

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 89 (1997)
Heft: 7-8

Artikel: Gleitmikrometer- und Piezodexmessungen im Felsuntergrund der Staumauer Albingna
Autor: Bergamin, Stefan / Kovari, Kalman
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940196>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Gleitmikrometer- und Piezodexmessungen im Felsuntergrund der Staumauer Albigna

Stefan Bergamin und Kalman Kovári

Zusammenfassung

Messungen mit dem Gleitmikrometer im Felsfundament der Staumauer Albigna deckten 1980 die Existenz von Klüften auf, die sich infolge der Seespiegelschwankungen öffnen und schliessen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes über die Sickerströmung im geklüfteten Fels wurden 1987 bis 1992 bei unterschiedlichen Seespiegelhöhen piezometrische Druckmessungen mit dem Piezodexmesssystem durchgeführt. Aus der Kombination der systematischen Beobachtung von Kluftöffnung und Wasserdruck stellte man eine eindeutige Korrelation zwischen den Verformungen des Felsens und dem hydraulischen Potential fest. Nach Projektende wurden beide Messeinrichtungen für jährliche Ablesungen weitergenutzt.

Résumé: Mesures avec le micromètre coulissant et la sonde piézométrique coulissante dans le rocher de fondation du barrage d'Albigna

En 1980 les mesures avec le micromètre coulissant dans le rocher de fondation du barrage d'Albigna décelaient l'existence de joints qui s'ouvrent et se referment en fonction du niveau de la retenue. Un projet de recherche réalisé entre 1987 et 1992 avait pour objectif l'étude des écoulements en milieu fissuré aux différents niveaux du lac. Les pressions hydrauliques ont été mesurées en utilisant le système Piezodex. L'étude comparative des résultats de ces deux méthodes révélait une corrélation entre la déformation de la roche et le potentiel hydraulique. A l'issue de ce projet on a gardé les deux instruments pour l'auscultation permanente.

Summary: Sliding micrometer and piezodex measurements in the foundation area of the Albigna dam

In 1980, measurements with the sliding micrometer in the foundation area of the Albigna dam showed the existence of joints which open and close due to variation of the reservoir water level. A comprehensive research project was carried out from 1987 to 1992 to help clarify the characteristics of flow in fissured rock at different water levels. Piezometric pressures were measured using the piezodex system. A comparison of the results of both types of measurements produced a correlation between the rock deformations and the hydraulic potential. Later on these instruments were used for permanent monitoring.

1. Einleitung

Bei Staumauern spielt die Sickerströmung im geklüfteten Fels eine wichtige Rolle. Besonders die Druckverteilung ist für die Stabilität der Felsfundamente entscheidend. Das Bergwasser zirkuliert entlang von Trennflächen (Risse, Klüfte usw.), deren geometrische und hydraulische Eigenschaften in situ kaum vollständig erfasst werden können. Dies steht in einem Widerspruch zur Genauigkeit heutiger numerischer Berechnungsverfahren zur Modellierung des geklüfteten Untergrundes. Sie verlangen je nach Grad ihrer Verfeinerung und Dimensionalität (2 D, 3 D) detaillierte Angaben über die hydraulischen Randbedingungen, die Durchlässigkeiten sowie die Lage, Richtung, Erstreckung, Abstände und Öffnung der Klüfte.

Zum besseren Verständnis der Sickerströmung in einem geklüfteten Fels leisten Beobachtungen im Feld einen wertvollen, in den meisten Fällen sogar unverzichtbaren Beitrag. Im Untergrund der Staumauer Albigna hat man während der vergangenen 16 Jahre umfangreiche Messungen mit zwei an der ETH Zürich entwickelten, hochpräzisen Instrumenten durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im folgenden vorgestellt.

2. Stauanlage Albigna

Die Staumauer Albigna [1] befindet sich im Bergell, im südlichen Teil des Kantons Graubünden auf einer Höhe von 2100 m ü.M. Sie steht auf einem markanten, steil in einen tiefen Einschnitt abfallenden Felsriegel zwischen dem Piz Balzet und dem Spazzacaldaira. Die Betonmauer staut im Bereich eines zirka 120 m tief mit Alluvionen gefüllten Beckens einen See von 67 Mio m³ Inhalt ein, der im Albignatal bis zum gleichnamigen Gletscher reicht.

Die Topographie an der Sperrstelle hat den ungewohnten Verlauf der Staumauer vorgezeichnet. Es handelt sich dabei um eine Gewichtsmauer mit zwei seewärts gekrümmten Seitenflügeln, die 1956 bis 1959 am Standort der ersten Hochwasserrückhaltesperre der Schweiz errichtet wurde. Sie hat eine Kronenlänge von 759 m und besteht aus Blöcken von 20 m Breite. Der grösste Block in der Talmitte ist 115 m hoch und weist eine 85 m breite Aufstandsfläche auf. Zwischen den Blöcken gibt es 5 m breite Hohlräume, um den Auftrieb unter der Staumauer zu verringern. Von den Kontrollgängen und Hohlräumen aus wurden zusätzlich Entlastungsbohrungen abgeteuft sowie zwei maximal 120 m tiefe Injektionsschirme erstellt.

Der Felsuntergrund besteht aus Tiefen- und Ganggesteinen der Bergeller Intrusion. Die vorherrschenden Tiefengesteine sind helle, z.T. sehr grobkörnige, stellenweise auch dunkle Biotitgranite und Granodiorite mit schwach ausgebildeter Paralleltextur [3]. Die Ganggesteine bestehen aus feinkörnigerem Aplit und Pegmatit. Vor dem Bau der Anlage konnten durch Oberflächenaufnahmen drei regelmässige Kluftscharen mit einem Abstand von 1 bis 10 m festgestellt werden. Die Kluftscharen A und B stehen in etwa

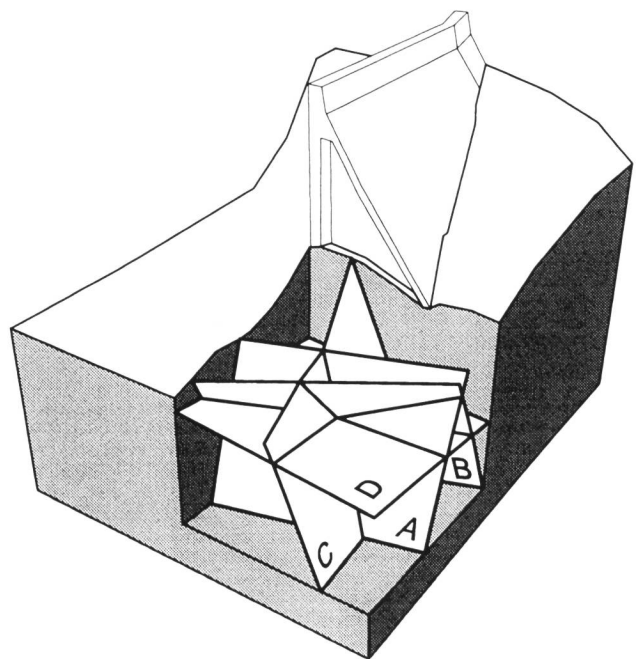


Bild 1. Idealisierte Darstellung der vier Hauptkluftscharen in Bezug zur linken Widerlagerseite der Staumauer [3].

senkrecht, die Schar C parallel zur Bauwerksachse. Eine vierte, oberflächenparallel verlaufende Schar D ist weniger regelmässig ausgeprägt; ihr Abstand nimmt mit der Tiefe zu. Bild 1 zeigt schematisch die räumliche Beziehung der verschiedenen Flächen untereinander sowie jene zum Bauwerk. Wichtige Eigenschaften wie Form, Erstreckung, Welligkeit, Öffnungsweite usw. kommen hier jedoch nicht zum Ausdruck.

In der Planungsphase beurteilte man die Sperrstelle als ausserordentlich günstig für den Bau einer Gewichtsmauer. Die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften sowie die Durchlässigkeit des anstehenden Felsens schienen in keinerlei Hinsicht problematisch zu sein. Dennoch traten während des ersten Einstaus 1960 unerwartet Probleme auf: Im Zuge nachträglicher Injektionsarbeiten bildete sich bei Vollstau in einem Block ein feiner Riss. Er erstreckte sich vom Fundament bis auf eine Höhe von 25 m und fand seine Fortsetzung in einer Kluft der Schar B.

3. Gleitmikrometermessungen

Nach einem lang andauernden Maximalstau traten 1977 überraschend hohe Sickerwasserverluste sowie Quellen an der linken Talflanke unterhalb der Staumauer auf. Während Pendel- und Klinometerablesungen keine Abweichungen zu früheren Jahren zeigten, deuteten geodätische Messungen auf eine Zunahme der bleibenden Mauerdeformationen hin. Sie gaben Anlass zu einer gründlicheren Überprüfung der Staumauergründung. Im Rahmen eines umfassenden Untersuchungsprogramms entdeckte man einen parallel zum wasserseitigen Mauerfuss verlaufenden Riss im Fels (L in Bild 3), der sich über eine Länge von rund 300 m erstreckte. Er wies bei abgesenktem See eine Öffnung von 8 mm, bei höchstem Seespiegel lokal eine solche von 16 mm auf. Diese Beobachtung warf eine Reihe wichtiger Fragen auf über die allfällige Existenz, Lage und Ausdehnung weiterer solcher «aktiver» Klüfte, die sich als Folge von Seespiegelschwankungen öffnen und schliessen und so die Wasserwegigkeit nachhaltig beeinflussen. Da eine Beantwortung dieser Fragen auf theoretisch-rechnerischem Weg ausgeschlossen war, ging man empirisch von folgender Hypothese aus: Würde man entlang einer Messlinie den lückenlosen Verlauf der Axialdehnung kennen, so markierten allfällige scharfe Spitzen das Vorhandensein aktiver Klüfte [1].

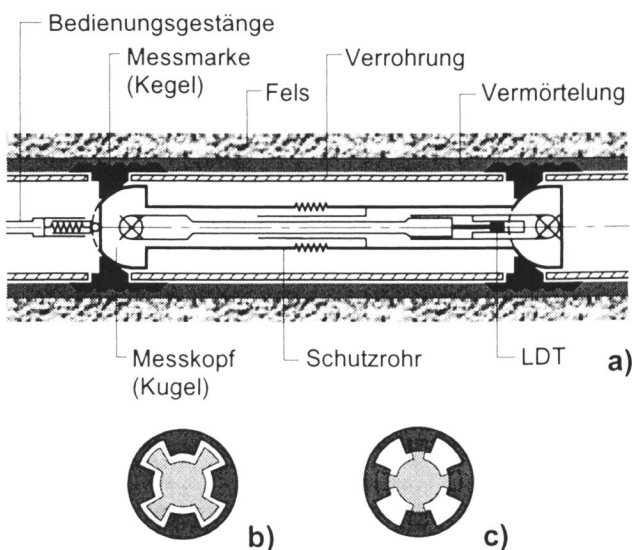


Bild 2. Funktionsschema des Gleitmikrometers (a) mit Gleitposition (b) und Messposition (c) [1].

Das geeignete Instrument für die präzise Messung des Dehnungsverlaufs entlang einer Bohrung ist das Gleitmikrometer [2]. Es ist eine tragbare, wasserdichte Sonde zur Messung differentieller Verschiebungen zwischen zwei Messmarken, die 1,0 m voneinander entfernt sind (Bild 2). In einer Verrohrung aus Hart-PVC wird die Sonde vom Bohrlochmund ausgehend schrittweise in die verschiedenen Messpositionen gebracht und der Messwert abgelesen. Nach Erreichen des Bohrlochbodens werden zur Kontrolle rückwärtsschreitend Messungen ebenfalls schrittweise vorgenommen. Die kegelförmigen Messmarken im Innern der Muffen dienen als Anschläge für das Setzen der 1 m langen Sonde. Sie verfügt an beiden Enden über spezielle kugelförmige Köpfe, die in der Gleitposition eine Verschiebung durch die Messmarken erlauben. Zur Messung wird die Sonde um 45 Grad gedreht und durch Zug am Führungsgestänge in den Messmarken verspannt. Im hochpräzise positionierten Instrument ($\pm 3 \mu\text{m}$) erfasst ein induktiver Wegaufnehmer den entsprechenden Messwert. Durch Ablesungen bei verschiedenen Seeständen lässt sich die relative Axialverschiebung (Axialdehnung) der beiden Messmarken gegenüber der Nullmessung ermitteln.

Um die Dehnungen in Richtung der Bohrlochachse infolge der Seespiegelschwankungen zu erfassen, wurden im Sommer 1980 in zwei Messquerschnitten in sechs Bohrungen total 400 m Messrohre eingebaut. Die Messungen deckten das Vorhandensein aktiver Klüfte auf und lieferten damit das Verständnis für das unerwartete Bauwerksverhalten. Sie bestätigten nicht nur die Fortsetzung des bereits erwähnten Risses L im Fels, sondern wiesen deutlich auf eine bis anhin unbekannte Kluft S hin (Bild 3). Wie in Bohrung GM.1 in 46 m Tiefe sichtbar, öffnet und schliesst sich diese infolge des Seeaufstaus um mehr als 3 mm. Die in Bohrung GM.2 bis in eine Tiefe von 50 m feststellbaren Dehnungen weisen auf eine grosse Tiefenwirkung der Staumauer hin. Die zwei Ausschläge in einer Tiefe von 5 m und 25 m deuten an, dass hier eine oder mehrere aktive Klüfte die Bohrlochachse schneiden. Nach Abräumen der alluvialen Ablagerungen vom Fels konnte der Ausbiss der Kluft S tatsächlich festgestellt werden. Um den Eintritt des Wassers in die Klüfte S und L zu verhindern und damit die mutmassliche Ursache der luftseitigen Quellen zu beseitigen, wurde eine grossflächige PVC-Folienabdichtung am wasserseitigen Mauerfuss angebracht. Bis heute andau-

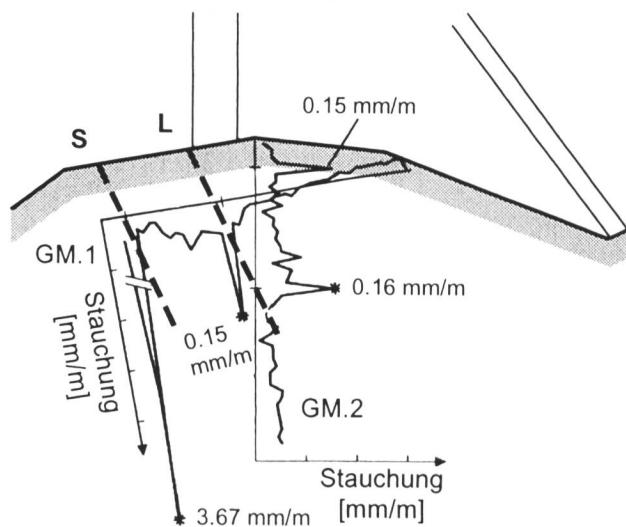


Bild 3. Lückenloser Verlauf der mit dem Gleitmikrometer gemessenen Dehnung entlang der beiden, in der Messebene von Block 14 gelegenen Bohrlöcher. Die hier aufgetragenen Stauchungen lassen sich durch eine Entlastung des Felsens infolge Absinkens des Seespiegels von 2161 m auf 2059 m ü. M. erklären [1].

ernde Kontrollmessungen bestätigten die Richtigkeit der erwähnten Hypothese sowie der getroffenen Massnahmen.

Die nunmehr sechzehnjährigen Erfahrungen mit dem Gleitmikrometersystem im Fundationsbereich der Stau-mauer Albigna bezeugen seine Zuverlässigkeit und Präzi-sion. Es hat sich gezeigt, dass dieses einfache und robuste Gerät über eine lange Zeitdauer wertvolle Messwerte lie-fern kann und sich damit auch für langfristige Beobachtun-gen problematischer Felsbereiche eignet. Wird eine per-manente Überwachung ausgesuchter Messpositionen ge-wünscht, so lassen sich solche mit einem fest installierten Mikrometer bestücken, wie dies seit 1990 an einer Stelle der Fall ist. Alle Messungen belegen, dass die Sicherheit der Stau-mauer nicht beeinträchtigt ist.

4. Piezodexmessungen

Die Dichtigkeit des Felsens spielt nicht nur bei Stau-mau-ern, sondern auch bei unterirdischen Lagerstätten für die Entsorgung radioaktiver und anderer Industrieabfälle eine massgebende Rolle. Abschätzungen über die Menge der Schadstoffe, welche durch eine Sickerströmung im Laufe der Zeit in die Biosphäre gelangen könnten, beruhen auf felshydraulischen Überlegungen und Modellberechnun-gen. Um die Gesetzmässigkeit der Sickerströmung im ge-klüfteten Fels genauer untersuchen sowie heutige Berechnungsmodelle überprüfen zu können, wurde 1987 bis 1992 im Untergrund der Stau-mauer Albigna ein Forschungspro-jekt durchgeführt. Das Hauptgewicht lag dabei auf umfang-reichen Feldmessungen und der Interpretation der Mess-daten durch numerische Berechnungen.

Die Wahl des Standortes war mehrfach begründet: Zum einen ist der Untergrund einer Stau-mauer jahreszeitlich schwankenden Druckgradienten ausgesetzt, zum anderen ist eine gute Zugänglichkeit für das Abteufen von Bohr-löchern zum Zwecke der Instrumentierung gewährleistet. Die bereits vorhandenen Gleitmikrometerbohrungen sowie die im Zuge früherer Untersuchungen gewonnenen Er-kenntnisse über den anstehenden Fels waren weitere ent-scheidende Gesichtspunkte.

Zur Bestimmung der piezometrischen Höhen entlang von Bohrungen im Fels wurde eigens das Piezodexmesssys-tem entwickelt [4]. Es kommt im Gegensatz zu früheren

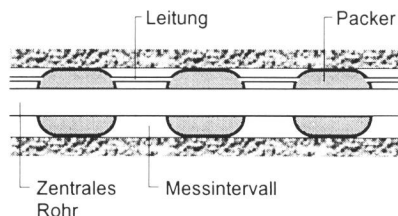


Bild 4. Packerkette des Piezodexsystems, welche die einzelnen Messintervalle definiert [4].

Konstruktionen ohne jegliche hydraulische Verbindung zwischen Sonde und Flüssigkeit aus. Um eine Serie von Messintervallen zu definieren, führt man eine Kette von Packern ins Bohrloch ein, die über eine gemeinsame Lei-tung mit Nitrogengas oder volumenkonstantem Mörtel ge-füllt werden (Bild 4). Der Gasdruck beim Aufblasen wird entsprechend dem erwarteten Höchstwert des Wasser-drucks entlang der Bohrung gewählt und mit einer handels-üblichen Druckflasche aufrechterhalten. Die Lage der Packer bzw. den Ort und die Länge der einzelnen Mess-intervalle wählt man entsprechend der in den Bohrkernen er-kennbaren Klüftung. Ihre Anzahl ist durch die maximale Länge der Packerkette (ca. 120 m), die minimale Länge ei-nes Einzelpackers (1,0 m) sowie die konstruktiv bedingte Mindestlänge eines Messintervalles (0,50 m) begrenzt.

Ein Drucktransmitter pro Messintervall erlaubt die Mes-sung des Wasserdrucks ohne hydraulische Verbindung zwischen Sonde und Flüssigkeit (Bild 5). Diese Zellen ha-ben die Aufgabe, den Flüssigkeitsdruck während der kur-zen Zeit einer Ablesung auf den Kraftsensor der Sonde zu übertragen. Das Wasser übt den Druck über eine hochdü-nne, weiche und elastische Membrane auf den kolbenförmigen Drucktransmitter aus (Bild 6). Wenn sich die Sonde in Messposition befindet, wird der Kolben um 0,1 bis 0,2 mm aus seiner Ruheposition angehoben. Während dieser Pha-se wirkt der Wasserdruck unmittelbar über die Membrane auf den reibungsarm geführten Kolben, so dass der Druck aus einer Kraftmessung resultiert. Die Kraft ist dabei proportional zum Produkt des Wasserdruckes mit dem Flächeninhalt der membrangeschützten Kolbenoberfläche. Um eine hohe Messgenauigkeit (± 150 bis 500 mm Was-sersäule je nach Messbereich) zu erzielen, muss die Achse des Kraftsensors mit jener des Kolbens übereinstimmen.

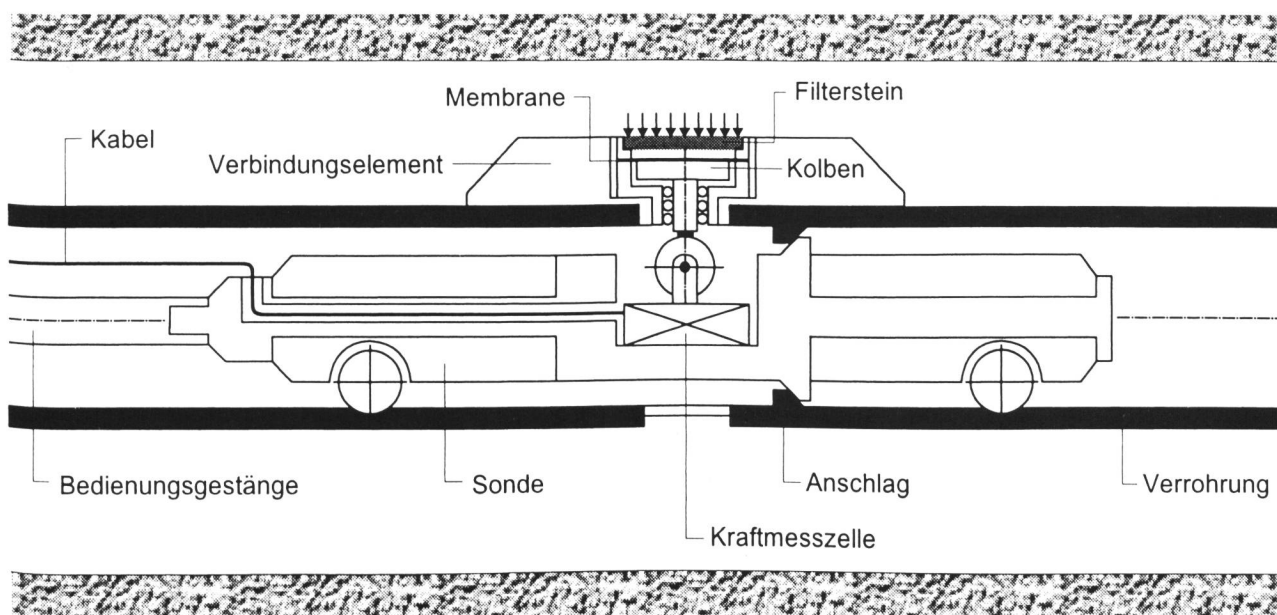
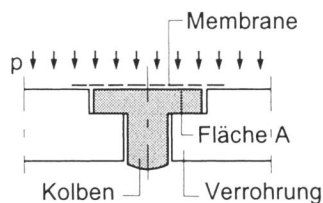
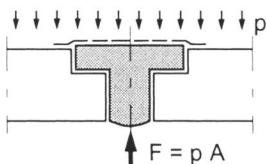


Bild 5. Funktionsschema der beweglichen Piezodexsonde in der Messposition, in welcher der eingebaute, durch den Wasserdruck bela-stete Drucktransmitter angehoben wird [4].



a)



b)

Bild 6. Drucktransmitter mit Membrane [4].

- a) Kolben in Ruheposition, in die er durch den Wasserdruck p gedrückt wird.
b) Kolben in Messposition, in die er durch die gemessene Kraft F der Sonde gedrückt wird.

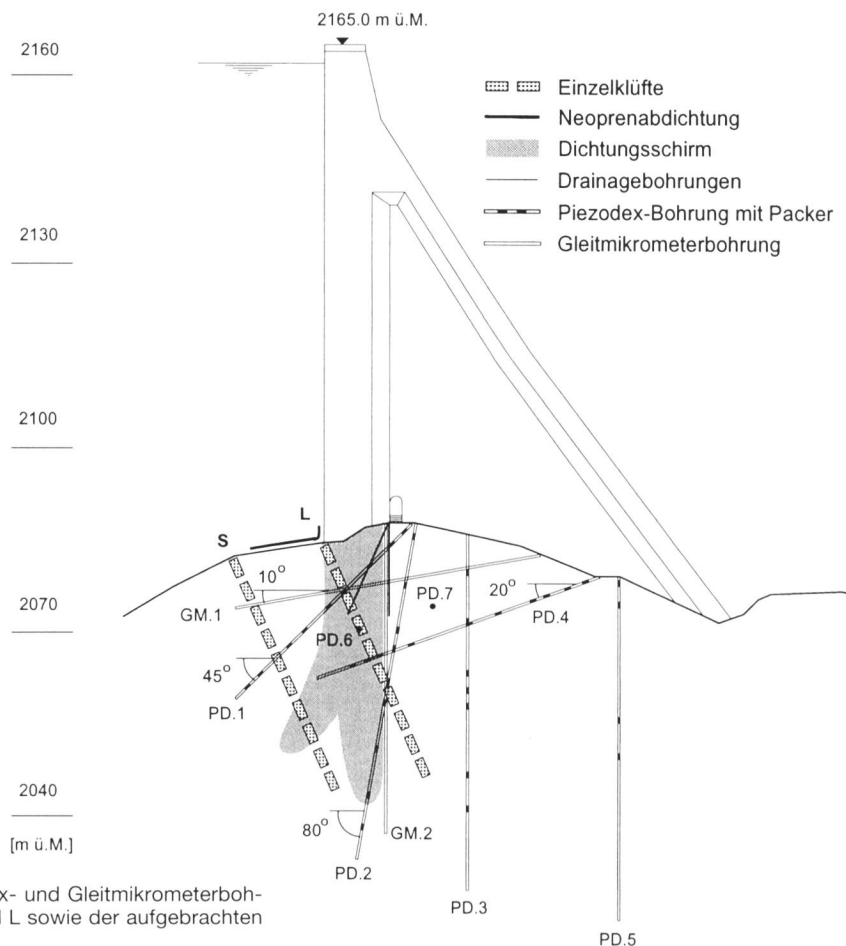


Bild 7. Querschnitt Fuge 14 mit den Piezodex- und Gleitmikrometerbohrungen, den bekannten aktiven Klüften S und L sowie der aufgetragenen Neoprenabdichtung.

Dieses Problem der koaxialen Kraftübertragung konnte durch eine hochpräzise Positionierung der Sonde mit Hilfe des Kugel-Kegel Prinzips gelöst werden, wobei das zentrale Rohr kegelförmige, die Piezodexsonde kugelförmige Anschlüsse aufweist.

Bei der Beobachtung von Potentialen in einem Felsvolumen ist man wegen der hohen Bohr- und Instrumentierungskosten gezwungen, sich auf wenige Bohrlöcher zu beschränken. Das Hauptgewicht der Instrumentierung lag daher auf einer Vertikalebene senkrecht zur Staumauerkrone (Bild 7). Zum Abteufen der Bohrungen wählte man einen Hohlraum zwischen zwei Staumauerblöcken, von welchem aus bereits 1980 in zwei Gleitmikrometerbohrungen an insgesamt 95 Messstrecken die Dehnungen beobachtet wurden [3], [5]. Im Frühjahr 1987 erstellte man fünf Bohrungen mit einer Gesamtlänge von 260 m und rüstete sie mit 39 Piezodexmessabschnitten aus. Nach einem Jahr Beobachtungszeit wurden zwei weitere Bohrungen von je 50 m Länge quer zum Messquerschnitt abgeteuft und mit total 15 Messabschnitten versehen. Die Zeitintervalle zwischen den Ablesungen waren unterschiedlich: Anfänglich alle 10 bis 15 m Seespiegeländerung, nahm man später nur noch je eine Ablesung bei minimalem und maximalem Seestand vor; stets wurde dabei auch eine Gleitmikrometerablesung durchgeführt. Nach Abschluss des Forschungsprojektes beschloss man, die vorhandene Instrumentierung weiterhin zu nutzen. Mit zwei Ablesungen pro Jahr wird seither das Langzeitverhalten der Felsfundation beobachtet und die Wirksamkeit der früher vorgenommenen Abdichtungsmassnahmen überwacht. Das beobachtete Verhalten der Talsperre entspricht den Erwartungen und gibt zu keinerlei Bedenken Anlass.

Die Ergebnisse der umfangreichen Feldarbeit wurden in verschiedenen Arbeiten festgehalten [3], [6], [7]. Es wurde Wert darauf gelegt, das vollständige Beobachtungsmaterial unvoreingenommen und ohne jegliche Vermischung mit eigenen Interpretationsversuchen im Hinblick auf zukünftige theoretische Studien Interessenten zugänglich zu machen. Jedem Messwert ist ein bestimmter Ort, ein gegebener Zeitpunkt der Ablesung und die exakte Seespiegelhöhe zugeordnet. Diese Daten lassen sich auf verschiedene Arten darstellen.

In Bild 8 sind für drei Messstellen die Druckhöhen gemeinsam mit der jeweiligen Seespiegelhöhe in Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die Druckhöhen resp. Potentiale wurden dabei unter Verwendung der Höhenlage der jeweiligen Messmarke aus dem abgelesenen Druck umgerechnet. Die Höhenlage der Messmarke leitet sich aus der Höhe z des Bohrlochmundes, der Tiefenlage der Messmarke (entlang des Bohrlochs gemessen) und der Bohrlocheinigung ab. Im Juni 1987 wies das Staubecken wegen Unterhaltsarbeiten an der Neoprenabdichtung einen besonders tiefen Stand auf. In Bild 8a folgt die Druckhöhe dem Verlauf des Seespiegels, wobei die Genauigkeit und Verlässlichkeit über den gesamten Beobachtungszeitraum von 9 Jahren bemerkenswert ist. Je nach Lage der Messstelle ist die Beziehung zwischen der zeitlichen Variation der gemessenen Potentiale und der Seespiegelhöhe völlig unterschiedlich. In Bild 8b sind die Messwerte einer andern, weiter luftwärts gelegenen Messstelle dargestellt. Obschon sie rund 30 m unterhalb der Gründungsfuge liegt, ist der Einfluss der Seespiegelschwankungen immer noch deutlich erkennbar. Ab 1992 zeigen die Druckhöhen bei Erreichen des Stauziels eine leicht sinkende Tendenz auf. Vollständig anders ver-

halten sich die Messwerte an einer dritten Stelle (Bild 8c): Hier steigen sie bis 1989 kontinuierlich an, um später auf einer bestimmten Druckhöhe zu stagnieren [7].

Piezometrische Messwerte werden zwar in genau bestimmten Punkten eines Bohrlochs abgelesen, müssen aber dem ganzen, durch die benachbarten Packer definierten Messintervall zugeordnet werden. In Bild 9 sind die in einem Bohrloch gemessenen Drücke in Funktion der Bohrlochtiefe bei konstantem Seestand dargestellt. Aufgrund der Lage der Drucktransmitter und der Packer kann man die Druckwerte längs der offenen Bohrlochabschnitte mittels einer speziellen Darstellung angeben: Pro Messintervall ist ein die Neigung des Bohrlochs berücksichtigendes Parallelogramm aufgezeichnet, dessen Höhe je nach Schwankungsbreite der gemessenen Werte variiert. Die beiden Geraden zeigen einerseits den hydrostatischen Druck bei maximalem (A) resp. bei minimalem Seestand (B). Bei Vollstau ist augenfällig (Bild 9a), dass die Druckverteilung von Intervall zu Intervall ändert und nicht linear mit der Tiefe zunimmt. So ist beispielsweise der Druck in einer Tiefe von mehr als 20 m deutlich geringer als zwischen 10 und 20 m. Der höchste, exakt dem Seestand entsprechende Wasserdruck wird im Bohrloch tiefsten gemessen, der damit auf eine direkte Verbindung zum Seebecken hinweist. In einem anderen, weiter luftseitig angeordneten Bohrloch hat man bei minimalem Seestand die in Bild 9b dargestellte Druckverteilung gemessen. Auffallend sind dabei die drei Intervalle zwischen 15 und 30 m, welche nicht nur eine grössere Streuung der Werte, sondern auch einen über dem Seestand liegenden Druck zeigen. Dies kann auch bei einzelnen anderen Messstellen beobachtet werden.

Die grosse Anzahl der in der Messebene beobachteten Druckwerte gab den Anstoss, ein Potentialliniennetz zu konstruieren. Dazu wurde der ganze Bereich des Staumauerfundamentes in Dreiecke mit den Messmarken als Eckpunkte unterteilt, so dass die Summe aller Dreiecksseitenlängen minimal wurde. Den Seegrund und die Felsoberfläche unter der Staumauer betrachtete man ebenfalls als Ketten von Messwerten. Eine lineare Interpolation der gemessenen Druckhöhen innerhalb der Dreiecke führte zu den gesuchten Niveaulinien. Bild 10 stellt eine solche Potentialverteilung bei Vollstau dar. Die auffällige Ausrichtung und Verdichtung der Niveaulinien im Bereich des seeseitigen Staumauerfusses bedeutet, dass hier ein markanter Druckabbau stattfindet.

5. Kopplung der Gleitmikrometer- und Piezodexmessungen

Während die Piezodexablesungen auf die Messung des Potentialfeldes zielten, sollten die gleichzeitig stattfindenden Gleitmikrometerablesungen die aktiven Klüfte im Felsfundament überwachen. Um eine vermutete Korrelation zwischen den Druck- und Dehnungsmessungen zu bestätigen, wählte man für einzelne Messpunkte eine Darstellung der Beziehung zwischen Seespiegelhöhe und abgelesener Messgrösse. In Bild 11a ist die Dehnung der Messstrecke in 46 m Tiefe von Bohrung GM.1 (aktive Kluft S) in Funktion des Seestandes aufgetragen. Es fällt auf, dass die Steigung der Kurve bei einer Seespiegelhöhe von 2130 m einen markanten Knick aufweist und die Dehnungen bei fallendem Wasserspiegel höher sind als bei steigendem. Eine Gegenüberstellung derselben Beziehung für den Wasserdruck (Bild 11b) lässt erkennen, dass die Steigung der Kurve bei Seespiegeln über 2135 m ebenfalls deutlich ändert. Eine solch übermässige Erhöhung des Messwertes

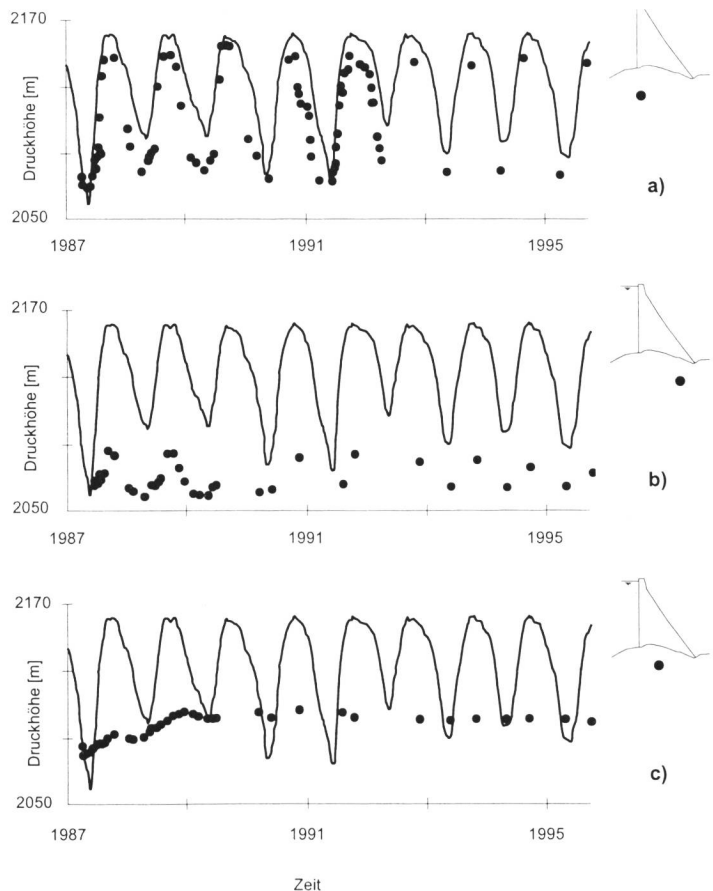


Bild 8. Seestand und gemessene Druckhöhen in Funktion der Zeit für drei verschiedene Drucktransmitter.

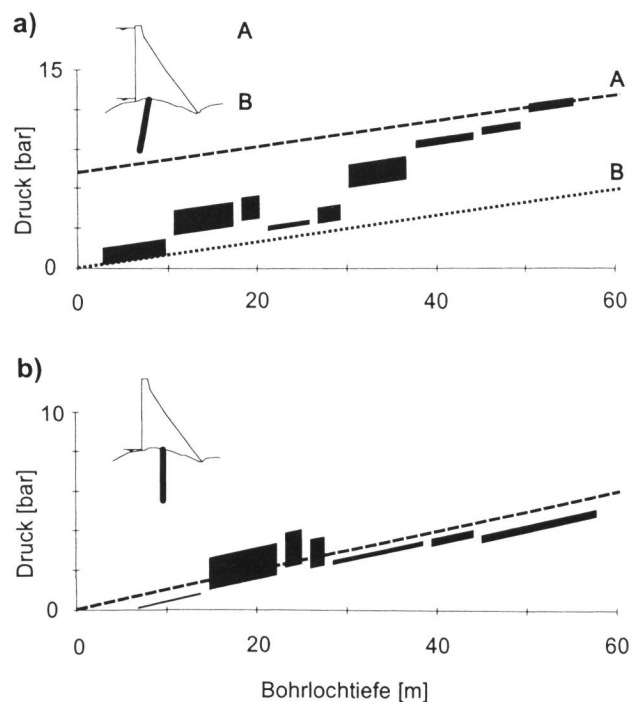


Bild 9. Schwankungsbreite der gemessenen Drücke in Funktion der Bohrlochtiefe für zwei verschiedene Bohrungen. Die beiden Geraden zeigen den hydrostatischen Druck bei maximalem (A) resp. minimalem Seestand (B). a) Messwerte bei maximalem Seestand in Bohrung PD.2. b) Messwerte bei minimalem Seestand in Bohrung PD.3.

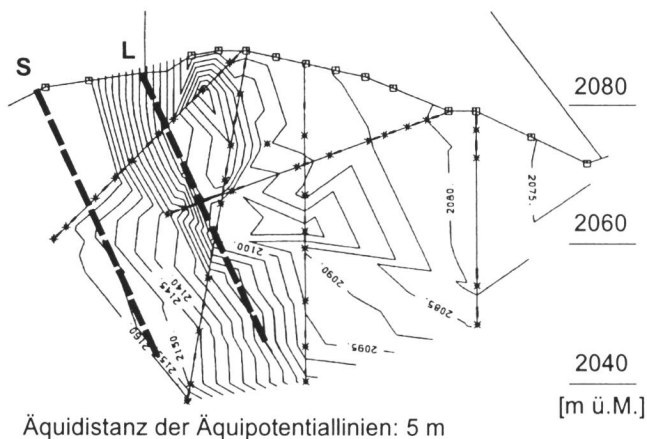


Bild 10. Aus den Piezodexmessungen konstruierte Potentiallinien bei einem Seestand von 2161 m ü.M. (Ablesung vom 17. Oktober 1988) [3].

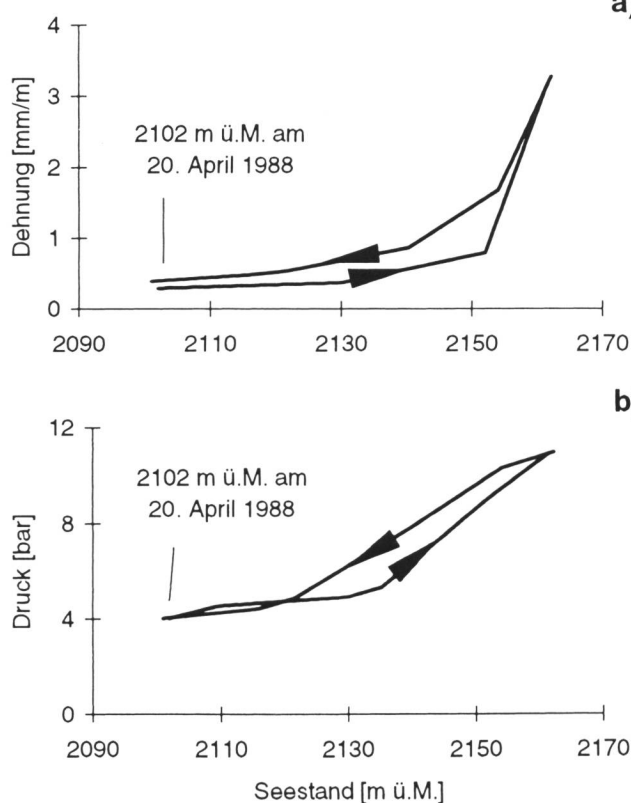
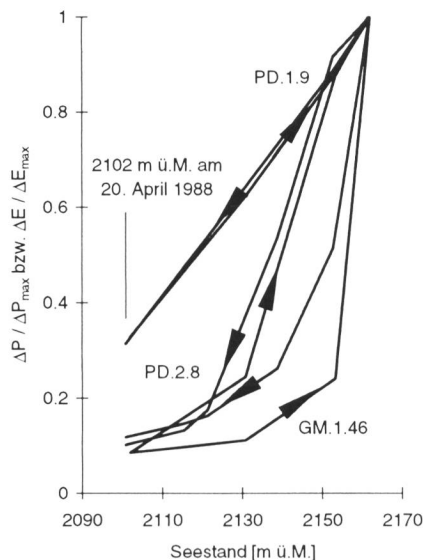


Bild 11. Zwischen April 1988 und Mai 1989 gemessene Werte für die Dehnung (a) resp. den Wasserdruck (b) in Funktion des Seestandes. Die Dehnung wurde in der Bohrung GM.1 in einer Tiefe von 46 m abgelesen, wo die Kluft S die Bohrlochachse schneidet. Die Wasserdrücke wurden an derselben Stelle gemessen wie bei Bild 8a.

lässt sich nur durch eine abrupte Veränderung der Durchlässigkeit erklären, die einzig durch das Öffnen von Klüften möglich ist. Bei zyklischer Seespiegeländerung beschreiben die Messwerte ebenfalls eine Hysteresiskurve: Der bei einem bestimmten Seestand gemessene Druck ist beim Absenken deutlich höher als beim Aufstau.

In Bild 12 werden zum Vergleich für dieselbe Zeitperiode jene Abschnitte der Gleitmikrometerbohrung GM.1 und Piezodexbohrung PD.1 resp. PD.2 dargestellt, welche sich im Bereich der aktiven Kluft S befinden. Die Gerade für die Messstelle in PD.1 bestätigt, dass hier die Kluft permanent



a) Bild 12. Wechselwirkung zwischen der Kluftöffnung in GM.1 (46 m tief) und dem Wasserdruck an zwei verschiedenen Messstellen in dimensionsloser Darstellung.

offen ist und stets den hydrostatischen Wasserdruck entsprechend dem jeweiligen Seestand anzeigt. Die dimensionslosen Drücke bzw. Dehnungen der übrigen zwei Messstellen weisen folgende interessante Übereinstimmung auf: Bei einer Seespiegelhöhe von 2130 m ist ein markanter Knick festzustellen, wobei die gemessenen Dehnungen in GM.1 langsamer ansteigen als die Wasserdrücke bei PD.2. Bei letzterer entspricht der gemessene Wasserstand ab einer Seespiegelhöhe von 2150 m ü.M. exakt dem Seestand. Zwischen Kluftöffnung und Kluftwasserdruck besteht folglich eine Wechselwirkung [8].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kombination der hydraulischen und mechanischen Beobachtung eine eindeutige Korrelation zwischen den Verformungen des Felsens und dem hydraulischen Potential zeigt. Ab einem bestimmten Seestand war in zwei aktiven Klüften am seeseitigen Mauerfuss sowohl ein starkes Ansteigen der Dehnungen als auch eine markante Erhöhung der gemessenen Wasserdrücke zu verzeichnen.

6. Rückrechnung

Aufgrund des vorliegenden umfassenden Beobachtungsmaterials erschien es vielversprechend, Rückrechnungen mit einem Finite-Element-Programm durchzuführen. Die beobachteten empirischen Daten sollten dabei in einen aktuellen theoretischen Rahmen gestellt werden. Ziel war es, die bei einem bestimmten Seestand gemessenen Potentiale durch verschiedene, klar begründete Modellannahmen rechnerisch zu reproduzieren. Die hydraulischen Eigenschaften sollten möglichst einfach, die Parameter möglichst homogen verteilt angenommen werden.

Als Berechnungsverfahren wurde das von Th. Arn (1989) im Rahmen seiner Dissertation entwickelte Finite-Element-Programm AQUA-ROCK verwendet [5]. Es ist in der Lage, sowohl die dreidimensionale Sickerströmung in einem porösen Kontinuum als auch in ein- und zweidimensionalen Gebirgsstrukturen zu erfassen. Die Wechselwirkung zwischen Hydraulik und Mechanik, d.h. die Erhöhung der Durchlässigkeit durch die Kluftöffnung, kann jedoch mangels überprüfbarer Stoffgesetze nicht berücksichtigt werden.

Entsprechend der dem Beobachtungsprogramm zugrunde gelegten Annahme einer ebenen Sickerströmung verwendeten Arn und Gmünder [3] für die Nachrechnungen

eine Scheibe mit Dicke 1 senkrecht zur Staumauerachse. Sie wurde so weit seitlich und nach unten ausgedehnt, dass die dortige Randbedingung nur einen geringen Einfluss auf die Druckhöhen im Bereich der Piezodexbohrungen ausübt. An der Felsoberfläche wurde das Potential seeseitig der Mauer entsprechend der Seespiegelhöhe eingeführt. Den Rand im Bereich der ersten 8 m seeseitig des Staumauerfusses sowie ein Teil der Kontaktfläche zwischen Beton und Fels betrachtete man aufgrund der dort wirksamen Neoprenabdichtung als undurchlässig. Bild 13 stellt die Geometrie, die Randbedingungen und Netzeinteilung des verwendeten Berechnungsmodells (800 Rechteckelemente mit Kantenlängen von rund 4 m) sowie die zwei Klüfte S und L dar.

Die Hauptmodellfälle ergaben sich durch die Natur der hydraulischen Grundannahmen, ihre Untervarianten durch Parametervariation. Sie wurden alle für drei verschiedene Seestände (2162 m ü.M., 2135 m ü.M., 2101 m ü.M.) durchgerechnet und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Hauptmodell 1: homogenes isotropes Kontinuum.
- Hauptmodell 2: Einzelklüfte S und L werden als gleichmässig verteilte, unbegrenzt ausgedehnte Kluftchar nach Snow idealisiert, die restlichen Klüfte durch eine senkrecht dazu stehende Nebenkluftchar kleinerer Durchlässigkeit. Die Vergrößerung der Kluftöffnungsweiten bei Vollstau wird durch eine Erhöhung des k -Wertes der Hauptkluftchar simuliert.
- Hauptmodell 3: homogenes isotropes Medium mit zwei Einzelklüften und Drainage D inkl. unterschiedlicher Transmissivitätswerte für die seeseitige Kluft S. Sie berücksichtigen die durch Gleitmikrometermessungen festgestellte Tatsache, dass die Durchlässigkeitsveränderungen infolge Seespiegelschwankungen hauptsächlich auf eine Öffnung der Kluft S zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der obengenannten Berechnungsfälle lassen sich direkt mit den Messwerten vergleichen, indem man entlang der Bohrungen sowohl den rechnerisch ermittelten Verlauf des Wasserdruckes als auch die gemessenen Werte mit ihrer trapezförmigen Darstellung in den Messintervallen aufträgt. Eine solche Darstellungsart hat den Vorteil, dass die Unterschiede zwischen den Modellen und den Messergebnissen genau lokalisiert werden können. Als Beispiel sind in Bild 14 alle drei Hauptmodellfälle für den maximalen Seestand aufgezeichnet.

Aus dem direkten Vergleich der Berechnungen mit den Beobachtungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Die gemessene Druckverteilung im Fels lässt sich nicht für alle Seestände mit demselben hydraulischen Modell bzw. bei

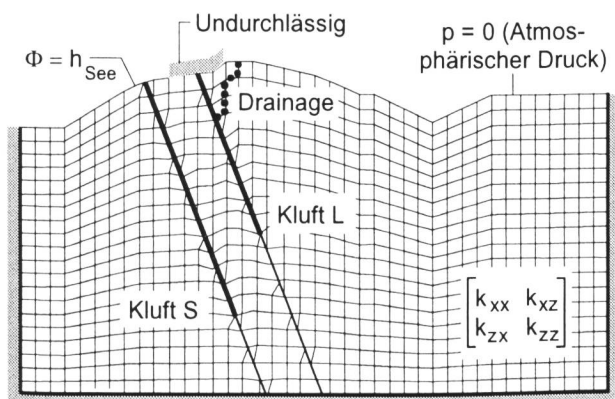


Bild 13. Geometrie, Randbedingungen und Netzeinteilung des Finite-Element-Modells inkl. der zwei aktiven Klüfte S und L [3].

□ Messresultate vom 17.10.1988
— Berechnungsergebnisse

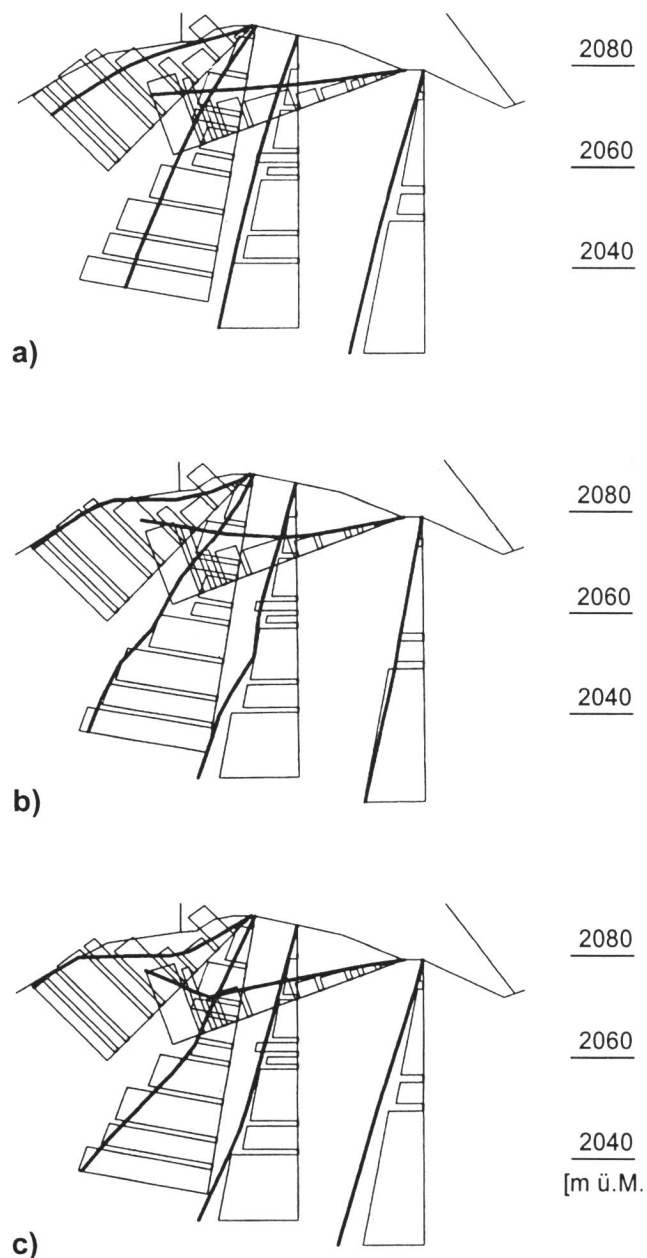


Bild 14. Vergleich der Mess- und Berechnungsergebnisse für drei verschiedene Modelle unter Vollstau (2162 m ü.M.): a) bei einem homogenen, isotropen Kontinuum, b) bei einem Kontinuum mit unbegrenzt ausgedehnten Kluftscharen, c) bei einem homogenen, isotropen Medium und den Klüften S und L [3].

Verwendung einheitlicher Durchlässigkeitsparameter zutreffend beschreiben. Die beobachteten Wasserdrucke konnten aber in ihrer Gesamtheit durch die Simulation der physikalisch plausiblen Faktoren (Einzelklüfte und ihre Durchlässigkeitsvergrößerung bei höheren Seeständen) im Modell rechnerisch nachgebildet werden. Für das Mass der Übereinstimmung spielte es dabei eine geringe Rolle, ob die beiden aktiven Klüfte als Einzelklüfte modelliert oder durch Einführung eines anisotropen Durchlässigkeitsstensors (unbegrenzt ausgedehnte Kluftchar nach Snow) berücksichtigt wurden; schon eine einfache Erweiterung des Grundmodells eines homogenen, isotropen porösen Mediums hat zu befriedigenden Ergebnissen geführt. Für

den minimalen Seestand ergaben die Hauptmodelle 1 und 2 ein vergleichbares Mass an Übereinstimmung; bei maximalen Seeständen hingegen ist eine gute Übereinstimmung mit den Hauptmodellen 2 und 3 festzustellen. Es gilt jedoch zu beachten, dass zur Berücksichtigung der Kluftöffnungen infolge des Seeaufstaus beim Hauptmodellfall 2 das Verhältnis der Durchlässigkeiten von Haupt- zu Nebenkluftchar bei vollem See um den Faktor 20 erhöht wurde. Beim Hauptmodellfall 3 vergrösserte man die Transmissivität der Kluft S bei Vollstau gegenüber derjenigen bei Minimalstau um den Faktor 5000.

7. Schlussfolgerungen

Am Beispiel der Staumauer Albigna konnte durch umfangreiche Langzeitbeobachtungen sowie eine Interpretation der Messdaten mit Hilfe numerischer Berechnungen ein tiefer Einblick in die Sickerströmung im geklüfteten Fels gewonnen werden. Die beiden verwendeten Messsysteme – das Gleitmikrometer und das Piezodex – haben während 16 resp. 9 Jahren den Nachweis für eine hohe Genauigkeit sowie Reproduzierbarkeit der Ablesungen erbracht. Die umfangreichen Beobachtungen bestätigen eindeutig, dass sich im geklüfteten Fels unter der Staumauer Albigna zwei durch Messungen mit dem Gleitmikrometer bereits früher festgestellte Einzelklüfte je nach Seespiegelhöhe öffnen oder schliessen. Ihre direkte hydraulische Auswirkung wurde erst durch die späteren Piezodexmessungen nachgewiesen.

Eine rechnerische Untersuchung mit einem Finite-Element-Programm wurde für drei verschiedene Hauptmodelle vorgenommen. Sie hat bekräftigt, dass die zwei aktiven Klüfte die Potentialverteilung im gesamten Fundationsbereich entscheidend beeinflussen. Schon ein visueller Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Potentiallinien lässt erkennen, dass die Aktivierung der beiden Klüfte durch Seespiegelschwankungen die Durchlässigkeitsverhältnisse im Fels massgeblich verändert.

Gleitmikrometer und Piezodex haben im Felsuntergrund der Staumauer Albigna unter Beweis gestellt, dass sie in begründeten Fällen sowohl als diagnostische Mittel als auch zur langfristigen Überwachung eines ausgewählten Fundationsbereichs dienen können. Beide Messsysteme sind in der Lage, durch linienhafte Beobachtung jenes Mass an Information zu liefern, welches für das tiefere Verständnis eines Mechanismus notwendig ist. Sie unterscheiden sich damit massgeblich von der häufig bevorzugten punktuellen Beobachtung und haben sich weltweit bei zahlreichen Staumauern (z. B. Kölnbrein) bewährt [9].

Verdankung

Das Forschungsprojekt wurde von der Kommission zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Eidg. Volkswirtschaftsdepartement, Bern) sowie der Nationalen Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra, Baden) finanziert. Die Arbeit wurde im weiteren massgeblich vom Ingenieurbüro für bauliche Anlagen der Stadt Zürich (IBA) gefördert. Die Verfasser möchten allen Beteiligten für die wertvolle Unterstützung ihren verbindlichen Dank aussprechen.

Literaturnachweis

- [1] Kovári, K.; Peter, G. (1983): Continuous strain monitoring in the rock foundation of a large gravity dam. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16 (3).
- [2] Kovári, K.; Amstad, Ch. (1983): Fundamentals of deformation measurements. *Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics*, Zurich, September 5–8.
- [3] Kovári, K.; Arn, Th.; Gmünder, Ch. (1989): Groundwater flow through fissured rock: field investigations and interpretation in the Albigna dam area, Graubünden, Switzerland. *Nagra Technical Report 90-10*, Baden, Switzerland, November 89.

[4] Kovári, K.; Köppel, K. (1987): Head distribution monitoring with the sliding piezometer system "Piezodex". *Field Measurements in Geomechanics*, Kobe, Japan, April 87.

[5] Arn Th. (1989): Numerische Erfassung der Strömungsvorgänge im geklüfteten Fels. Dissertation, ETH Zürich, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Fels- und Untertagebau, Mitteilung 1/89.

[6] Bergamin, St.; Kovári K. (1993): Staumauer Albigna: Resultate der Piezodex- und Gleitmikrometermessungen. ETH Zürich, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagebau (interner Bericht).

[7] Bergamin, St.; Kovári, K. (1995): Staumauer Albigna: Resultate der Piezodex- und Gleitmikrometermessungen. ETH Zürich, Institut für Geotechnik, Professur für Untertagebau (interner Bericht).

[8] Kovári, K.; Bergamin, St. (1994): Joint opening and head distribution in the foundation rock of the Albigna Gravity Dam. *Proc. Seventh Int. Cong., Lisboa, Portugal*.

[9] Kovári, K.; Fritz, P. (1989): Re-Evaluation of the Sliding Stability of Concrete Structures on Rock with Emphasis on European Experience. *Department of the Army, US Army Corps of Engineers, Washington, DC*.

Adresse der Verfasser: Kalman Kovári, Prof. Dr.; Stefan Bergamin, dipl. Ing. ETH; Institut für Geotechnik, Professur für Untertagebau, Postfach 133, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

Überarbeitete Fassung eines Vortrages, welcher an der Fachtagung «Recherche dans le domaine des barrages – Fondation des barrages» der ETH Lausanne im Oktober 1996 in Lausanne gehalten wurde.

Henri de Pitot (1695–1771)

Wie lässt sich die Geschwindigkeit von fliessendem Wasser messen? Diese Frage hat de Pitot als erster in einfacher Weise gelöst, indem er 1732 ein rechtwinklig gebogenes Rohr in die Strömung führte. Die lokale Geschwindigkeitshöhe entspricht dann der Erhebung des Wasserstands im Rohr über der freien Oberfläche resp. über dem Druckniveau. Dieses hydraulische Prinzip ist so einfach und sicher, dass es heute beispielsweise bei Flugzeugen immer noch Anwendung findet. Die ursprüngliche Bauart wurde von Darcy (1858) und von Prandtl-Blasius (1909) massgeblich verbessert.

Die weiteren Arbeiten de Pitots betreffen Wasserbauten und Wasserkraftmaschinen. So hat er etwa den Wirkungsgrad von Wasserrädern bestimmt oder die Kraft auf schiefe Flächen durch einen Wasserstrahl ermittelt. Durch diese Leistungen wurden ihm die Türen zur Académie des Sciences in Paris und zur Royal Society in London geöffnet. Bis heute ist der Name *Pitotrohr* für den damals bekannten Mathematiker, Astronomen, Mechaniker, Architekten und Ingenieur geblieben. WHH



De Pitot, H. (1732): Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*: Paris.

Kirby, R. S. (1939): Henri Pitot, pioneer in practical hydraulics. *Civil Engineering* 9 (12): 738–740.

Humbert, P. (1953): L'œuvre mathématique d'Henri Pitot. *Revue d'Histoire des Sciences* 6: 322–328.

Chevray, R. (1969): A man of hydraulics: Henri de Pitot. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 95 (HY4):1129–1138.