsprogramm finden auch noch geodätische Deformationsmessungen statt.

### Projekt AlpTransit Lötschberg Bau des Fensterstollens Ferden

■ Markus Aeschbach,  
Hans-Jakob Ziegler

#### Generelles Projekt

Der Lötschberg-Basistunnel stellt neben dem Gotthard-Basistunnel eine der beiden Hauptachsen zur Durchquerung der Schweizer Alpen im Rahmen der Neuen Alpen-Transversalen (Neat) dar und verbindet den Kanton Bern mit dem Kanton Wallis. Zwischen dem Nordportal im Kandertal bei Frutigen und dem Südportal im Rhonetal bei Raron liegt eine Strecke von rund 35 km, die mit Hilfe von zwei hochmodernen, richtungsgetrennten Einspurröhren mit zahlreichen Querschlägen und mehreren Nothaltestellen überwunden wird.

Der Lötschberg-Basistunnel ist bautechnisch in zehn Abschnitte unterteilt, welche jeweils maximal rund 10 km lang sind. Ausgebrochen wird der Tunnel von Süden her von den Portalen in Raron, Steg, dem Fensterstollen Ferden und im Norden vom Fensterstollen Mitholz und vom Portal Frutigen aus.

Der eigentliche Vortrieb des Rohbautunnels wird voraussichtlich im Frühjahr 2005 abgeschlossen sein. Der geregelte Personen- und Güterverkehr ist für 2007 geplant.

#### Fensterstollen Ferden

Als Teil des Gesamtprojektes Lötschberg-Basistunnel dienen die Bauwerke des Fensterstollens Ferden der Vorbereitung des eigentlichen Zwischenangriffs für den Vortrieb der Basistunnels in Richtung Frutigen und in Richtung Steg/Raron. Es kann damit eine Verkürzung der Bauzeit, eine Vorerkundung des Gebirges und eine Optimierung der Position

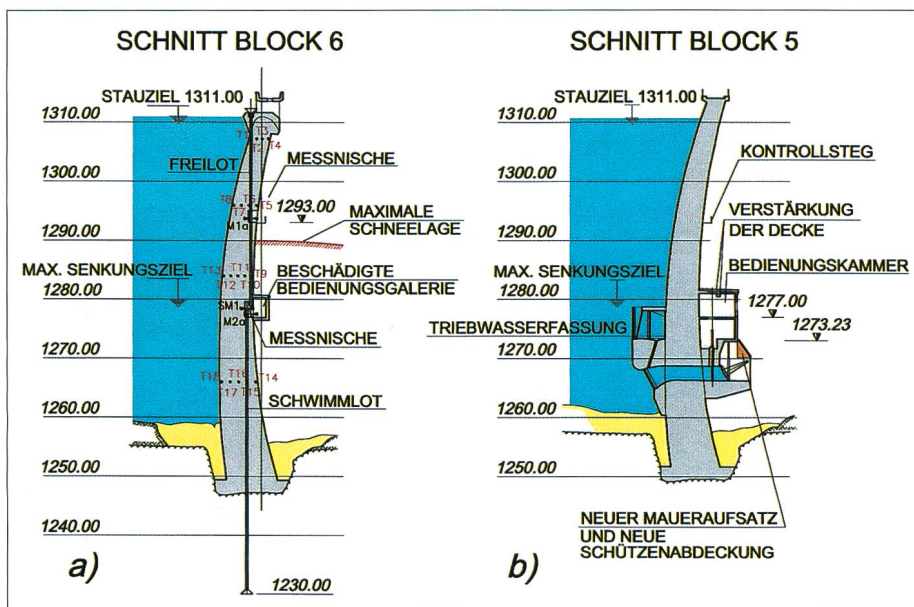


Bild 3. Vertikalschnitte der Bogenmauer: a) Zentraler Block mit vorhandenen Messeinrichtungen und b) Block Nr. 5 mit Grundablassöffnungen.

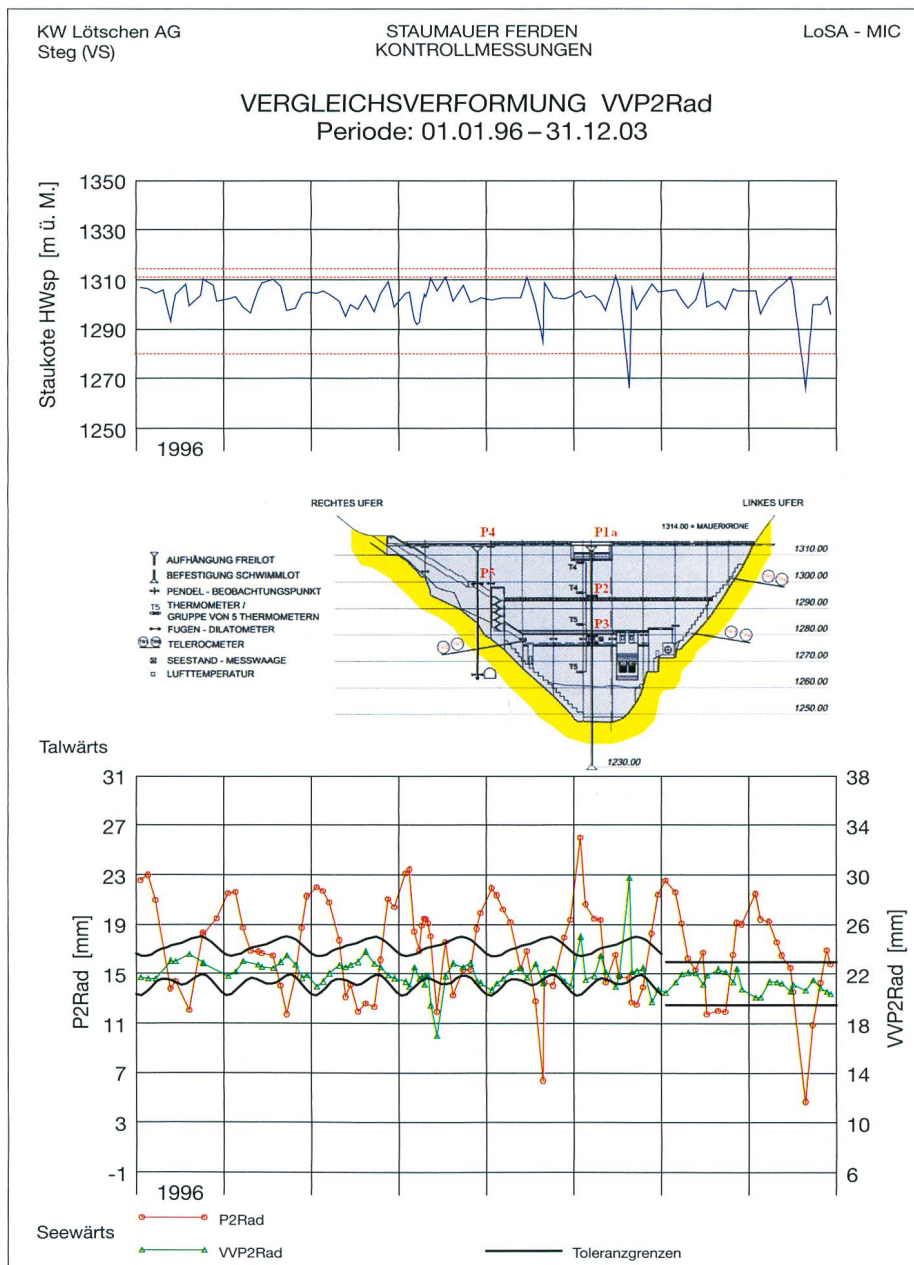
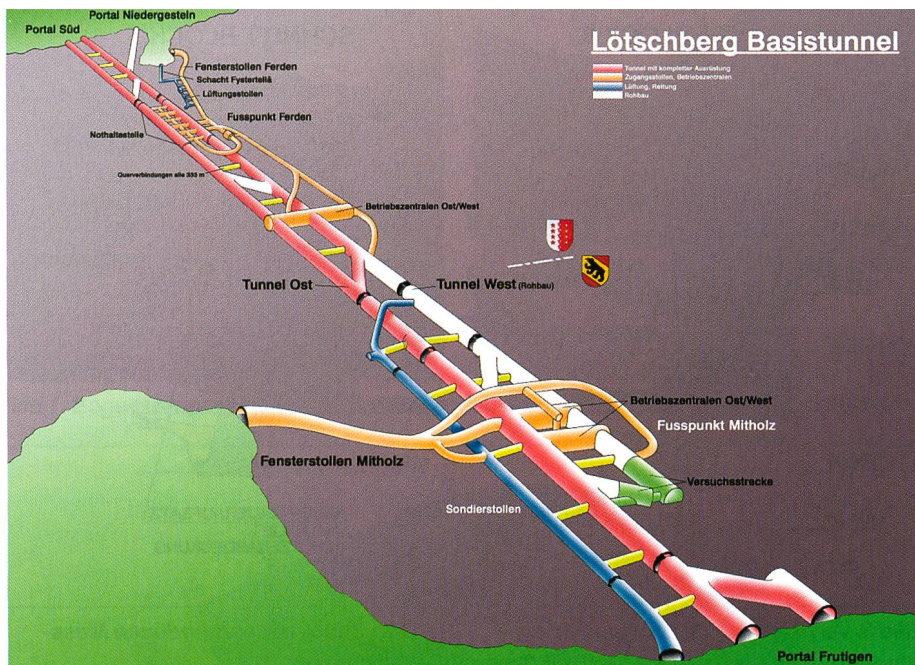


Bild 4. Vergleichsverformungen für das Pendel im Punkt P3.





**Bild 5. Dreidimensionale Darstellung des Lötschberg-Basistunnels (Quelle: BLS AlpTransit AG).**

der Spurwechselstellen mit Nothaltestelle im Basistunnel erreicht werden. Die Materialschuttung sowie die Baulüftung der Basistunnel erfolgen über die Bauwerke des Fensterstollens Ferden.

In der Betriebsphase dient der Stollen als Zugang zum Basistunnel für Unterhalt und Notfälle.

Das Bauwerk «Fensterstollen Ferden» umfasst folgende zwei Hauptelemente:

#### a) Fensterstollen Ferden

Auf dem Installationsplatz Schlegmatte, welcher sich südlich vom Bahnhof Goppenstein am rechten Ufer der Lonza und gegenüber vom Autoverlad der BLS Lötschbergbahn befindet, liegt das Portal Ferden.

Ab dem Portal Ferden taucht der Fensterstollen mit einem maximalen Gefälle von 12,5% auf einer Länge von ca. 4 km auf das Niveau des Basistunnels ab. Nach der Durchörterung einer etwa 118 m langen

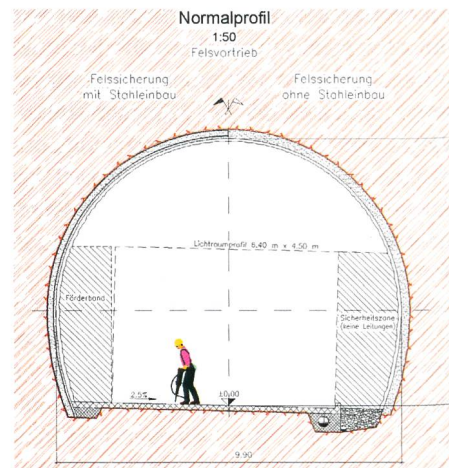
Lockergesteinszone im Rohrschirmverfahren wurde der Fensterstollen mit einem Ausbruchsquerschnitt von ca. 70 m<sup>2</sup> im Sprengvortrieb mit vollautomatischem Bohrrjumbo und Einsatz von Emulsions Sprengstoff ausgebrochen.

Nach Beginn der ersten Sprengung im Dezember 1998 konnte der Fensterstollen Ferden im September 2000 mit etwa einem Monat Vorsprung auf das Bauprogramm beendet werden.

Am Fusspunkt des Fensterstollens Ferden wurden verschiedene Kavernen für die Logistik erstellt, welche gleichzeitig als Knotenpunkt den Zugang zur Nothaltestelle Ferden, zur Zuluftzentrale Ferden und zur Betriebszentrale sicherstellen.

#### b) Lüftungsschacht Fystertellä, Lüftungsgalerie und Ansaugstollen

Für die Baulüftung und Kühlung während der Basistunnelvortriebe, die Sicherstellung der



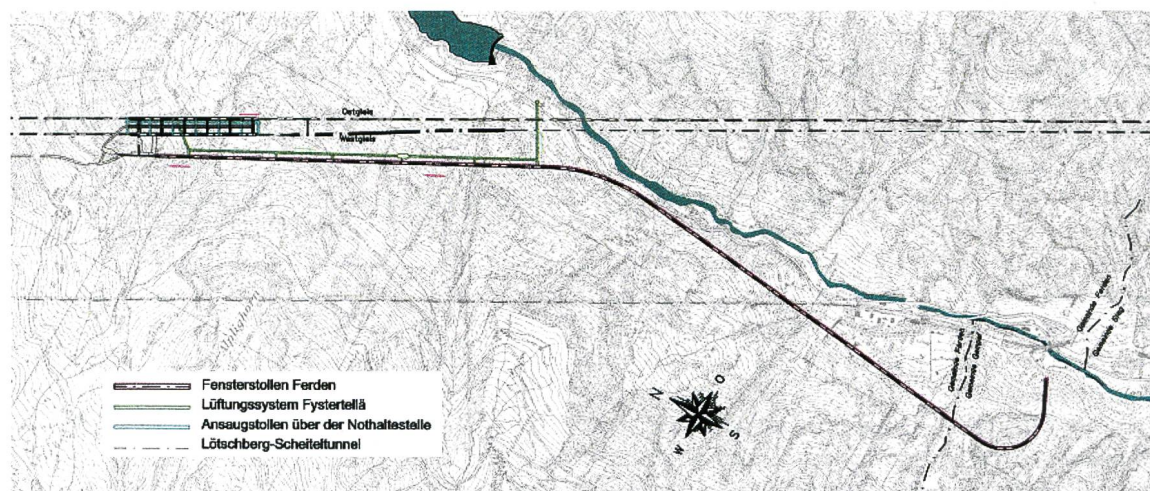
**Bild 7. Normalprofil Fensterstollen Ferden (Quelle: IGWS).**



**Bild 8. Bohrwagen beim Herstellen der Sprengbohrlöcher (Quelle: IGWS).**

Lüftung während der Betriebsphase und die Versorgung der Nothaltestelle Ferden wird zusätzlich zum Fensterstollen Ferden ein separates Lüftungssystem erstellt.

Das zentrale Element dieses Lüftungssystems bildet der Vertikalschacht Fystertellä, dessen Schachtkopf ca. 250 m südlich der Staumauer Ferden zu liegen kommt. Der Lüftungsschacht Fystertellä mit einer Tiefe von ca. 350 m wurde im Raise-Drill-Verfahren mit einem Durchmesser von ca. 4,40 m erstellt. Infolge eines Verlustes des Aufweitungskopfes mussten die obersten ca. 150 m im Sprengvortrieb auf ca. 5 m aufgeweitet werden. Der Lüftungsschacht mündet in die



**Bild 6. Übersicht Raum Goppenstein (Quelle: IGWS).**



Lüftungsgalerie, welche einen Querschnitt von ca. 22 m<sup>2</sup> aufweist und parallel zum Fensterstollen bis zum Fusspunkt des Fensterstollens Ferden führt. Kurz vor dem Fusspunkt schwingt sich die Lüftungsgalerie über den Basistunnel, wo mit den Ansaugstollen, welche sich ca. 7 m oberhalb der Basistunnel befinden, und mittels Ansaugtrompeten und steuerbaren Klappen die Brandgase der Nothaltestelle Ferden abgesaugt werden können. Für das Sicherstellen der notwendigen Strömungsverhältnisse wird in der Mitte der Lüftungsgalerie eine Abluftzentrale mit Lüftern installiert.

## Geologie

Der Fensterstollen Ferden verläuft im kristallinen Grundgebirge des Aar-Massivs. Er quert von Süden nach Norden die folgenden Gesteinseinheiten bzw. tektonischen Elemente (Längen entlang des Stollens gemessen):

- Quartäre Lockergesteine (ca. 114 m)
- Altkristallin inkl. Störungszone «Faldumbach» (2664 m)
- Karbon von Ferden (5 m)
- Altkristallin (535 m)
- Störungszone «Dornbach» (177 m, inkl. 92 m Gneis)
- Altkristallin (426 m)

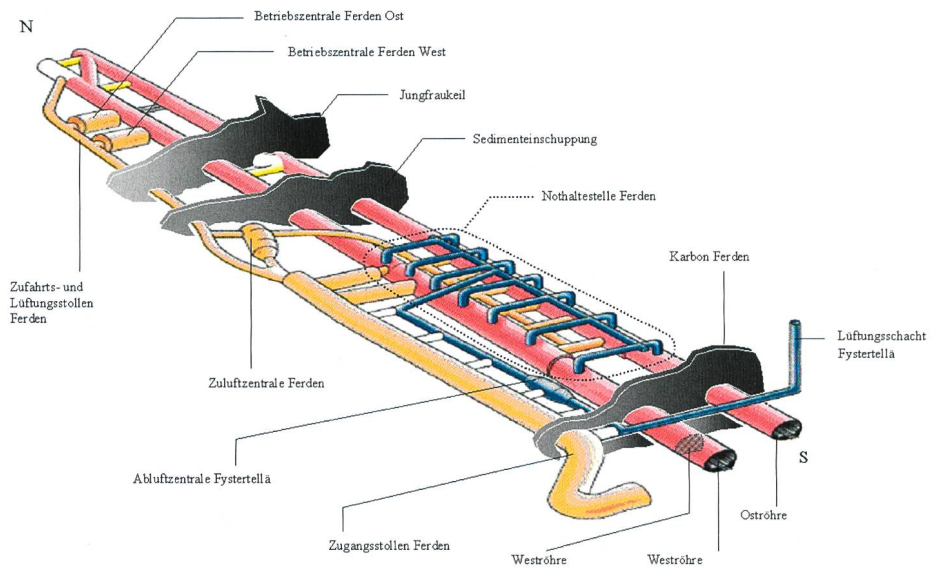
Das *Quartär* besteht aus Gehängeschutt und Moränenmaterial mit wechselndem Anteil an Steinen und Blöcken.

Im *Altkristallin* dominieren schiefrige bis massige Chlorit-, Chlorit-Sericit-, Sericit- und Biotit-Sericit-Gneise sowie entsprechende Schiefer. Stark untergeordnet wurden auch amphibolführende Gneise bis Amphibolite angetroffen. An Ganggesteinen traten Pegmatite und Aplite auf. Der ganze Altkristallinkomplex ist von mehreren Metamorphosen überprägt.

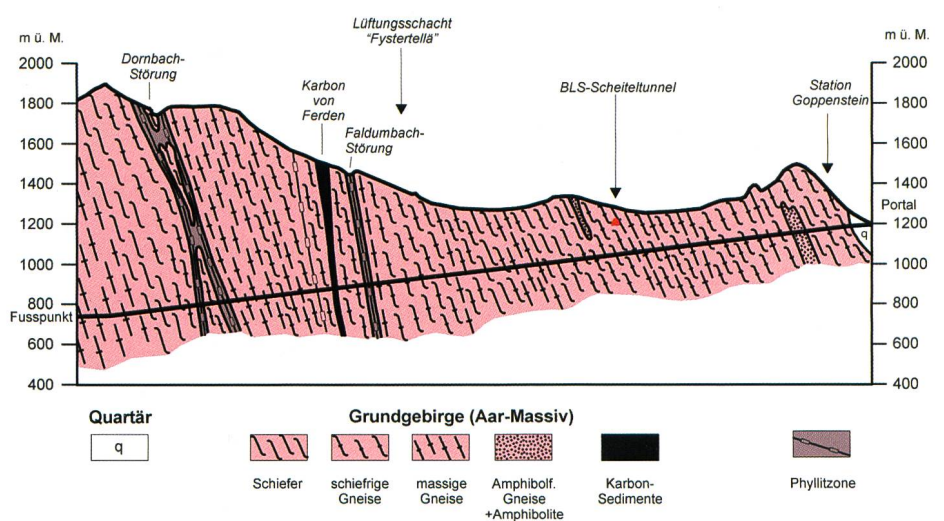
Die *Phyllitzzone* «Faldumbach», die auch den Fundationsbereich der Staumauer Ferden quert, war wenig prägnant ausgebildet. Sie quert den Stollen innerhalb einer rund 8 m mächtigen Schieferstrecke mit wenigen phyllitischen Zwischenlagen und konnte ohne Probleme im Volllausbruch durchfahren werden.

Die *Phyllitzzone* «Dornbach» besteht aus einem südlichen, ca. 50 m mächtigen und einem nördlichen, ca. 35 m messenden Störungsast, die hauptsächlich Phyllite, Kataklasite und Schiefer umfassen. Diese beiden stark tektonisierten Zonen sind durch rund 90 m schiefrigen, massigen Chlorit-Sericit-Gneis voneinander getrennt und wurden ohne grössere Schwierigkeiten im sog. «Microbenching-Verfahren» durchquert.

Das *Karbon von Ferden* besteht aus graphithaltigen Tonschiefern, Sandsteinen (Metagrauwacken bis Quarzite) sowie zwei



**Bild 9. Dreidimensionale Ansicht der Nothaltestelle Ferden (Quelle: BLS AlpTransit AG).**



**Bild 10. Geologisches Befundprofil des Fensterstollens Ferden (Quelle: Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel).**

anthrazitischen Kohleflözen. Die Mächtigkeit ist infolge der starken tektonischen Beanspruchung bereits über kurze Distanz starken Schwankungen unterworfen, und die Kontakte sind grob gewellt. Bei der Annäherung an den südlichen Kontakt ereignete sich ein Verbruch. Das Karbon wurde in der Folge im Schutz eines Schirmes aus Viborex-Ankern im Kalottenvortrieb durchörtert und mit Stahlbögen ausgebaut.

Der Lüftungsschacht «Fystertella» und der Querstollen zum Fensterstollen liegen innerhalb der altkristallinen Gneise und Schiefer wenig südlich der Phyllitzzone «Faldumbach».

Die Schieferungsflächen fallen im Altkristallin und in den beiden Phyllitzonen generell mit 65–80° und im Karbon mit 75–85° gegen SE ein.

## Wasseranfall und Wassermessungen

Die Lage der entlang des Fensterstollens eingerichteten Wassermessstellen ist in Bild 11

ersichtlich. Die Messstellen können zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

*Messstelle Portal (Messung von Q<sub>Total</sub>):* Das gesamte, im Fensterstollen, im Lüftungsschacht und im Querstollen anfallende Wasser wird heraufgepumpt und mittels einer magnetisch-induktiven Messeinrichtung beim Portal gemessen. Da im alternierenden Pumpbetrieb kurzfristig erhebliche Schwankungen zu verzeichnen sind, wird in der Regel über ein bis drei Tage hinweg gemittelt. Zudem wurden die Messungen mehrmals mittels Aufstauversuch in den Absatzbecken überprüft. Die Aufstauversuche ergaben, dass die magnetisch-induktiven Messwerte um rund 10% zu hoch sind und entsprechend korrigiert werden müssen.

*Messuhr Brauchwasser (Messung von Q<sub>Brauchwasser</sub>):* Das zum Betrieb der Bohrgeräte usw. dem Fensterstollen zugeleitete Brauchwasser wird mittels einer mechanischen Messuhr am Portal gemessen.



Messstelle bei Sm 420 (Messung von  $Q_{\text{Oberflächenwasser}}$ ): Mit dieser Messstelle werden sämtliche Wasserzutritte zwischen Portal und Sm 420 erfasst. In dieser Strecke ist eine ausgeprägte Talklüftung vorhanden. Beim Erreichen der Felsoberfläche wurde erstmals relativ viel Wasser angetroffen. Dieses wurde beim weiteren Vortrieb «mitgenommen», d.h. nach dem jeweiligen Anfahren neuer Wasser führender Klüfte versiegten die weiter zurückliegenden Zutritte weitgehend.

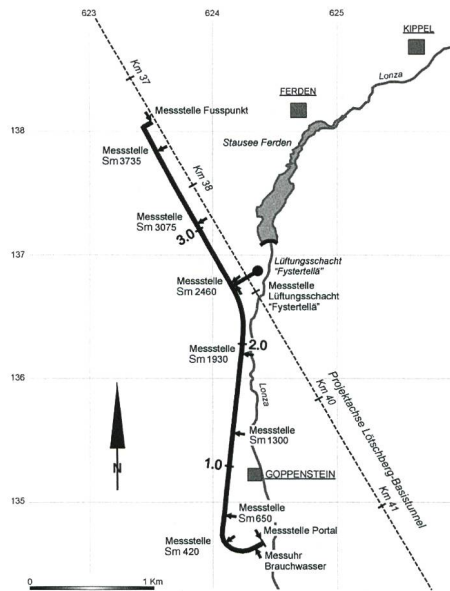
Bei diesem Wasser handelt es sich demnach nicht um «echtes» Bergwasser, sondern um Oberflächenwasser, das ursprünglich auf der Felsoberfläche abgeflossen ist und nun durch die talnahen, offenen Klüfte dem Stollen zufließt und abdrainiert wird. Dementsprechend ist die Wasserführung auch stark witterungsabhängig.

Übrige Messstellen zwischen Sm 420 – Fusspunkt (Messung von  $Q_{\text{Bergwasser}}$ ): Bei der Einmündung des Querstollens des Lüftungsschachtes «Fysterellä» und unmittelbar oberhalb der längs des Fensterstollens angelegten Pump- bzw. Absetzbecken Nr. 1–6 sowie am Fusspunkt bei Sm 3921 sind weitere Messstellen zur abschnittswise Erfassung des Bergwassers installiert worden.

Im September 2000, d.h. nach Fertigstellung des gesamten Fensters, flossen dem Stollen total 34 l/s ( $Q_{\text{Portal}} - Q_{\text{Brauchwasser}}$ ) zu. Dabei entfielen 26 l/s auf die Strecke Portal bis Sm 420 ( $Q_{\text{Oberflächenwasser}}$ ) und lediglich 8 l/s auf die restliche Strecke ( $Q_{\text{Bergwasser}}$ ). Der Zufluss aus dem Lüftungsschacht «Fysterellä» betrug dabei 2–2,5 l/s. Der bisher höchste Zufluss an «echtem» Bergwasser wurde im Juni 2000 mit 13 l/s gemessen, zu einem Zeitpunkt, als die erstmalige Entleerung noch nicht vollständig abgeschlossen war. Im Bereich ohne Talklüftung fliessen dem Stollen demnach weniger als 0,5 l/s pro 100 m Stollen zu.

### Ausblick

Die Bauarbeiten für das Hauptlos «Basis-tunnel Ferden–Bern» wurden im November 2000 vergeben. Der Vortrieb der beiden Basis-tunnelröhren in Richtung Süden befand sich etwa im Januar 2003 auf der Höhe der Staumauer Ferden. Der Durchstich mit dem TBM-Vortrieb von Raron erfolgte am 2. April 2003 und mit dem TBM-Vortrieb von Steg am 9. Dezember 2003. In Richtung Norden mussten eine Wasser führende Sedimenteinschuppung (mit Wasserdrücken von ca. 120 bar) und der Jungfrau keil durchörtert werden. Der wahrscheinliche Durchstich mit den ab Mitholz vorgetriebenen Tunnelröhren ist im Frühjahr 2005 zu erwarten.



**Bild 11. Lage der Wassermessstellen im Fensterstollen Ferden (Quelle: Geologen-gruppe Lötschberg-Basistunnel).**

### Voraussage des Verhaltens des Bergmassivs

■ Dr. Giovanni Lombardi,  
Dr. Toni R. Schneider,  
Walter Amberg

### Das F.E.S.-Modell

Das mechanische und hydraulische Verhalten einer geklüfteten Felsmasse ist recht komplex.

Seit langem war es üblich, eine solche Masse, die z.B. als Fundament einer Talsperre wirkt, als ideal elastischen Körper zu betrachten. Die Wahl für ein solches elastisches Modell ist im Allgemeinen nicht darauf zurückzuführen, dass es besonders geeignet wäre, das Verhalten des Gebirges wiederzugeben, sondern dass es dank der Linearität des funktionellen Zusammenhanges zwischen Spannungen und Verformungen besonders einfach zu handhaben ist und mit Leichtigkeit numerische Berechnungen erlaubt. In bestimmten Fällen kann ein solcher Ansatz zu vernünftigen und annehmbaren Ergebnissen führen. Dies ist aber nicht durchwegs gegeben.

Zum Ersten ist in der Regel die Felsmasse, die ursprünglich ein mechanisches Kontinuum bildete, im Laufe der geologischen Geschichte durch zahlreiche Diskontinuitäten (Risse, Fugen, Klüfte usw.) zu einem mechanischen Diskontinuum umgebildet worden, das zudem primäre und sekundäre Durchlässigkeiten aufweist und anisotropen Verformungsgesetzen folgt.

Zum Zweiten ist es ja bestens bekannt, dass bei kleinen Belastungen obgenannte Diskontinuitäten mindestens teil-

weise offen sind, dass sie sich mit steigenden Druckbelastungen progressiv schliessen und dass demzufolge die Felsmasse steifer wird, während ihre Durchlässigkeit abnimmt.

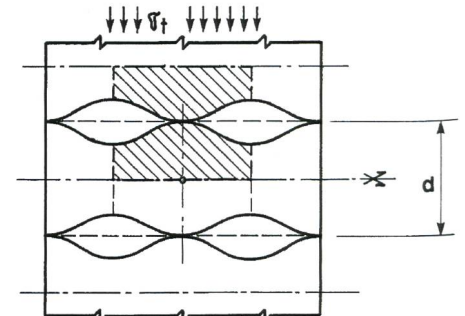
Das Verformungsgesetz der Felsmasse ist somit nicht mehr linear, selbst wenn die Felsmatrix sich noch im elastischen Bereich befindet, d.h. eine völlige Reversibilität aufweist.

Seit dem Fall Zeuzier ist man sich des möglicherweise bedeutenden Einflusses, den der Klufwasserdruck auf die Verformungen der Felsmasse ausübt, bewusst geworden.

In der Tat hat sich in jenem Falle eindeutig gezeigt, dass die Drainage des Gebirges, verursacht durch den Rawil-Sondierstollen, zu sehr bedeutenden Setzungen der Felsunterlage der Sperre geführt hatte.

Zur Erklärung und Beurteilung dieses bis dahin von der Fachwelt in der Talsperrentechnik nicht beachteten Ereignisses musste das sog. F.E.S.-Modell entwickelt werden (F.E.S. für Fissured, Elastic, Saturated Rock Mass Model).

Das Grundmodell setzt eine elastische Felsmatrix voraus, die durch ein System von parallelen Diskontinuitätsflächen unterteilt wird, wobei besagte Diskontinuitätsflächen eine bekannte Welligkeit ihrer Öffnung aufweisen, und zwar nach einem zweidimensionalen Raster in der Kluffläche selbst (Bild 12).



**Bild 12. Prinzipschema einer elastischen Felsmasse, durchzogen von einem Diskontinuitätssystem mit einer Frequenz 1/d, einer bekannten Welligkeit und einer bestimmten mittleren Öffnungsweite der Klüfte.**

Es ist demnach möglich, die Verformungskennlinie des unter Druck gesetzten geklüfteten Felskörpers zu ermitteln. Wird dazu nun ein Bergwasserdruck in die Öffnungen der Diskontinuitäten eingeführt, so lässt sich das gesamte eindimensionale Modell errechnen, wie aus Bild 13 ersichtlich.

Die Zusammendrückung des Gebirges ist somit eine Funktion der totalen Spannung und des so genannten neutralen Klufwasserdruckes sowie des Felsmoduls und der Klüftigkeit.



Die Gedankengänge, die zu diesem einachsigen Verformungsmodell aufgrund eines einzigen Systems von Diskontinuitätsflächen geführt haben, lassen sich auch auf kompliziertere dreidimensionale Fälle anwenden, wobei verschiedene Kluftsysteme, jedes mit seinen eigenen Besonderheiten wie Orientierung, Häufigkeit, Welligkeit usw., berücksichtigt werden können.

Dazu können Besonderheiten wie die Aufweichung der Kluftflächen infolge Verwitterung oder das Überschreiten einer elastischen Grenze in der Felsmasse, insbesondere in der Nähe der Kontaktpunkte, berücksichtigt werden. Ein solcher Fall ist in Bild 14 dargestellt worden.

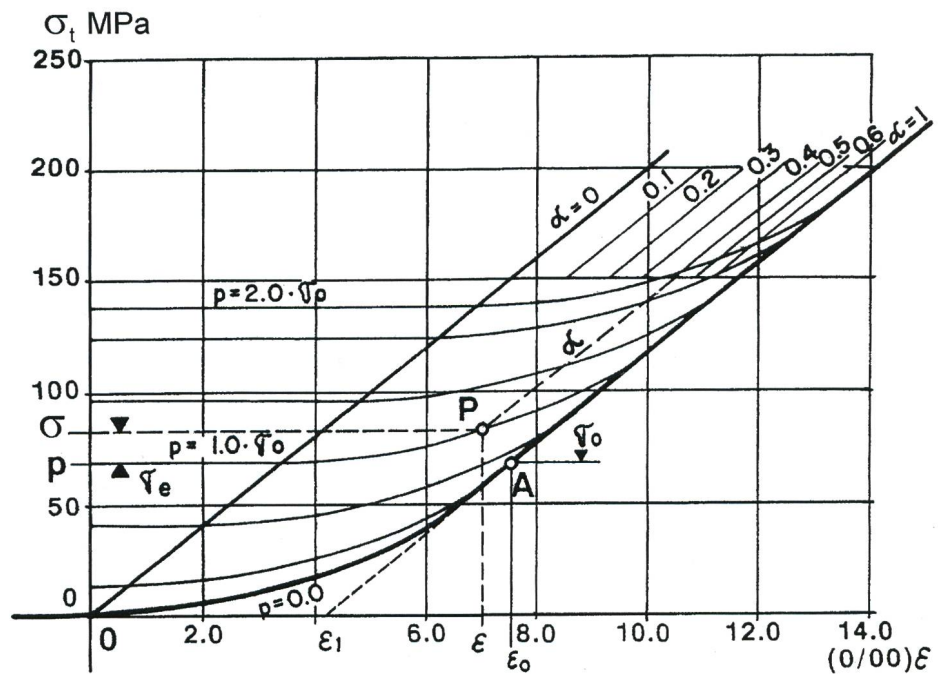
Gleichzeitig mit der Belastung des Felskörpers verändert sich die Durchlässigkeit, wie etwa aus Bild 15 ersichtlich.

Das Bild zeigt auch, dass mit der Tiefe und den steigenden Druckspannungen die Durchlässigkeit der einzelnen Kluftscharen abnimmt, sodass in grosser Tiefe nur noch die bedeutendsten Diskontinuitäten in Erscheinung treten, während die dünneren bereits geschlossen sind und ihre Wirkung somit gänzlich verloren haben. Dies erklärt, dass in tief liegenden Tunneln in der Regel nur an vereinzelten Stellen konzentrierte Wassereintritte zu erwarten sind.

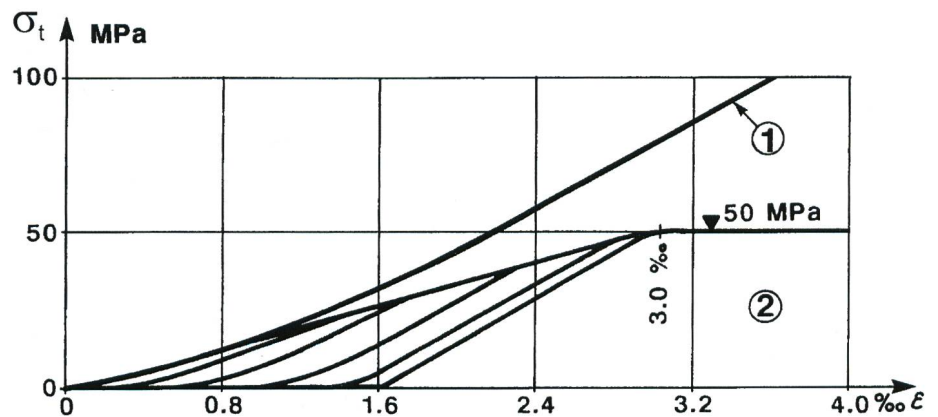
Das Schliessen der Klüfte und somit die Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmenden Druckspannungen ist umso empfindlicher, als die Felseigenschaften, insbesondere die Verformungsmoduli und die Festigkeit der Felsmatrix, kleiner sind. So ist ein schiefriges Gebirge mit zunehmender Tiefe bekannterweise viel schneller dicht als ein steiferes, wie z.B. Granit.

Es liegt auf der Hand, dass zur Erstellung eines solchen Modells verschiedene Grössen und Angaben benötigt werden, welche unter Zuhilfenahme besonderer Untersuchungen – insbesondere geologischer Art – beschafft werden müssen. Von Zeit zu Zeit ergibt sich glücklicherweise die Möglichkeit, das Verhalten des Modells an konkreten Fällen zu überprüfen, wie dies ja zum ersten Mal bei der Sperre Zeuzier der Fall gewesen ist.

Der Zusammenhang zwischen dem Kluftwasserdruck, der Kluftöffnung, der Durchlässigkeit des Massivs und der Bewegung des Wassers führt dazu, dass wegen der Viskosität des Letzteren Langzeitercheinungen in Kauf zu nehmen sind. Die Dauer dieser Erscheinungen nimmt selbstverständlich mit der Grösse des untersuchten Felsvolumens zu. So sind im Falle der Sperre Zeuzier – 20 Jahre nach den erwähnten Ereignissen – immer noch, wenn auch äusserst bescheidene Setzungen der Felsoberfläche im Gange. Dies entspricht selbstverständlich



**Bild 13. Beispiel eines F.E.S.-Modells für eine Felsmasse:**  $\epsilon$  = spezifische Verformung;  $\sigma_t$  = totale Spannung;  $p$  = neutraler Wasserdruck;  $\alpha$  = Grad der Schliessung der Klüfte;  $A(\epsilon_0, \sigma_0)$  = Schliesspunkt der Kluft in Abwesenheit von Wasser;  $\sigma_e$  = effektive Spannung;  $P(\epsilon, \sigma_t, p, \alpha)$  = Zustandspunkt mit totaler Dehnung, totaler Spannung, neutralem Wasserdruck und Grad des Schliessens der Klüfte.



**Bild 14. Felsmodell für das Fundament einer Bogensperre. Trockener Schiefer:**  $\sigma_t$  = totale Spannung;  $\epsilon$  = Dehnung; (1) elastischer Fall; (2) elasto-plastischer Fall.

einem Abklingen des Phänomens und einem Spannungszustand, der sich allmählich einem endgültigen Gleichgewicht nähert.

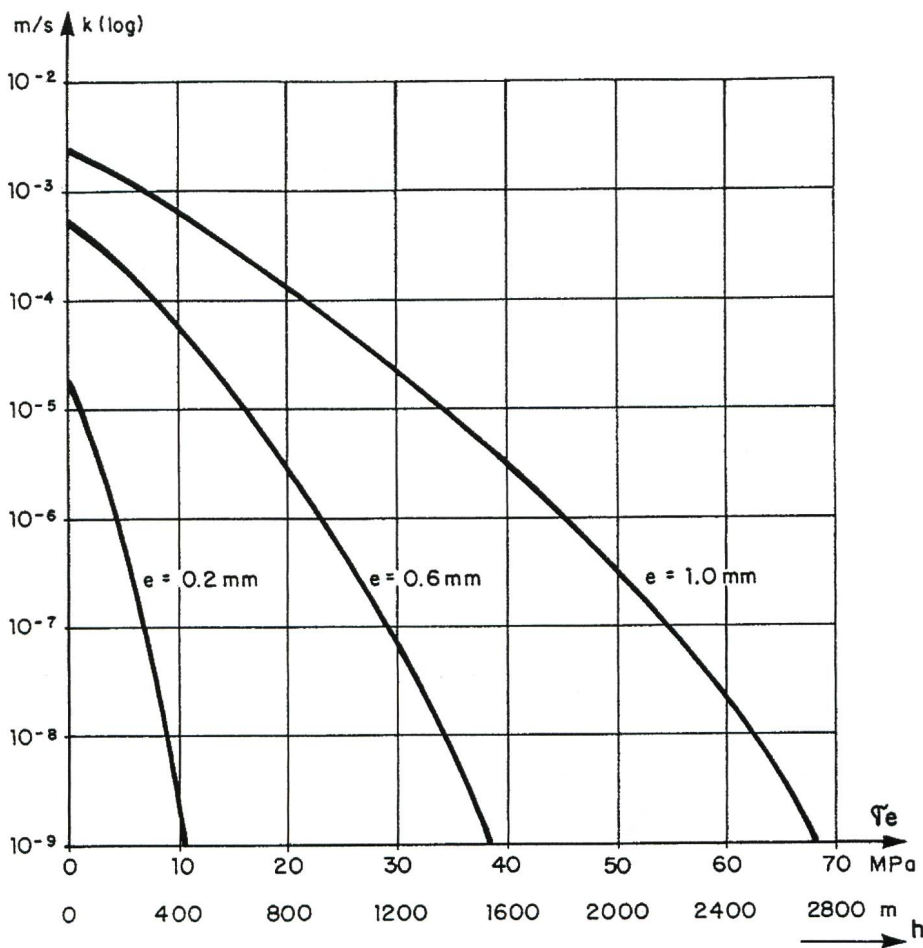
### Geologische Grundlagen

Die Talsperre Ferden ist auf einer steil SSEwärts einfallenden, von Gneisen dominierten Wechsellagerung mit Schiefen fundiert. Diese wird zur Lötschental-Färnigen-Zone des Aar-Massivs gezählt. Für die Umsetzung des oben geschilderten F.E.S.-Modells auf die örtlichen Verhältnisse an der Sperrstelle musste die Geologie eine möglichst genaue Beschreibung sowohl des engeren Bereichs der Foundation des Bauwerkes wie auch dessen Umgebung liefern. Dies erfolgte im Nahfeld in Form eines strukturellen Felsmodells, für das weitere Umfeld anhand einer geologischen Detailkartierung und deren Interpreta-

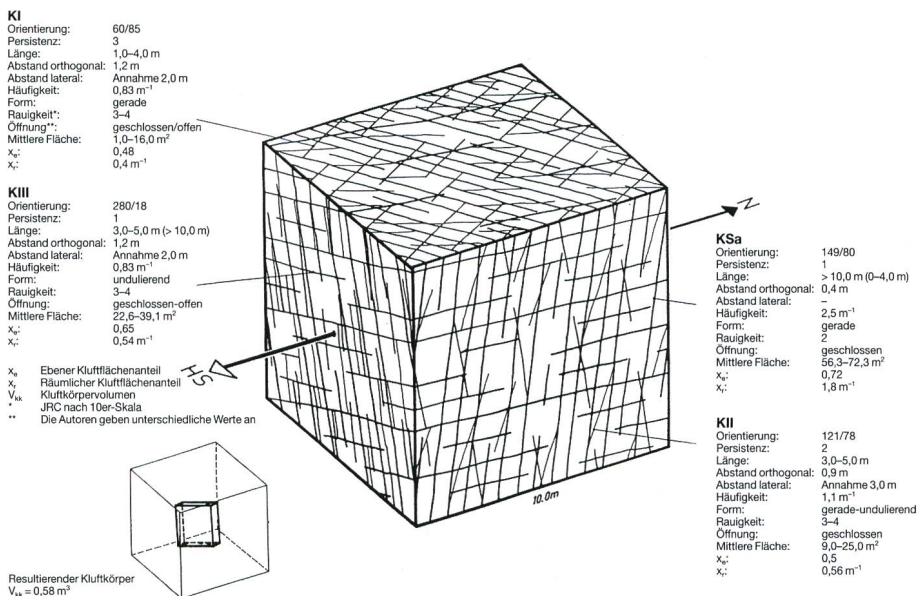
tion für den Gebirgsabschnitt zwischen der Stauhaltung und den Untertagebauten, d.h. dem Fensterstollen Ferden und dem Lötschberg-Basistunnel, inkl. Annexbauwerke.

Zur Beschaffung der erforderlichen Grundlagen drängte sich ein zweistufiges Vorgehen auf. In einem ersten Schritt wurden alle verfügbaren Unterlagen aus der Bauzeit der Stauanlage ausgewertet. Diese lieferten gute Informationen bezüglich der Petrografie des Felsuntergrundes der Sperrstelle und der Stauhaltung, der Festigkeiten und Durchlässigkeiten des Fundationskörpers sowie der gegenseitigen Lagebeziehungen der Kluftscharen des vorliegenden Kluft- bzw. Trennflächensystems und Hinweise auf die Zirkulationsverhältnisse des Bergwassers im seinerzeit ausgebrochenen Umleitungs- und Druckstollen.





**Bild 15. F.E.S.-Modell – Durchlässigkeit einer bestimmten Felsmasse in Funktion der effektiven Spannung für verschiedene Kluftweiten  $e$ ;  $k$  = Durchlässigkeit;  $\sigma_e$  = effektive Spannung;  $h$  = Überlagerungshöhe.**



**Bild 16. Felsmodell: Blockdiagramm des Felskörpers mit den Kluftscharen KSa, KI, KII, KIII.**

Berechnungsmodell	Scheibenmodell	Scheibenmodell	räumliches Modell
Annahme betreffend die Schliessspannung	$\sigma_0 <$	$\sigma_0 >$	$\sigma_0 >$
Setzung im Bereich der Talsperre	6 ÷ 7 mm	12 ÷ 14 mm	17 mm
Talverengung auf Höhe Mauerkrone	1 ÷ 3 mm	–	3,5 mm
Talverbreiterung auf Höhe Mauerkrone	–	0 ÷ 2 mm	–
Bergwasserzuflüsse im Basistunnel	1 ÷ 3 l/s·km	50 l/s·km	58 l/s·km

**Tabelle 1.  $\sigma_0$ : Schliessspannung; d.h. Spannung, die notwendig ist, um in Abwesenheit eines Wasserdruckes die Kluft vollständig zu schliessen.**

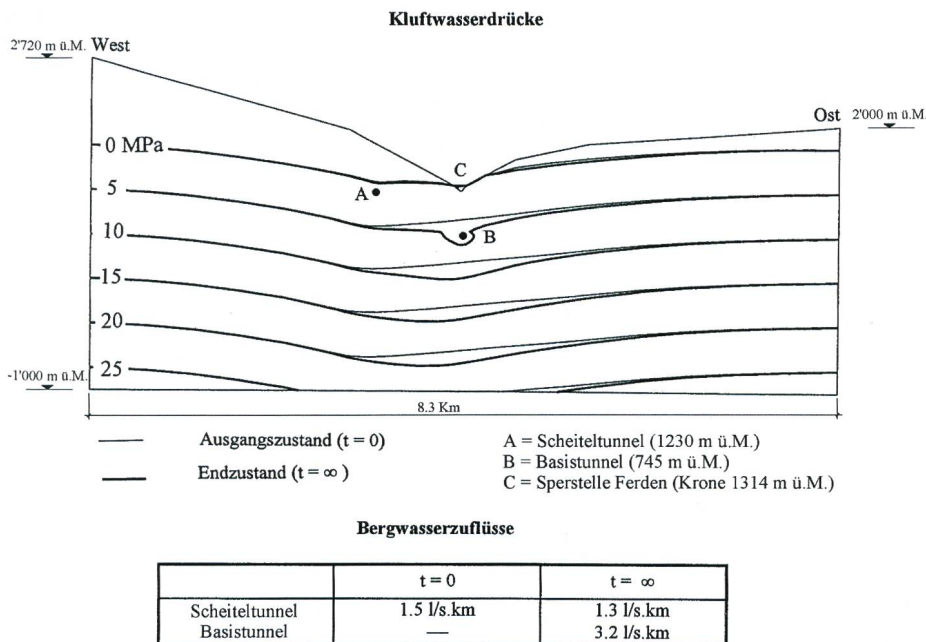
In einem zweiten Schritt mussten durch neue Felddatierungen die bestehenden Kenntnisse sowohl hinsichtlich der regionalen Geologie wie auch der Definition des Felsmodells erweitert werden.

Zur Erfassung der Detailgeologie wurde die Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel mit einer Kartierung 1 : 10000 und deren Interpretation beauftragt. Spezielle Beachtung musste den Durchlässigkeiten der vorliegenden Gesteinsserien geschenkt werden. Das Hauptinteresse war auf die vorwiegend wenig durchlässigen Phyllitonen einerseits und die Anwesenheit stärker durchlässiger Störzonen andererseits ausgerichtet. Letztere sind vor allem von Bedeutung, weil bei deren Anfahren mit den Untertagebauten eine rasche Absenkung der Bergwasserdrücke und des Bergwasserspiegels zu erwarten ist. Die Untersuchungen zeigten, dass mit den Phyllitonen der Faldumbach- und der Dornbachstörung eine gewisse Kompartimierung des Bergwasservorkommens vorliegt und eine ganze Reihe meist schieferungsparalleler Scherzonen vorhanden ist, deren Kernzone eine kakiritische Ausbildung aufweist.

Der zweite Teil der Felduntersuchungen hatte hauptsächlich die Beschaffung von strukturellen und textuellen Grundlagen für die Definition des Felsmodells zum Ziel. Im Wesentlichen musste das Kluftsystem durch genaue Beschreibung der Parameter der vorliegenden Kluftscharen im Einzelnen erfasst werden. Die Arbeiten konzentrierten sich in erster Linie auf die durch den Fundamentausbau der Talsperre geschaffenen künstlichen Felsaufschlüsse, wobei wasserseitig dank einer Beckenspülung, die zu einer Entleerung der Stauhaltung führte, Aufschlüsse temporär zugänglich waren, die normalerweise unter Wasser liegen. Zusätzlich wurden auch alle Felsaufschlüsse der Umgebung der Sperrstelle in die Untersuchungen mit einbezogen.

Zur Erfassung der gegenseitigen räumlichen Beziehungen wurden insgesamt 141 Schieferungsmessungen sowie 223 Kluftmessungen vorgenommen. Es zeigte sich, dass neben der Schieferungsklüftung KSa insgesamt fünf weitere Kluftscharen KI bis KV am Aufbau des Felskörpers beteiligt sind. Massgebend an der Durchtrennung sind jedoch neben den Schieferungsklüften KSa nur die Kluftscharen KI und KIII sowie, eher untergeordnet, KII beteiligt. KSa, KI und KIII wurden für die Definition des Felskörper-Elementes schlussendlich gewählt. KII wurde zusätzlich als interne Schwachstelle mitberücksichtigt. Neben der räumlichen Orientierung mit Mittelwert und Streuung in Fallazimut und Fallwinkel wurden folgende weiteren





**Bild 17. Resultat einer Berechnung mit dem Scheibenmodell: Kluftwasserdrücke und Bergwasserzuflüsse.**

Parameter zur Charakterisierung der Klüfte erfasst:

- **Persistenz:** Durchdringungsgrad als Rangabfolge der beteiligten Kluftflächen (1 = hoch beziehungsweise dominierend bis 4 = gering)
- **Form:** im dm- bis m-Bereich (g = gerade, u = unduliert, vz = verzahnt)
- **Länge:** mittlere Kluftlänge (m)
- **Abstand orthogonal:** Distanz zwischen zwei benachbarten Klüften, senkrecht zu den Flächen gemessen
- **Rauigkeit:** Form im cm-Bereich (g = gerade, glatt, u = undulierend, r = rau sowie Rauigkeitskoeffizient (JRC) nach Barton & Choubey (1977), Rock Mechanics 10, S. 1–54)
- **Öffnung:** Zustand der Kluft (o = offen, z = geschlossen, h = verheilt)
- **Öffnungsweiten:** Maximaler Abstand zwischen den beiden die Kluft begrenzenden Flächen (mm)

Als weitere abgeleitete Größen kommen hinzu:

- **Mittlere Fläche:**  $m^2$
- **Ebener Kluftflächenanteil:**  $x_e$
- **Räumlicher Kluftflächenanteil:**  $x_r$

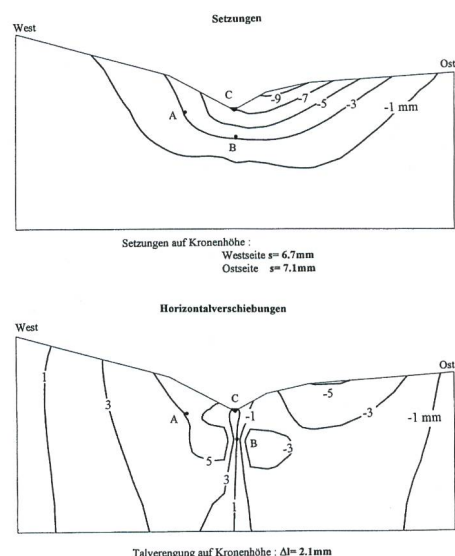
Das resultierende Felsmodell wurde in Form eines massstabgetreuen Blockdiagrammes des Felskörpers unter Berücksichtigung der massgebenden Kluftscharen präsentiert (Bild 16). Die in der Darstellung aufgeführten Parameter der einzelnen Kluftscharen entsprechen den Mittelwerten der Messungen bzw. Beobachtungen. Dies erlaubte die für die F.E.S.-Modellierung relevanten Parameter festzulegen und in die Rechnungen einzuführen.

### Setzungsberechnungen

Durch den Vortrieb eines Tunnels in einem geklüfteten, wassergesättigten Gebirge werden die natürlich vorhandenen Bergwasserhältnisse je nach Umständen mehr oder weniger stark beeinflusst. Es ist die – mengenmässig zwar bescheidene – Sickerströmung zum Tunnel hin, die in einem u.U. über Kilometer ausgedehnten Gebirgsbereich den Druck des in den Klüften vorhandenen Wassers reduziert und so bei jeder Kluft eine sehr geringe Schliessbewegung hervorruft. Durch das Aufsummieren all dieser kleinen Verformungen können sich an der Terrainoberfläche Setzungen von messbarer Grösse ergeben, die sich ggf. negativ auf bestehende, sensible Bauwerke, wie z.B. die Bogenstau-mauern, auswirken.

Um die gemäss dem F.E.S.-Modell mechanisch-hydraulisch gekoppelten Vorgänge über das gesamte Gebirgsmassiv integrieren zu können, wurde ein auf der Finite-Element-Methode beruhendes Rechenprogramm entwickelt. Die notwendigen Schritte für eine Simulationsberechnung mit diesem Programm sind folgende:

1. Abgrenzung des am Phänomen massgebend beteiligten Gebirgsausschnitts und Erfassung desselben mit einem geeigneten FE-Netz. Dank der Längsausdehnung des Tunnels besteht dabei die Möglichkeit, die Verhältnisse näherungsweise in Scheibenmodellen zu untersuchen, die gegenüber räumlichen Netzen mit einem viel geringeren Rechenaufwand verbunden sind und sich somit für Parameterstudien besser eignen. Kann das Scheibenmodell die vorliegenden topografischen und geologi-



**Bild 18. Resultat einer Berechnung mit dem Scheibenmodell: Verformungen.**

schen Verhältnisse nur ungenügend berücksichtigen, ergibt sich die Notwendigkeit, auf räumliche Modelle überzugehen. Der Mehraufwand ist aber beträchtlich, wenn wir bedenken, dass Gebirgsbereiche von der Grössenordnung von 100 und mehr  $\text{km}^3$  zu modellieren sind, die für die Berechnung eine Unterteilung in über 5000 Elemente notwendig machen.

2. Für die verschiedenen geologischen Homogenbereiche des massgebenden Gebirgsausschnitts sind die F.E.S.-Parameter zu definieren. Es sind dies insbesondere die elastischen Verformungseigenschaften der Felsmatrix sowie für jede einzelne Diskontinuitätsfamilie der mittlere Kluftabstand, die Kluftweite im spannungslosen Zustand und die Geometrie der Kluftberandungsflächen.
3. Eingabe der im natürlichen Zustand vorhandenen Verhältnisse bezüglich der primären Gebirgsspannungen und der hydrogeologischen Randbedingungen.
4. Simulation des Tunnelvortriebs zur Ermittlung der Änderungen in Bezug auf den Spannungszustand, die Bergwasserhältnisse sowie die Gebirgsverformungen.

Für eine Voraussage der bei der Tal-sperre Ferden zu erwartenden Setzungen zu-folge der Untertagebauten für den Löt-sch-berg-Basistunnel wurde sowohl eine Para-meterstudie mit dem Scheibenmodell wie auch eine Berechnung mit einem räumlichen Modell zur Erfassung des lokalen geologi-schen Aufbaus durchgeführt.

Ein typisches Resultat ist, was die Kluftwasserdrücke anbetrifft, in Bild 17 dargestellt.



Bild 18 zeigt für denselben Berechnungsfall die ermittelten Verformungen.

Die Resultate der verschiedenen für die Talsperre Ferden durchgeführten Berechnungen können wie in Tabelle 1 dargestellt zusammengefasst werden.

Es zeigt sich, dass unter den getroffenen Annahmen eher mit bescheidenen Geländeformungen infolge Gebirgsdrainage zu rechnen ist:

- Änderung der Distanz zwischen beiden Widerlagern quer zum Tal geringer als etwa 5 mm
- Setzung im Bereich der Talsperre geringer als etwa 20 mm

Interessant ist der starke Einfluss der sog. Schliessspannung  $\sigma_0$  insbesondere auf die Bergwasserzuflussmenge, aber auch auf die Setzung.

### Untersuchungen zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Staumauer Ferden

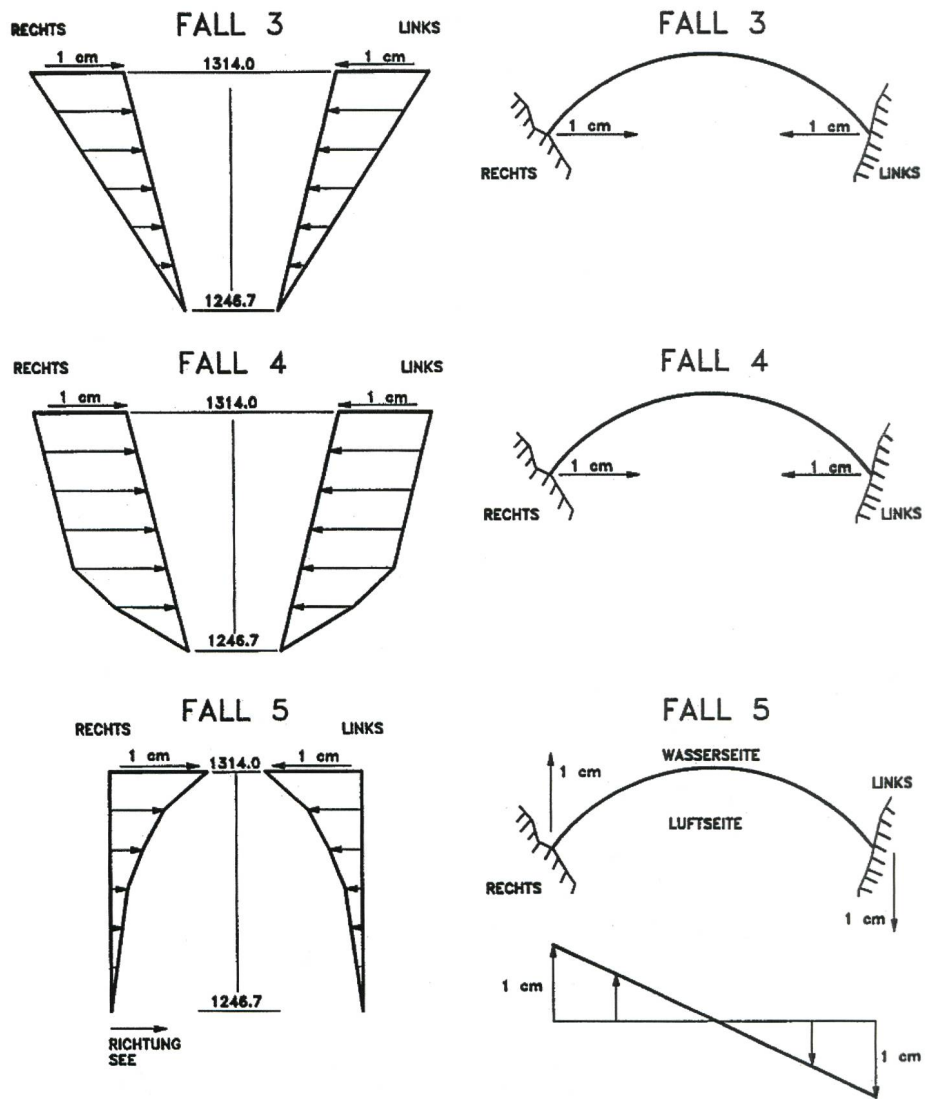
■ Dr. Giovanni Lombardi,  
Walter Amberg

#### Fragestellung

Im Zusammenhang mit möglichen Auswirkungen eines Tunnelvortriebs auf die im näheren Umfeld liegenden Talsperren stellt sich die Frage nach der Empfindlichkeit dieser Bauwerke auf Geländeformungen. Vorerst sei bemerkt, dass insbesondere Erddämme, aber auch Schwergewichtsmauern auf Geländeformungen viel weniger sensibel reagieren als dies bei einer Bogenstaumauer der Fall ist. Ebenfalls ist es selbstverständlich, dass nur differenzielle Geländeformungen sich auf das Bauwerk auswirken können.

Da die von der Gebirgsdrainage herführenden Geländeformungen das Resultat eines Aufsummierens sehr bescheidener Schliessbewegungen jedes einzelnen Felsrisses über mehrere 100 m starke Felspakete ist, darf davon ausgegangen werden, dass es sich an der Geländeoberfläche um sanfte, eher weit ausgedehnte Setzungsmulden handelt. Befindet sich der Taleinschnitt mit der Sperre im zentralen Bereich der Setzungsmulde, so wird sich der Taleinschnitt tendenziell schliessen; d.h. die beiden Talflanken nähern sich zufolge einer gegenseitigen Rotationsbewegung mit Drehpunkt z.B. auf Höhe des Talbodens oder darunter. Befindet sich hingegen die Talsperre im konvex gekrümmten Randbereich der Setzungsmulde, so haben wir es tendenziell mit einer Öffnungsbewegung des Taleinschnittes zu tun.

Sind, bezogen auf den Tunnel, die Verhältnisse in etwa symmetrisch, so wird sich eine Setzungsmulde ausbilden, deren



**Bild 19. Talsperre Ferden – Einfluss von Fundamentverformungen/Einheitsverschiebungslastfälle.**

#### UNTERSUCHUNGEN ZUR EMPFINDLICHKEIT DER SPERRE FERDEN

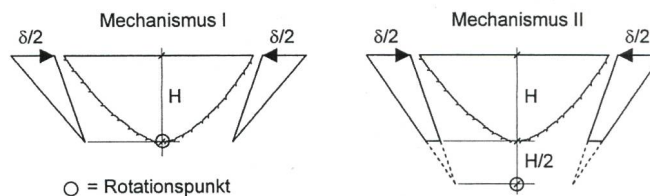
##### Kriterien

Zur Ermittlung der maximal zulässigen Verformungen sind folgende Kriterien angenommen worden:

max. Beton Druckspannung	12-14	N/mm <sup>2</sup>
max. Zugspannung - im Beton	3-3.5	N/mm <sup>2</sup>
- senkrecht zu den Fugen	1-1.4	N/mm <sup>2</sup>

##### Verformungsmechanismen

Die Werte in nachfolgender Tabelle sind für folgende Mechanismen ermittelt worden:



##### Maximal zulässige Verformung $\delta$ in mm

	Sperrstelle Ferden			
	Leeres Becken		Volles Becken	
	Mech. I	Mech. II	Mech. I	Mech. II
Talverbreiterung	6	6	10	10
Talverengung	14	12	32	32

**Bild 20. Talsperre Ferden – Einfluss von Fundamentverformungen/Untersuchungsergebnisse.**



Maximum über dem Tunnel liegt. Dem ist aber nicht immer so, da Unterschiede topografischer oder geologischer Natur vom symmetrischen Fall mehr oder weniger stark abweichende Verhältnisse bedingen.

Unter Berücksichtigung dieser Umstände wurde beschlossen, mittels statischer Untersuchungen abzuklären, wie sich der Spannungszustand in der Bogenmauer Ferden ändert, wenn bei leerem oder vollem Becken Fundamentverformungen gemäss eines der drei Grundmechanismen des Bildes 19 aufgezwungen werden.

Die Belastungsfälle in Bild 19 sind mit Fall 3 bis Fall 5 bezeichnet, da Fall 1 den Fall des leeren Beckens, d.h. den Eigengewichtsfall, und Fall 2 denjenigen des vollen Beckens, d.h. Wasserdruck und Eigengewicht, darstellen. Die Fälle 3 bis 5 sind folgendermassen definiert:

Fall 3: Schliessen des Taleinschnittes in Form einer gegenseitigen Rotation der beiden Flanken um den tiefsten Punkt im Taleinschnitt (auf Höhe der Mauerkrone wurde als Einheitslastfall eine Verkürzung der Distanz quer zum Tal von 2 cm angenommen).

Fall 4: Schliessen des Taleinschnittes in Form einer Translation der rechten Flanke gegenüber der linken. (Auch hier beträgt die Verkürzung auf der Höhe der Mauerkrone 2 cm.)

Fall 5: Verzerrung der Mauer in Tal-längsrichtung. Es wurde dabei angenommen, dass das rechte Widerlager sich Richtung See und das linke Widerlager Richtung Tal verschiebt. Das Verschiebungsmass ist auf Kronenhöhe je 1 cm. Die Verformung nimmt von oben nach unten bis zum Talboden sukzessiv ab und nähert sich asymptotisch der vertikalen Ebene mit Verformung 0 am Talboden.

### Ergebnis der Untersuchung

Solange an der Sperre keine Risse auftreten, ist ihr Verhalten als rein elastisch zu bezeichnen, und die verschiedenen Grundbelastungsfälle (Fälle 1 bis 5) können beliebig miteinander kombiniert werden. Auf diese Art wurden in einem ersten Schritt durch geeignete Überlagerung der Fälle 3 und 4 (gemäss Bild 20) zwei typische Mechanismen definiert; und zwar:

- *Mechanismus I:* Gegenseitige Rotation der beiden Talflanken mit Drehpunkt auf Niveau Talboden (100% Fall 3 + 0% Fall 4).
- *Mechanismus II:* Gegenseitige Rotation der beiden Talflanken mit Drehpunkt unterhalb des Talbodens, in einer Tiefe gleich der halben Mauerhöhe (100% Fall 3 + 50% Fall 4).

Durch Überlagerung dieser Mechanismen jeweils mit Fall 1 oder Fall 2 kann ermittelt werden, wie gross die gegenseitige

Verschiebung der beiden Mauerwiderlager auf Kronenhöhe sein darf, damit die zulässigen Betonspannungen nicht überschritten werden. Die Resultate dieser Untersuchung sind in Bild 20 zusammengestellt. Es sind ebenfalls die Annahmen bezüglich der zulässigen Betonbeanspruchungen aufgeführt.

Es darf somit festgestellt werden, dass die Talsperre Ferden folgende zulässige Längenänderungen der Distanz quer zum Tal auf Kronenhöhe aufnehmen kann, ohne dass dabei das rein elastische Verhalten des Bauwerkes überschritten wird:

- $\Delta l = 12$  mm im Falle einer Talverengung
- $\Delta l = 6$  mm im Falle einer Talverbreiterung

In einem zweiten Schritt wurde anschliessend untersucht, in welchem Masse die für die obigen Grenzfälle ermittelten maximalen Spannungen zunehmen, wenn zusätzlich noch 30% des Falls 5 überlagert wird. Die entsprechenden Resultate sind je nach untersuchtem Fall unterschiedlich; die grösste Spannungszunahme liegt etwa bei 25%.

### Überwachung der Staumauer Ferden

■ Kurt Egger,  
Schneider Ingenieure AG

### Ziel des Überwachungssystems

Da durch den Bau des Tunnels mit einer bleibenden Beeinflussung der Gebirgswasserhältnisse zu rechnen war, konnten Setzungen im Bereich der Staumauer nicht ganz ausgeschlossen werden.

Die Messanlage sollte ein frühzeitiges Erkennen von ausserordentlichen Verschiebungen sicherstellen. Die Kontrolle dieser Frühindikatoren diente somit als «Alarmglocke» und zusammen mit der ordentlichen Überwachung der Staumauer auch einer allfälligen Beweissicherung. Erfahrungen und entsprechende Theorien zeigen, dass bei möglichen Einflüssen vor allem mit Geländesetzungen zu rechnen ist. Meist als Folge davon können auch Distanzänderungen quer zu den Talflanken auftreten. Diese beiden Phänomene sollte die zu installierende Messanlage überwachen.

### Messkonzept

Um das Verhalten des Gebirges schon vor einer kritischen Annäherung des Vortriebs an die Talsperre zu überprüfen, wurden Messungen von Höhenänderungen und von speziell ausgewählten Talquerschnitten im Vorfeld der Staumauer, d.h. zwischen der Staumauer und Goppenstein, dem Angriffspunkt des Fensterstollens, durchgeführt.

### Nivellement

Die genaueste Methode zur Bestimmung von Höhen und Höhenänderungen ist das Präzisionsnivellement. Es bietet zudem die Möglichkeit, relativ kostengünstig allfällige Terrainsetzungen auch grossräumig zu erkennen.

In der Umgebung der Staumauer befinden sich keine geologisch stabilen Zonen. Die nächsten Felsaufschlüsse liegen bei Goppenstein und bei Chastel am Ende des Stausees. Somit lässt sich das Nivellement in die folgenden drei Abschnitte unterteilen (Bild 21):

- Goppenstein (Punkt 901) – Ferden (Punkt 934) – Chastel (Punkt 944) entlang der Kantonsstrasse, Länge 3,5 km
- Auf der linken Talseite von Chastel (Punkt 944) bis Pfeiler 225, Länge 1,2 km
- Entlang der Zufahrtstrasse zur Staumauer und über die Mauerkrone, Länge 0,5 km

### Distanzen

Die Überprüfung einer möglichen Talverbreiterung oder -verengung infolge des Tunnelvortriebs erfolgte durch die Bestimmung von Distanzen in ausgewählten Talquerschnitten.

Da die bestehende Messanlage der ordentlichen Überwachungsstufe auf die Bestimmung der Kontrollpunkte an und um die Staumauer ausgelegt ist, können anhand dieser nur beschränkte Aussagen bezüglich des Terrainverhaltens im Vorfeld der Stauanlage gemacht werden.

Deshalb wurde die bestehende Anlage der ordentlichen Überwachung mit vier neuen Pfeilern (224.2, 227, 222, 225) und zwei Konsolen (229.1, 226) an der Luftseite der Mauer erweitert (Bild 22).

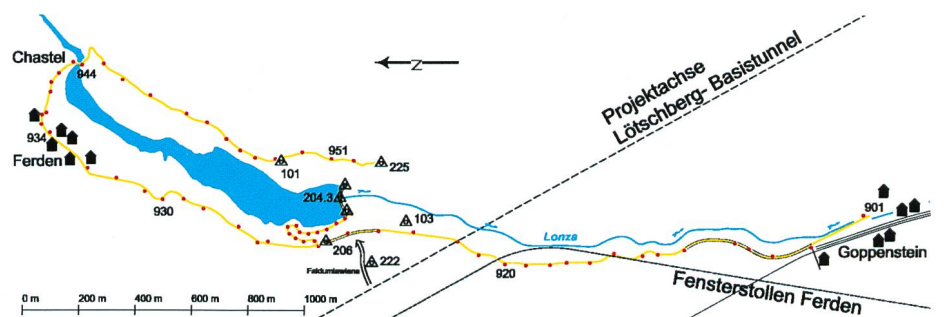


Bild 21. Übersicht Messanlage und Nivellemente.



Durch das Einbeziehen von Richtungs- und Höhenwinkelmessungen in das dreidimensionale Distanznetz konnten die drei Distanzen 222  $\Rightarrow$  225, 224.2  $\Rightarrow$  227 und 226  $\Rightarrow$  229.1 mit einer sehr hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt werden.

Auf weitere Distanzmessungen quer über das Tal zwischen Goppenstein und der Staumauer wurde wegen der Unzugänglichkeit der linken Talseite und wegen der fehlenden Felsaufschlüsse verzichtet. Als Frühindikatoren genügten die Setzungsmessungen des Nivellements.

### Messprogramm

Um allfällige saisonale Einflüsse besser beurteilen zu können und möglichst genaue und zuverlässige Referenzwerte zu erhalten, war es sinnvoll, vor dem Baubeginn des entsprechenden Tunnelabschnitts vergleichbare Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten durchzuführen. Da die überwachten Distanzen teilweise im Einflussbereich der Staumauer liegen, betrifft dies insbesondere die Einflüsse infolge unterschiedlicher Staukoten und Betontemperaturen.

Die Nullmessung der Nivellemente erfolgte zusammen mit den Distanzen nach Abschluss der Installationsarbeiten im November 1995. Die Jahreszyklusmessungen sowohl für das Nivellement wie auch für die Distanzen erfolgten dann im darauf folgenden Jahr 1996 (Messungen 9601–9610) und zeigten keine saisonalen Einflüsse.

Die spätere Häufigkeit der Messungen hing von der Vortriebsleistung im Fensterstollen und der Entwicklung allfälliger Geländebewegungen infolge des Tunnelvortriebs ab.

Der Umfang eines Nivellements steht aus wirtschaftlichen Gründen in direktem

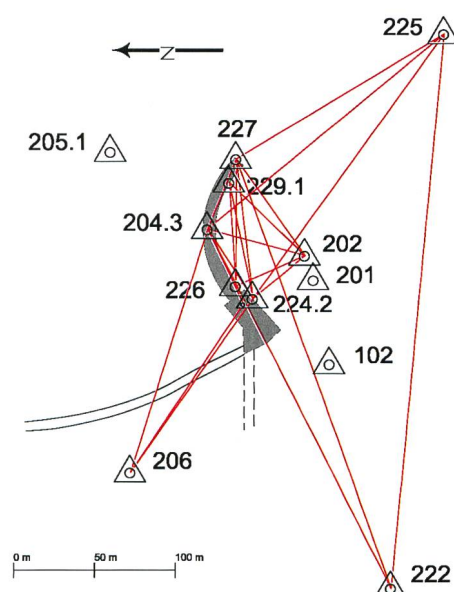


Bild 22. Distanznetzmesstzes.

Zusammenhang mit dem Resultat der Messungen, d.h. es wurde, ausgehend von Goppenstein, nur so lange gemessen, bis die nivellierten Punkte keine signifikanten Höhenänderungen mehr aufwiesen.

### Faldumlawine

Der Niedergang der Faldumlawine im Februar 1999 erforderte einige Reparaturarbeiten durch die KW Lötschen (Details Instandstellung siehe WEL Heft 11/12 1999 Bericht Lombardi/KW Lötschen). An der Bogenmauer selber konnten keine Schäden festgestellt werden, von der Messanlage wurden zwei Pfeiler (204, 224) und eine Konsole (229) durch die Lawine zerstört.

### Messungen

Die eigentlichen Überwachungsmessungen im Zusammenhang mit dem Tunnelvortrieb begannen im Juli 1999 bei einem Vortriebsstand des Fensterstollens von 1,0 km mit einer so genannten Vollmessung, d.h. Nivellement und Distanzmessungen.

Während des Baus des Fensterstollens erfolgten weitere Nivellementsmessungen im September (Vortriebsstand km 1,5) und November 1999 (km 2,1), Januar (km 2,5) und April 2000. Bei dieser Messung erreichte der Vortrieb mit einem Stand von 2,9 km die Höhe der Staumauer. Im August 2000 erfolgte dann nochmals eine Vollmessung (Nivellement und Distanzmessung) bei leerem Staubecken. Im Mai und August 2001 wurden nochmals zwei Nivellements gemessen, wobei im August der Fensterstollen mit einem Vortriebsstand von 4,3 km die Multifunktionsstelle und somit das Ende erreicht hatte.

Während des Vortriebs des eigentlichen Basistunnels (Röhre West) wurde im Juli 2002 ein weiteres Nivellement ausgeführt (Vortriebsstand km 38,0). Eine weitere Vollmessung erfolgte im August 2002 bei einem Vortriebsstand von km 38,3 (Röhre West). Nach dem erfolgten Durchschlag der Röhre Ost bei km 39,1 des Basistunnels im Oktober 2003 wurden das Nivellement und die Distanzen ein letztes Mal gemessen.

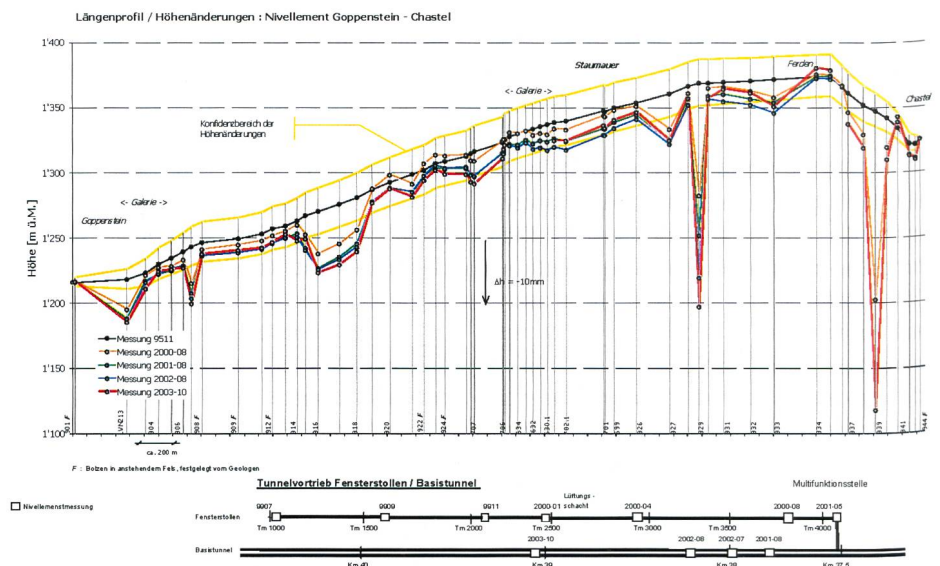


Bild 23. Höhenänderungen aufgrund der Nivellementsmessungen.

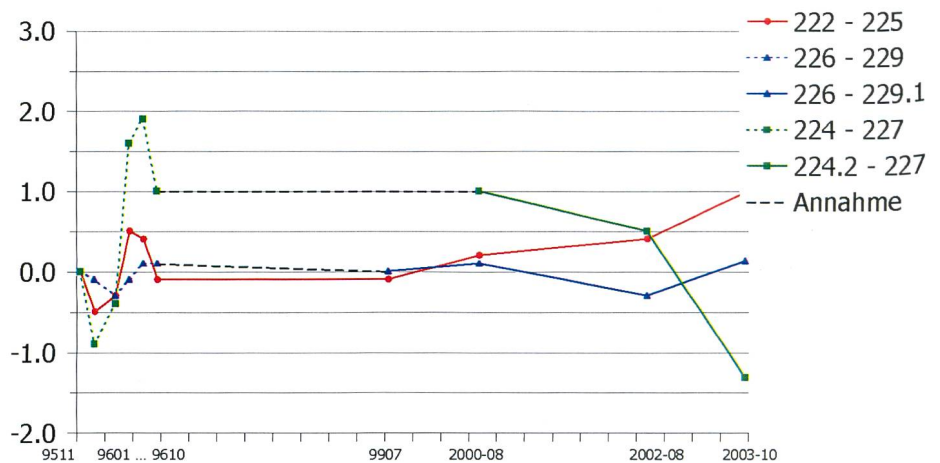


Bild 24. Distanzänderungen in Abhängigkeit der Zeit.



## Resultate der Überwachung

Dank dem Einsatz hochpräziser Messinstrumente und moderner Auswerteverfahren konnte für die Distanzen ein einfacher mittlerer Fehler von  $\pm 0,4$  mm erreicht werden. Für das Nivellement ergab sich ein mittlerer Fehler am doppelten Nivellement von  $\pm 0,5$  mm pro Kilometer.

Die Höhenänderungen der einzelnen Nivellements-messungen bezüglich der Referenzmessung 9511 von Goppenstein (Punkt 901) bis zur Brücke Chastel (Punkt 944) sind in Bild 23 dargestellt.

Grundsätzlich lassen sich für die im Fels versicherten und mit «F» bezeichneten Punkte, aber auch für viele weiteren Punkte keine signifikanten Setzungen feststellen. Dafür gibt es eine Anzahl von Punkten mit kleineren oder grösseren lokalen Setzungen, die in keinem Zusammenhang mit dem Vortrieb des Fensterstollens stehen.

Die Resultate der Distanzänderungen in Abhängigkeit der Zeit seit der Nullmessung 9511 können dem Diagramm in Bild 24 entnommen werden. Anschaulich sind dabei die saisonalen Einflüsse bei der Distanz 224/224.2  $\Leftrightarrow$  227 zwischen dem rechten und linken Widerlager.

## Schlussbemerkungen

Das Überwachungssystem, das für die Stau-mauer Ferden im Hinblick auf den Bau des Fensterstollens, des Lötschberg-Basistunnels und der Multifunktionsstelle eingerichtet wurde, hat sich bewährt.

Der Fensterstollen hat den Einflussbereich der Stauhaltung Ferden im Januar 2000 gequert, und der Basistunnel wurde Ende 2003 ebenfalls im Bereich der Stau-mauer Ferden durchgeschlagen. Die festgestellten Höhen- und Distanzänderungen ergaben keinen Hinweis auf nachweisbare Setzungen oder horizontale Verschiebungen im Zusammenhang mit den Vortrieben.

Obwohl während eines Tunnelausbruches jederzeit mit Überraschungen zu rechnen ist, musste die «Alarmglocke» während der Bauzeit nie in Aktion treten. Über einen Zeitraum von acht Jahren konnte diese einfache Messanlage jederzeit eine zuverlässige, genaue und wirtschaftliche Überwachung der Talsperre Ferden gewährleisten.

## Lehre aus geologischer Sicht

### ■ Dr. Toni R. Schneider

Nachdem der Fensterstollen Ferden vom 1. Dezember 1998 bis 17. September 2000 aufgefahren wurde und die Basistunnelvortriebe Richtung Nord im Sommer 2002 den

Gastern-Granit erreichten sowie Richtung Süd am 13. Dezember 2002 mit dem Vortrieb Steg bzw. am 29. Oktober 2003 mit dem Vortrieb Raron der Durchschlag erfolgte, war der aus geologischer Sicht im Hinblick auf eine Gefährdung der Talsperre Ferden und der Wasserrechte der KW Lötschen AG massgeblich in Frage kommende Teilabschnitt des Lötschberg-Basistunnels ausgebrochen. Es handelt sich neben dem Fensterstollen im Wesentlichen um den Tunnelabschnitt zwischen dem Jungfrau keil im Norden (km 37,00) und ca. km 46,00 im Altkristallin des Aar-Massivs. Hinsichtlich der Gefährdung der Talsperre Ferden ist vor allem der Abschnitt Schacht Fystertellä bis Stollenende des Fensterstollens von entscheidender Bedeutung. Von den noch verbleibenden Ausbrüchen im Bereich der Multifunktionsstelle sind kaum mehr wesentliche Veränderungen des heute vorliegenden Zustandes zu erwarten. Über die vorgefundenen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse kann deshalb einigermaßen zuverlässig informiert werden. Überraschungen sind jedoch nach wie vor nicht mit letzter Sicherheit auszuschliessen.

Über die vorgefundenen Verhältnisse liegt bezüglich des Fensterstollens bereits der Schlussbericht der Geologengruppe Lötschberg-Basistunnel vor (Bericht Nr. GG 130). Die Informationen über den Basistunnel mussten den wöchentlichen bzw. monatlichen Berichten über die Wasserführung entnommen werden.

Aus den Berichten der geodätischen Überwachung (siehe «Überwachung der Stau-mauer Ferden», K. Egger, Schneider Ingenieure AG) geht hervor, dass bis heute die Bauarbeiten am Lötschberg-Basistunnel zu keiner Gefährdung der Talsperre und ihrer Anlagen geführt haben. Es sind keine Terrainbewegungen festzustellen, die zu Schäden an den Bauwerken hätten führen können. Es stellt sich folglich die Frage, wie sich aus geologisch-hydrogeologischer Sicht dieses – an sich positive – Verhalten erklären lässt.

Was das vom Fensterstollen aufge-fahrene Gebirge betrifft, bestätigt der Befund innerhalb der natürlichen Streuungen der Detailpetrografie weitgehend die Prognose. Wenig bedeutende Abweichungen liegen einzig bezüglich des Auftretens von Amphiboliten vor. Die häufig linsenförmige Ausbildung führt zu einer Verminderung des prognostizierten Anteils von 7 auf 0,1%. Bemerkenswert ist auch die praktisch fehlende Kataklyse in der Faldumstörung, die folglich trocken war. Dasselbe Bild bezüglich der angetroffenen Petrografie gilt nach den bis heute vorliegenden Unterlagen auch für den Basistunnel.

Als grösste Überraschung sind die vorgefundenen hydrogeologischen Verhältnisse, im Speziellen das Ausmass der Wasserzuflüsse, zu bewerten. In der Prognose wurde im speziell interessierenden Abschnitt des Fensterstollens von Sm 2000 bis zum Fusspunkt (Sm 3921,0) mit einem Wasseranfall von rund  $1,0$  l/s  $\cdot$  100 m gerechnet. Diese Angabe basiert in erster Linie auf den Erfahrungen im Lötschberg-Scheiteltunnel, dem Druckstollen des KW Lötschen und dem Stollen Riti-Mittal sowie dem Strassentunnel Hohtenn-Mittal und dem zweiten Mittalgraben-Tunnel der BLS. Diese Prognose wurde im Zuge des Fensterstollenvortriebes weit unterschritten. Anhand der durch die örtlichen Geologen bzw. die öBL protokollierten Zuflussmessungen können für den hinsichtlich der Gefährdung der Talsperre entscheidenden Abschnitt zwischen dem Schacht Fystertellä und dem Stollenende die in Tabelle 2 zusammengestellten, von den äusseren Witterungseinflüssen kaum mehr abhängigen Zuflüsse berechnet werden.

Die erfassten Zuflüsse machen somit weniger als 10% der Prognose aus, wobei die Abnahme unterhalb Sm 3075 ausgesprochen markant ist. Es ist hier ein Absinken auf weniger als 4% zu verzeichnen.

Als weitere Beobachtungen über die Zuflüsse zum Fensterstollen ist noch Folgendes zu erwähnen: Beim Vortrieb war deutlich zu erkennen, dass die Zuflüsse durch den Vortrieb «mitgenommen» werden. Wasser führende Zonen zeigten wenige Tage nach dem Auffahren einen starken Rückgang der Schüttung bei weiterhin stärkerem Zufluss im Vortriebsbereich. Ein schönes Beispiel lieferte die Quelle bei Sm 1144 bei 180 m Überlagerung. Nach einer initialen Schüttung von 1,5 l/s während 2 Tagen sank der Zufluss in den folgenden 17 Tagen auf 0,25 l/s, um anschliessend bei dieser Wassermenge zu verharren. Der anfängliche Rückgang erklärt sich mit der Entleerung der Klufthohlräume im Einflussbereich des Ausbruches. Der stationäre Zustand entspricht dem Zufluss im Rahmen der allgemeinen Bergwasserzirkulation. Bemerkenswerterweise konnten die Zuflüsse zu den Vorbohrungen beim anschliessenden Stollenvortrieb nie lokalisiert werden.

85% des Wasseranfalles stammen aus den ersten 420 m des Fensterstollens. Dieser Abschnitt wird deshalb als Oberflächenbereich ausgeschieden. Der grösste initiale Zufluss erreichte hier 15,0 l/s (Sm 176,2 – 189,5) als einsamer Spitzenwert. Regelmässige Zuflüsse von vereinzelt bis zu 7,0 l/s wurden neben längeren trockenen Abschnitten bis Sm 1193,5 festgestellt. Anschliessend sind nur noch drei Abschnitte mit geringfügigem Zufluss zu verzeichnen (Sm





Stollenabschnitt (Sm)	Länge (m)	Mittl. Zufluss (l/s)	l/s · 100 m	Prognose (l/s · 100 m)	Befund (l/s · 100 m)
2460–3075	615	0,58	0,094		
3075–3735	660	0,24	0,036	1,0	< 0,068
3735–4048	313	0,16	0,051		

**Tabelle 2. Zuflussmessungen.**

1237,0–1246,5 [1 l/s], Sm 1482,5–1491,5 [Tropf] und Sm 1766,0–1776,5 [Tropf]. Von Sm 1776,5 (Überlagerung 300 m) bis zum Stollenende bei Sm 3921,0 (Überlagerung 1100 m) war der Stollen trocken, d.h. im Bereich des Vortriebes waren keine Wasserzutritte mehr zu erkennen. Ganz schwache diffuse Zuflüsse sind jedoch gemäss den vorliegenden Wassermessungen gleichwohl nicht vollständig auszuschliessen.

Für den Basistunnel liessen sich die natürlichen Zuflüsse nicht in einer mit dem Fensterstollen vergleichbaren Genauigkeit ermitteln. Eine klare Trennung zwischen dem Bergwasser und dem für die Vortriebsarbeiten und die Klimatisierung erforderlichen Brauchwasser war hier nicht durchführbar. Die Beobachtungen der örtlichen Geologen führten jedoch zu mit dem Fensterstollen weitgehend identischen Ergebnissen.

Als Erklärung für die markante Abnahme der Zuflüsse sind in erster Linie folgende Möglichkeiten in Betracht zu ziehen:

- Die vom Stollen durchfahrenen Scher- bzw. Störzonen zeigten gegenüber der Kluftwasserzirkulation der Matrix keine wesentlichen Unterschiede in der Wasserführung. Die im oberflächennahen Bereich erkennbare höhere Durchlässigkeit bei karikritischer Ausbildung zeichnet sich bei grösserer Überlagerung nicht bzw. nur in sehr beschränktem Masse ab.
- Die Prognose musste – mangels entsprechender Unterlagen – zwangsläufig auf Beobachtungen in Untertagebauten über der Talsohle, d.h. im Bereich der oberflächlichen Auflockerungszone des Felskörpers, abgestützt werden. Obwohl der Abstand zur Terrainoberfläche im hinteren Fensterstollenbereich mit 400 m (Schacht Fystertellä) bis 1100 m (Fusspunkt) noch nicht übermässig gross ist, wirkt sich die Lage unterhalb der Talsohle so stark aus, dass das Bauwerk unter die oberflächliche Auflockerungszone zu liegen kommt. Es hat dies aufgrund des erhöhten Überlagerungsdruckes eine stärkere Einspannung des Felskörpers zur Folge, die zu einer Schliessung der Klüfte des Kluftsystems führt. Die Konsequenz ist eine erhebliche Abnahme der Durchlässigkeit des Felskörpers. Diese vermag die Zuflüsse auf wenige Prozente derjenigen in der oberflächlichen Auflockerungszone zu reduzieren.

Die vorgefundenen hydrogeologischen Bedingungen bestätigen somit vollumfänglich die «Voraussage des Verhaltens des Bergmassivs» wie sie mit den F.E.S.-Modell beschrieben wird (siehe «Voraussage des Verhaltens des Bergmassivs», Dr. G. Lombardi, Dr. T. R. Schneider, W. Amberg).

Die Entspannung und Drainage des Bergwasservorkommens als Folge der durch den Bau des Fensterstollens Ferden und des Löttschberg-Basistunnels neu geschaffenen Vorflutverhältnisse haben – wie erwähnt – bis heute nicht zu Setzungen des Felskörpers geführt, die bis an die Oberfläche und damit in den Talsperrenbereich durchschlagen. Entsprechende Deformationen haben bisher kein Ausmass erreicht, das eine Erfassung mit dem speziell eingerichteten geodätischen Überwachungssystem ermöglicht hätte. Trotz dieses erfreulichen Befundes hinsichtlich der Gefährdung der Anlagen des KW Löttschen gilt es gleichwohl, die weitere Entwicklung einige Jahre über die Bauaktivitäten hinaus abzuwarten.

Als Lehre aus den im Rahmen des Bau des Löttschberg-Basistunnels beobachteten hydrogeologischen Verhältnissen ergibt sich, dass bis anhin im Rahmen von Zuflussprognosen für tief liegende, d.h. markant (> 400–500 m) unter der Talsohle verlaufende Untertagebauten der Wasserandrang überschätzt wurde. Dieser Folgerung entsprechen auch die bisherigen Erfahrungen im Sondiersystem Piora-Mulde und in den Vortrieben aus dem Schacht Sedrun des Gottthard-Basistunnels.

#### Bibliografie

- G. Lombardi, The F.E.S. rock mass model – Part 1, Dam Engineering, Vol. III, Issue 1, February 1992, pp. 49–72 (102.2-R-80), The F.E.S. rock mass model – Part 2, Dam Engineering, Vol. III, Issue 3, August 1992, pp. 201–221 (102.2-R-84).
- G. Lombardi, Modèle structurel et hydraulique pour roches fissurées. Porous or fractured unsaturated media: transports and behaviour. Scientific colloquium, october 5–8, 1992, Monte Verità, Centro Stefano Franscini – ETH Zürich, Ascona, Switzerland, Organized by Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne (EPFL)/University of Neuchâtel. Part 2: Flows, Behavior and deformation of variously saturated soils and rock masses, pp. 287–308 (102.1-R-63).

G. Lombardi, Hydrogeologische Aspekte von Tunnelprojekten. 43. Geomechanik-Kolloquium, Salzburg, Franz Pacher Kolloquium, Oktober 1994, Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (102.1-R-73).

W. Amberg, Modèle pour les massifs rocheux fissurés et saturés. Journée fondation des barrages du 15 octobre 1996 à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

Anschrift der Verfasser

Markus Aeschbach, Oberbauleitung, IGWS Ingenieurgemeinschaft Westschweiz, CH-3900 Brig.

Walter Amberg, Lombardi SA Ingegneri Consulenti, CH-6648 Minusio.

Kurt Egger, beratender Ingenieur, CH-7007 Chur.

Alfred Kobelt, Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-2501 Biel.

Dr. Giovanni Lombardi, Lombardi SA Ingegneri Consulenti, CH-6648 Minusio.

Henri Pougatsch, Bundesamt für Wasser und Geologie, CH-2501 Biel.

Hermann Salzgeber, EnAlpin AG, CH-3930 Visp.

Schneider Ingenieure AG, CH-7007 Chur.

Dr. Toni R. Schneider, beratender Geologe, CH-8713 Uerikon.

Dr. Hans-Jakob Ziegler, Leiter der Geologen-gruppe Löttschberg-Basistunnel, Kellerhals + Haefeli AG, CH-3011 Bern.