

Präzisions- Verformungsmessung bei grossen Talsperren

La mesure des déformations de haute précision dans les grands barrages

High Precision Deformation Measurements in Large Dams

Arno Thut

Arno Thut

Arno Thut

1. Problemstellung

Bei der Erstellung und Überwachung von grossen Talsperren besteht das Bedürfnis, die Verformungen im Fundationsbereich und auch im Betonkörper genau zu erfassen. Im Gegensatz zu punktuellen Beobachtungen, bei denen beispielsweise eine Verschiebungskomponente oder eine Dehnung in isolierten Punkten des Tragwerkes gemessen werden, bietet das Konzept der linienweisen Beobachtung [1] ausserordentliche Vorteile. Unter linienweiser Beobachtung verstehen wir die Messung der lückenlosen Verteilung von Deformationsgrössen entlang einer Messlinie, zum Beispiel eines Bohrloches.

Zur konsequenten Verwirklichung von linienweisen Beobachtungen höchster Präzision wurden das Gleitmikrometer und das Trivec von K. Kovári und seinen Mitarbeitern an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Sektion Fels- und Untertagebau, entwickelt. Sie wurden anderswo ausführlich beschrieben [2], [3]. Es

1. Présentation du problème

La nécessité de mesurer exactement les déformations dans la fondation et dans le béton des grands barrages est incontestée. Au contraire, des observations ponctuelles où les composantes de la déformation, ou bien la déformation différentielle sont mesurées dans des points isolés, la méthode de l'observation sur une ligne apporte des avantages remarquables [1]. Sous l'expression, «observation sur une ligne», nous comprenons des mesures de déformations continues le long d'une ligne ou dans un forage.

Pour réaliser de façon conséquente l'observation continue des déformations, le micromètre de forage et le Trivec ont été développés par K. Kovári et ses collaborateurs à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, Département de Mécanique des Roches et Travaux Souterrains. Ils sont décrits par ailleurs en détail, [2], [3]. Seul l'essentiel de ces nouveaux instruments est présenté ici. Un tubage en PVC est installé et cimenté dans un forage (figure 1). Des sièges coniques de mesure sont fixés au tubage avec un écartement régulier de 1 m. La cimentation du tube de mesure et des cônes permet à ceux-ci de suivre les défor-

1. Introduction

In the construction and monitoring of large dams there is a need to measure accurately deformations both in the rock foundation and in the dam itself. In contrast to pointwise observations, in which for example a displacement component or a strain is measured at isolated points in the structure, the concept of linewise observation offers great advantages [1]. By linewise observation is meant the measurement of the complete distribution of deformation values along a measuring line, e.g. along a borehole.

In order to perform linewise observations in a consistent way, the sliding micrometer and Trivec were developed by Prof. K. Kovári and his co-workers at the Department of Rock Engineering and Tunnelling at the Federal Institute of Technology, Zurich. These instruments are described in detail in various publications [2], [3]. Here only the essentials of these new instruments are described. For both instruments a PVC

Bild 1. Gleitmikrometer und Trivec.
A Im Bohrloch einzementiertes Messrohr
1 kegelförmige Messmarken, 2 HPVC-Verrohrung,
3 Injektionsgut, 4 Fels, Beton oder Lokergestein
B 5 Gleitposition, 6 Messposition

Figure 2. A Portable sliding micrometer in measuring position.
B Measuring principle for sliding micrometer and Trivec, 1 tube with measuring marks, 2 stepwise insertion of the instrument.

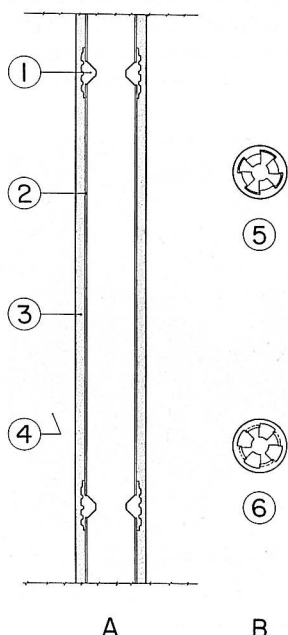
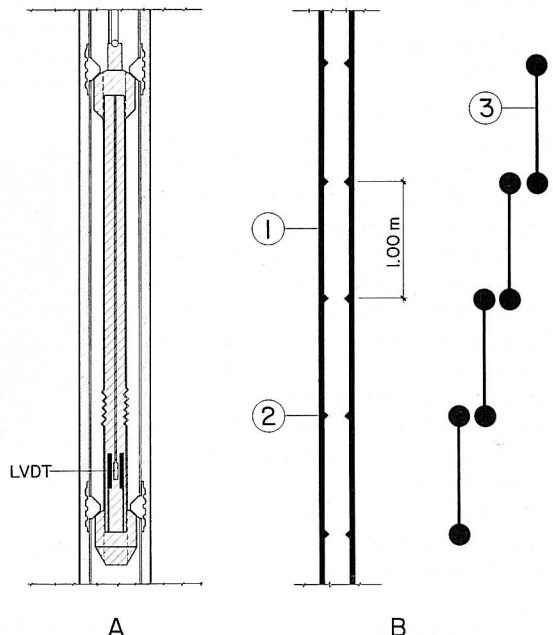


Figure 1. Micromètre de forage et Trivec.
A Tube de mesure cimenté dans forage
1 siège conique de mesure, 2 tube en HPVC,
3 cimentation, 4 béton, rocher ou sols
B 5 position d'introduction, 6 position de mesure

Figure 1. Sliding micrometer and Trivec.
A Measuring tube installed into borehole:
1 cone shaped measuring marks, 2 HPVC tube,
3 grout, 4 rock, concrete or soil.
B 5 sliding position, 6 measuring position.

Bild 2. A Portables Gleitmikrometer in Messposition
B Messverfahren für Gleitmikrometer und Trivec
1 Messverrohrung mit Messmarken, 2 schrittweises Setzen der Sonde

Figure 2. A Micromètre de forage portable en position de mesure.
Figure 2. B Procédé de mesure pour micromètre de forage et Trivec.
1 tubage avec cône de mesure, 2 positions de la sonde



soll hier nur das Wesentliche dieser neu konzipierten Instrumente herausgestellt werden. In einem Bohrloch wird eine PVC-Verrohrung versetzt und eingemörtelt (Bild 1). In regelmäßigen Abständen von 1,0 m ist sie mit Messmarken bestückt. Durch die Verbindung des Messrohres mit dem Fels übernehmen die Messmarken die Verformungen des umgebenden Mediums. Die Messmarken sind so ausgebildet, dass ein portables Instrument in der Länge von ebenfalls einem Meter, mit höchster Präzision gesetzt (Bild 2 A), und die entsprechenden Messwerte reproduzierbar ermittelt werden können. Während der Ausmessung des Bohrloches gleitet die Sonde durch das Messrohr und wird schrittweise Meter für Meter in den Messmarken gesetzt (Bild 2 B), bis alle durch die Messmarken definierten Messstrecken abgelesen sind. Erfahren die Messmarken zwischen zwei zeitlich getrennten Messungen eine gegenseitige Verschiebung, so zeigt sich dies als Differenz von zwei Ableisungen.

Das Gleitmikrometer (Bild 3), eine portable und robuste Sonde, kann in beliebig gerichteten Bohrungen bis zu Längen von über 100 m eingesetzt werden. Die Messgenauigkeit beträgt $3 \mu\text{m}$ pro Meter, oder in Dehnung ausgedrückt $3 \cdot 10^{-6}$.

Das Trivec stellt im wesentlichen ein Gleitmikrometer dar, das zusätzlich mit einem Klinometersensor versehen ist. Damit erhält man in lotrechten Bohrungen den Verlauf der orthogonalen Verschiebungskomponenten. Portable Eichvorrichtungen können die Funktionstüchtigkeit und die Präzision der Instrumente über Jahre hinweg jederzeit bestätigen.

2. Anwendungen im Talsperrenbau

Im Beton, und selbst in einem massigen, harten Fels, dessen globaler E-Modul 20 000 bis 40 000 N/mm² beträgt, können Dehnungen, welche durch die Spannungsänderungen von weniger als 0,1 N/mm² entstehen, Meter für Meter entlang einer Bohrung bereits erfasst werden. Mit dem Trivec lässt sich zusätzlich die Verteilung der Horizontalverschiebungen, zum Beispiel im Fundationsbereich, ermitteln. Solche lückenlosen Beobachtungen der Verschiebungen geben wichtige Hinweise über die Verformbarkeit des «in situ»-Felsmaterials und -Betons, über die Öffnung und Schliessung vorhandener Risse und Klüfte. Mit der

mations du matériau encaissant. La forme des cônes de mesures assure la pose de la sonde mobile, d'une longueur d'un mètre, avec une haute précision (figure 2 A) et garantit également que les valeurs de mesures correspondantes sont reproductibles. Pour ausculter un forage, la sonde est introduite à l'intérieur du tube et installée tous les mètres (figure 2 B) jusqu'à ce que toutes les stations aient permis une lecture. Si entre deux mesures répétées après un certain temps les cônes ont subi un déplacement, celui-ci est enregistré comme différence des deux lectures.

Le micromètre de forage (figure 3), une sonde mobile et robuste, peut être mis en service dans des forages inclinés en toutes directions, jusqu'à des longueurs supérieures à 100 m. La précision de mesure est de $3 \mu\text{m}$ ou exprimée en déformation différentielle $3 \cdot 10^{-6}$.

Le Trivec est essentiellement un micromètre de forage, équipé avec un clinomètre. Ainsi on détermine dans des forages verticaux, les composantes orthogonales des déformations. Des dispositifs d'étalonnages permettent pour chaque appareil de vérifier le bon fonctionnement et de contrôler la précision des instruments.

2. Applications dans la construction des barrages

Dans le béton et de même dans un rocher sain, avec des modules d'élasticité moyens entre 20 000 et 40 000 N/mm², les déformations différentielles dues à un changement de contrainte de moins de 0,1 N/mm² peuvent être mesurées mètre par mètre le long d'un forage. En plus, avec le Trivec, le développement des déformations horizontales dans la fondation du barrage peut être étudié, entre autre. De telles observations intégrales don-

tube is introduced into a borehole and cemented in place (figure 1). The tube is fitted with measuring marks at regular intervals of 1.0 m. As a result of cementing the measuring tube to the rock the deformation of the surrounding medium is transmitted to the measuring marks. The measuring marks are so constructed that a portable instrument also of 1.0 m gauge length may be placed in position with a very high precision (figure 2A), allowing reproducible measurements to be made. The measurements are carried out by sliding the instrument along the tube, inserting it stepwise in the measuring positions at 1.0 m intervals (figure 2 B) until all the sections defined by the measuring marks have been measured. If there is a difference between two readings taken at different times, this indicates a relative movement between the two measuring marks.

The sliding micrometer (figure 3) is a robust, portable strain measuring instrument, which can be installed in boreholes of arbitrary direction to a length of over 100 metres.

The Trivec probe is similar to the sliding micrometer, but is fitted in addition with a clinometer sensor and it is suitable for use in vertical boreholes. With this instrument it is possible to measure the distribution of an orthogonal set of displacement components.

The proper functioning and precision of the instruments can be checked at any time over a period of years by means of portable calibration devices.

2. Application in dam engineering

In concrete and even in a massive hard rock with a global Young's Modulus E amounting to 20 000 to 40 000 N/mm², it is possible to measure metre by metre along a borehole strains re-

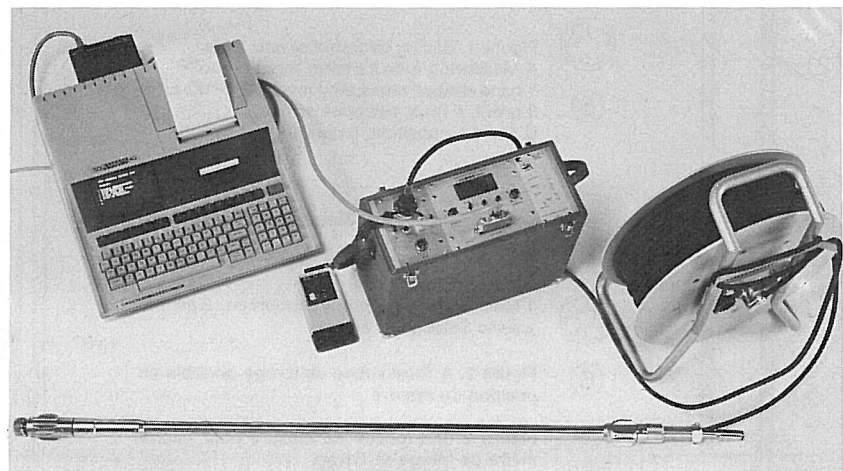


Figure 3. Micromètre de forage.

Figure 3. Sliding micrometer.

Bild 3. Gleitmikrometer

Messung der Verformungen in der Bauphase infolge Felsabtrags und anschliessend infolge Eigengewichts der Sperre können deshalb Schwächezonen frühzeitig lokalisiert werden. Die Messungen in den Einstau- und Absenkphasen in der Felsfundation und in der Betonmauer erlauben eine genaue Untersuchung des Verformungsverhaltens der Sperre. In den folgenden Kapiteln sind die Resultate solcher Untersuchungen mit den neu konzipierten Instrumenten an drei Talsperren kurz erläutert.

Über weitere zwei Anwendungen der Dehnungsmessungen mit dem Gleitmikrometer bei grossen Talsperren wird in den Veröffentlichungen des ICOLD 1985, Lausanne, berichtet. Es handelt sich dabei um die Erhöhung bestehender Gewichtsmauern mit Vorspannkern (Vaal Dam, Südafrika), bei denen die Kenntnis der Dehnungsverteilung im Beton- und Fundationskörper über lange Zeit von Bedeutung ist [4], sowie um eine Untersuchung über die thermische Rissbil-

dent des indications importantes sur la déformabilité du rocher ou du béton, et sur l'ouverture et la fermeture de fissures et diaclases existantes. La mesure des déformations pendant les phases d'excavation et ensuite lors de l'application du poids propre du barrage, signale la présence de zones affaiblies. Les mesures dans le rocher de fondation et dans le béton lors du remplissage ou de la vidange permettent une analyse exacte du comportement du barrage. Les résultats de telles études exécutées sur trois barrages au moyen de la nouvelle génération d'instruments sont brièvement donnés dans les chapitres suivants.

On trouvera deux autres applications de mesures avec le micromètre de forage dans les comptes rendus de ICIGB 1985, Lausanne. Il s'agit du problème de la surélévation de barrages-poids existants (Vaal Dam, Afrique du Sud), pour lesquels la connaissance de la répartition des déformations à long terme dans le béton et la fondation a une importance particulière [4]. Dans

sulting from stresses of less than 0.1 N/mm^2 . The Trivec probe also permits measurement of the distribution of horizontal displacements, e.g. in the rock foundation.

Such continuous observations of deformation provide important information on the deformational behaviour of the in situ rock and concrete materials as well as the opening and closure of existing cracks and joints. By measuring deformations in the constructional phase due to rock excavation and subsequently due to the self-weight of the dam, zones of weakness may be localized at an early stage. Measurements taken in the rock foundation and the dam during the reservoir filling and emptying periods enable a good picture of the deformational behaviour of the dam to be obtained. The following chapters illustrate briefly such results for three dams.

Further, two applications of strain measurements using the sliding micrometer at large dams are discussed in the Transactions of ICOLD

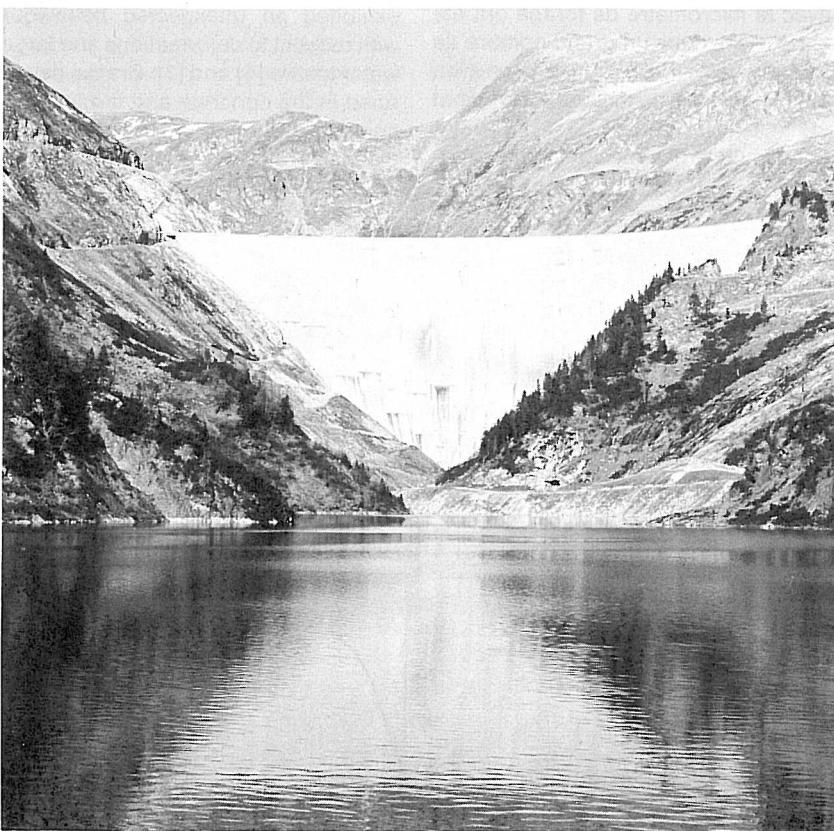


Bild 4. Kölnbrein, Bogenstaumauer

Figure 4. Kölnbrein, barrage-voûte.

Figure 4. Kölnbrein, arch dam.

Bild 5. Kölnbrein, Bogenstaumauer, Block 18. Gleitmikrometer, Ergebnisse der Messungen.

A Dehnungsverteilung infolge Einstaus, Verlängerung der Messstrecken
B Dehnungsverteilung infolge Absenkens, Verlängerung der Messstrecken

Figure 5. Kölnbrein, barrage-voûte, bloc 18. Micromètre de forage, résultats des mesures.

A Développement des déformations différentielles de tractions au remplissage
B Développement des déformations différentielles de traction à la vidange

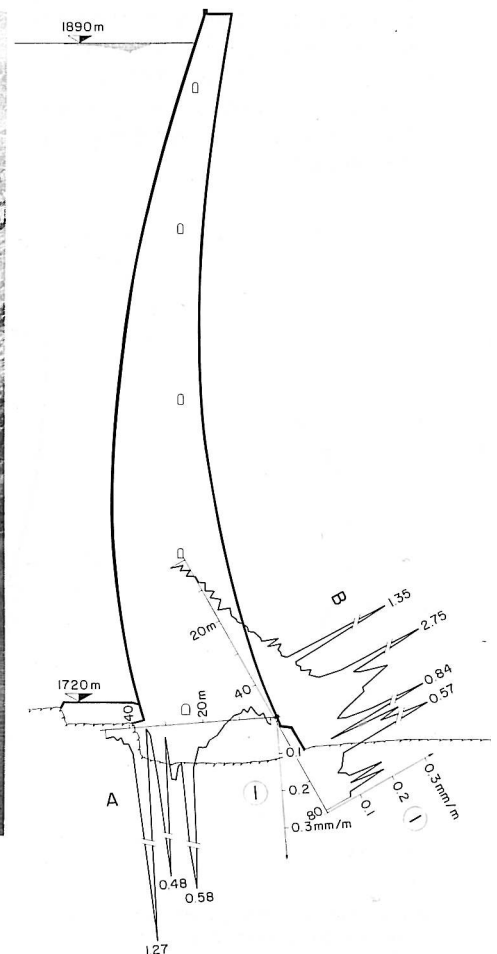


Figure 5. Kölnbrein, arch dam, block 18. Sliding micrometer, measuring results.

A Strain distribution due to reservoir filling, extension strain.
B Strain distribution due to reservoir emptying, extension strain.

dung bei Massenbeton in der Bau-phase (Zillergründl, Österreich [5]). Hier wurden mit dem Gleitmikrometer die Verteilungen der Verformungen des frischen und abgebindenen Betons über die gesamte Mauerbreite in Abhängigkeit der Temperaturen ermittelt.

2.1 Kölnbreinsperre, Bogenmauer, Österreich

Die Kölnbreinsperre der Draukraftwerke Klagenfurt, Österreich (Bild 4) mit einer maximalen Kronenhöhe von 200 m und einer Spannweite von 620 m, ist auf der rechten Talflanke auf massivem Gneis und auf der linken Flanke, getrennt durch ein Band kristallinen Schiefers, auf Platten-Gneis fundiert.

Die Mauer wurde 1977 fertiggestellt und schon ein Jahr zuvor teilweise eingestaut. Während der folgenden Jahre zeigte die Staumauer ein unerwartetes Verhalten bezüglich der Verformungen und hohe Wasserverluste [6], [7]. Es bildeten sich Risse im Beton und im Fels der Fundation. Im Rahmen einer umfassenden Instrumentierung wurde mit dem Gleitmikrometer die Dehnungsverteilung entlang zahlreichen Bohrungen erfasst. Seit den Jahren 1982 bis 1985 wurden im gesamten 1250 m Messrohre für das Gleitmikrometer installiert.

l'autre cas traité (Zillergründl, Autriche), il s'agit d'une étude sur la fissuration d'origine thermique dans le béton de masse en phase de construction [5]. Le micromètre de forage a été appliqué à la mesure du développement des déformations différentielles du béton frais et du béton après prise à travers le barrage, en fonction des températures.

2.1 Kölnbrein, barrage-voûte, Autriche

Le barrage de Kölnbrein (figure 4), des «Draukraftwerke Klagenfurt», a une hauteur de 200 m et un arc de 620 m, il est fondé rive droite, sur du gneis massif et rive gauche, séparé par un banc de schiste cristallin, sur du gneis en plaquette.

Les travaux de construction ont pris fin en 1977, un remplissage partiel ayant déjà eu lieu l'année précédente. Au cours des années de service suivantes les déformations du barrage ont révélé des anomalies et de grandes pertes d'eau ont été observées [6] et [7]. Dans le cadre d'une instrumentation intensive, des mesures de déformations avec le micromètre de forage ont été entreprises dans un grand nombre de forages. De 1982 à 1985 environ 1250 m de tube de mesure au total ont été installés.

Les résultats des mesures sont expo-

1985, Lausanne. The first concerns the raising of existing gravity dams with post-tensioned cables (Vaal dam, South Africa). Here the knowledge of the distribution of strains over long periods in the concrete and rock is of great importance [4]. The second example treats the problem of thermal cracking of mass concrete [5]. For this investigations the distributions of thermal expansion of fresh and hardened concrete across the dam were monitored with the sliding micrometer.

2.1 Kölnbrein arch dam, Austria

Kölnbrein dam is part of the Drau hydroelectric power scheme in Klagenfurt (figure 4) and has a maximum height of 200 m and a crest length of 620 m. The dam is founded on massive granitic gneiss in the right valley flank and separated by a highly schistose zone on platy schistose gneiss in the left flank.

The dam was completed in 1977, partial filling having already taken place a year earlier. During the subsequent years of reservoir filling the dam exhibited an unexpected behaviour with respect to deformations and large water losses [6] and [7]. Cracks developed in the concrete and the foundation rock. Within the framework of an extensive instrumentation the distri-

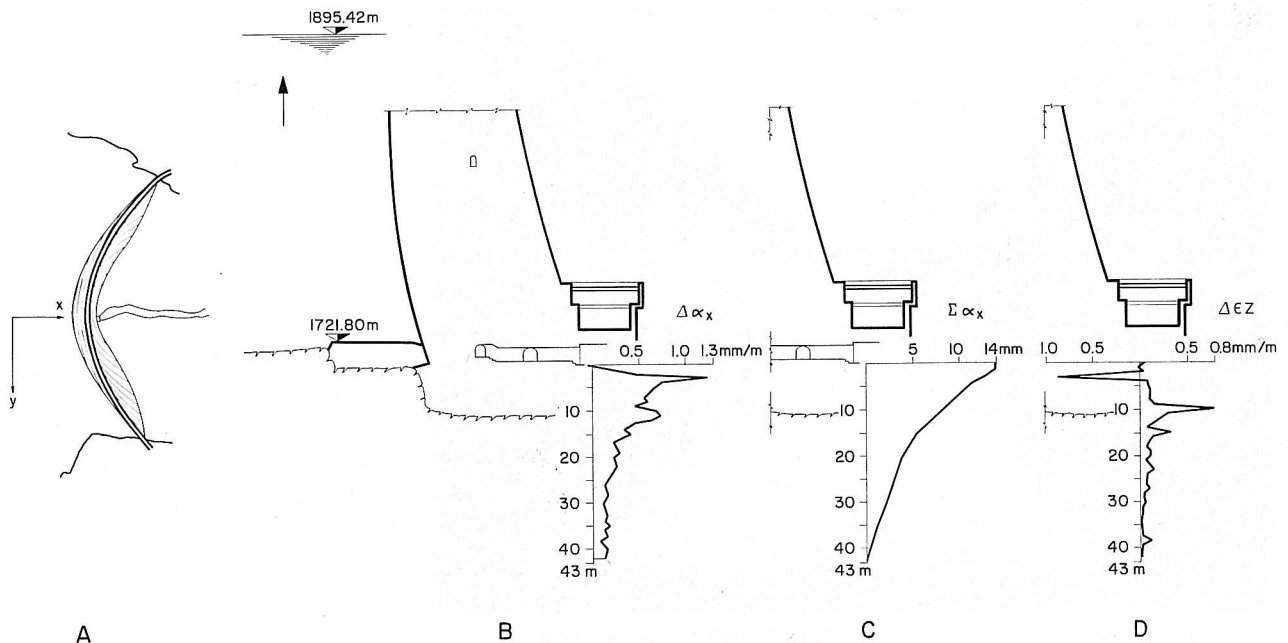


Bild 6. Kölnbrein, Bogenstaumauer, Block 17, Trivec, Ergebnisse der Messungen.

- A Grundriss mit x- und y-Achsen
- B Verteilung der differentiellen Horizontalverschiebungen $\Delta\alpha_x$
- C Verteilung der Horizontalverschiebungen $\Sigma\alpha_x$
- D Verteilung der differentiellen Verschiebungen $\Delta\epsilon_z$

Figure 6. Kölnbrein, barrage-voûte, bloc 17. Trivec, résultats des mesures pour remplissage.

- A Vue en plan avec x et y axes
- B Développement des déformations horizontales différentielles $\Delta\alpha_x$
- C Développement des déformations horizontales $\Sigma\alpha_x$
- D Développement des déformations différentielles verticales $\Delta\epsilon_z$

Figure 6. Kölnbrein, arch dam, block 17. Trivec, measuring results.

- A Orientation of x- and y-axis.
- B Distribution of horizontal displacements $\Delta\alpha_x$.
- C Lateral displacement $\Sigma\alpha_x$.
- D Distribution of vertical displacement $\Delta\epsilon_z$.

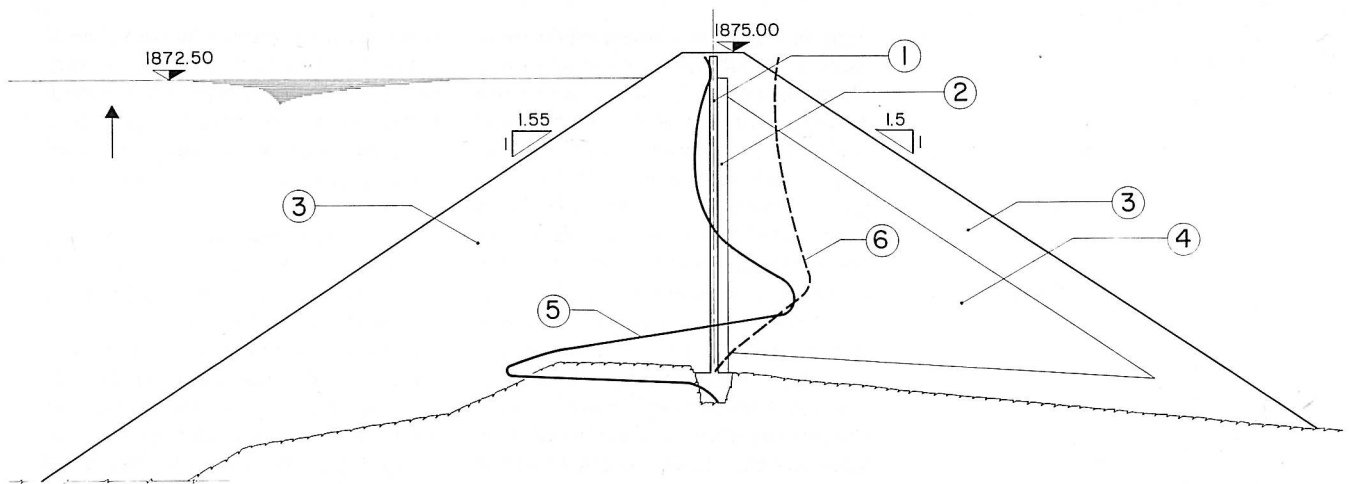


Bild 7. Bockhartsee, Erddamm mit Betonkern-dichtung.

1 Betonkern, 2 Stützkörper, 3 Drainage, 4 Moräne, 5 Verteilung der Krümmung, 6 Verteilung der Horizontalverschiebung

Figure 7. Bockhartsee, barrage en enrochement avec écran interne en béton.

1 écran interne en béton, 2 enrochement, 3 drainage, 4 moraine, 5 développement de la courbure, 6 développement des déformations horizontales

Figure 7. Bockhartsee, earth dam with concrete diaphragm core wall. 1 concrete core, 2 shells, 3 drainage, 4 moraine, 5 distribution of curvature, 6 lateral displacement.

Über die Messergebnisse wurde anderswo ausführlich berichtet ([8] und [9]). Typische Messresultate zeigt das Bild 5, in dem die Dehnungsverteilungen entlang zwei Bohrlochaxen im Block 18 aufgetragen sind. Ein Bohrloch ist subhorizontal und reicht vom luftseitigen Fuss bis in den wasserseitig liegenden Fels. Die ermittelte Dehnungsverteilung zeigt in Form starker Diskontinuitäten die Öffnung der Risse infolge Einstaus im wasserseitigen Bereich der Mauer. Das Bohrloch 2 vom Kontrollstollen aus gegen die Luftseite angeordnet, reicht mit einer Länge von etwa 80 m ebenfalls bis in den Fels. Die Verformungen sind bei dieser Messlinie für den Lastfall Absenken aufgetragen und zeigen das Öffnen von Rissen im Beton und in der Aufstandsfläche.

Im Block 17 wurde eine Messverrohrung für das Trivec ausgerüstet. Die Verteilung der differentiellen Horizontalverschiebungen α_x (Bild 6) und die Verteilung der Dehnungen ϵ_z verdeutlichen, dass die ausschlaggebenden Verschiebungen bis etwa 15 m unter die Aufstandsfläche auftreten. Ab dieser Tiefe ist eine deutliche Abnahme der differentiellen Horizontalverschiebungen zu beobachten.

2.2 Bockhartsee, Erddamm mit Betonkern als Innendichtung

Im Jahre 1982 wurde der Erddamm Bockhartsee durch die Salzburger AG für Elektrizitätswirtschaft (SAFE) erbaut (Bild 7). Im Rahmen eines Forschungsprojektes des Institutes für Boden- und Felsmechanik an der Universität Innsbruck kam eine neu konzipierte Innendichtung mit einem membranartigen Betonkern zur Anwendung [10]. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Entwicklung

sés en détails dans les publications [8] et [9]. Des mesures typiques pratiquées le long de deux forages dans le bloc 18 sont reproduites dans la figure 5. Un forage subhorizontal traverse le béton du pied aval du mur jusqu'au rocher en amont du barrage. Le développement des déformations montre par de fortes discontinuités, l'ouverture de fissures pendant la phase de remplissage du réservoir, surtout au pied amont du barrage. L'autre forage exécuté depuis la galerie de contrôle, incliné vers l'aval, atteint avec une longueur d'environ 80 m également le rocher de fondation. Les déformations différentielles mesurées montrent l'ouverture des fissures dans le béton et le rocher, due à la vidange du lac. Dans le bloc 17 un tubage de mesure pour le Trivec a été installé. La répartition des déformations horizontales différentielles α_x et également les déformations différentielles verticales ϵ_z le long du forage, dans le rocher, indique que les déplacements majeurs ont lieu jusqu'à la profondeur de 15 m environ (figure 6). En-dessous une forte diminution des déformations est à observer.

2.2 Bockhartsee, barrage en enrochement avec écran en béton

La Société hydroélectrique de Salzbourg (SAFE) a construit dans les années 1982/83 le barrage d'une hauteur de 31 m (figure 7). Dans le cadre d'un projet de recherche de l'Institut de Mécanique des Sols et Roches à l'Université d'Innsbruck, un nouveau procédé d'étanchement par un écran en béton a été réalisé [6]. Les recherches portaient sur le développement d'une couche glissante avec une membrane de bitume, pour diminuer l'effet de frottement négatif.

bution of strain was investigated in a number of boreholes using the sliding micrometer. Between 1982 and 1985 a total of 1250 m of measuring tube for the sliding micrometer was installed. A detailed presentation of the measurements is to be found in [8] and [9]. Some typical results are shown in figure 5 for the strain distributions along two borehole axes in block 18. One borehole is subhorizontal and extends from the downstream foot of the dam to the rock on the upstream side. The resulting strain distribution reveals the presence of marked discontinuities due to crack opening in the upstream area of the dam following reservoir filling. Borehole 2 drilled from the control gallery in the downstream direction has a length of about 80 m and also extends into the rock. For this measuring line the deformations are given for the case of reservoir emptying and show the opening of cracks in the concrete and the rock foundation area.

A measuring tube was installed in block 17 for the Trivec device. The distributions of the horizontal displacements α_x (figure 6 B) and the vertical displacement ϵ_z (figure 6 D) clearly show that the important deformations occur up to 15 m below the base of the dam. Below this depth a pronounced decrease of differential horizontal displacement is observed.

2.2 Bockhartsee earth dam, concrete core diaphragm wall

The embankment dam Bockhartsee was built in 1982 by the Salzburger Hydroelectric Company (figure 7). Within the framework of a research project at the Institute of Soil and Rock Mechanics at the University of Innsbruck a new form of core seal consisting of a

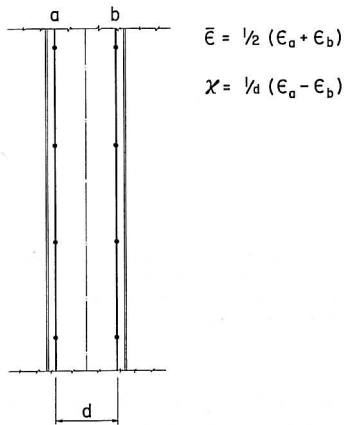
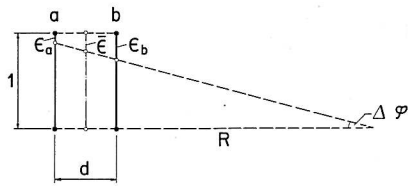


Bild 8. Ermittlung der axialen Dehnung und der Krümmung mit Hilfe der gemessenen Dehnungen ϵ_a und ϵ_b entlang den Fasern a und b .

Figure 8. Evaluation de la déformation différentielle et de la courbure à l'aide des déformations différentielles mesurées ϵ_a et ϵ_b le long des fibres a et b .

Figure 8. Determination of axial strain and curvature from the measured strains ϵ_a and ϵ_b along fibres a and b .

Dans une section d'observation de la paroi d'une épaisseur de 0,60 m des tubes de mesure pour le micromètre de forage ont été posés, côté amont et côté aval, pour étudier la sollicitation lors du remplissage du réservoir. La figure 8 montre les bases théoriques pour l'exploitation des résultats [11]. Les lignes de mesure a et b sont espacées d'une distance d . La déformation différentielle $\bar{\epsilon}$ se calcule par la valeur moyenne des quantités ϵ_a et ϵ_b , et la courbure par la différence des déformations différentielles. Avec l'hypothèse d'un comportement élastique du béton, le moment de flexion et par une double intégration de la courbure les déplacements horizontales peuvent être déterminés.

Les résultats des mesures au micromètre de forage sont reproduits dans la figure 9, il s'agit du développement des courbures et des déformations horizontales de l'écran en béton. Dans un puits voisin de la section de mesure au micromètre de forage la ligne de déformation horizontale a été mesurée directement avec un fil à plomb. Dans la figure 9 ces déformations des deux mesures sont comparées. La correspondance excellente entre les deux mesures indépendantes est une preuve

concrete diaphragm wall was investigated and tested in the Bockhartsee dam [10]. At the centre of the investigation was the development of a bituminous slip layer designed to reduce negative skin friction during construction.

During construction of the dam sliding micrometer measuring tubes were concreted in position in the 0.6 m thick core wall one on the upstream side and the other on the downstream side. They formed a measuring section for the purpose of investigating the stresses in the wall during reservoir filling. Figure 8 shows the theoretical basis for the evaluation of the structural behaviour of the wall [11], where a and b are a distance d apart. The axial strain $\bar{\epsilon}$ results from the average of the measured values ϵ_a and ϵ_b , while the curvature is obtained from their difference. Assuming elastic behaviour the bending moment and the horizontal displacement can be found by integrating twice the curvature of the deflection line.

Some results of the measurements obtained using the sliding micrometer are shown in figure 9, namely the distribution of curvature and the calculated horizontal displacement of the

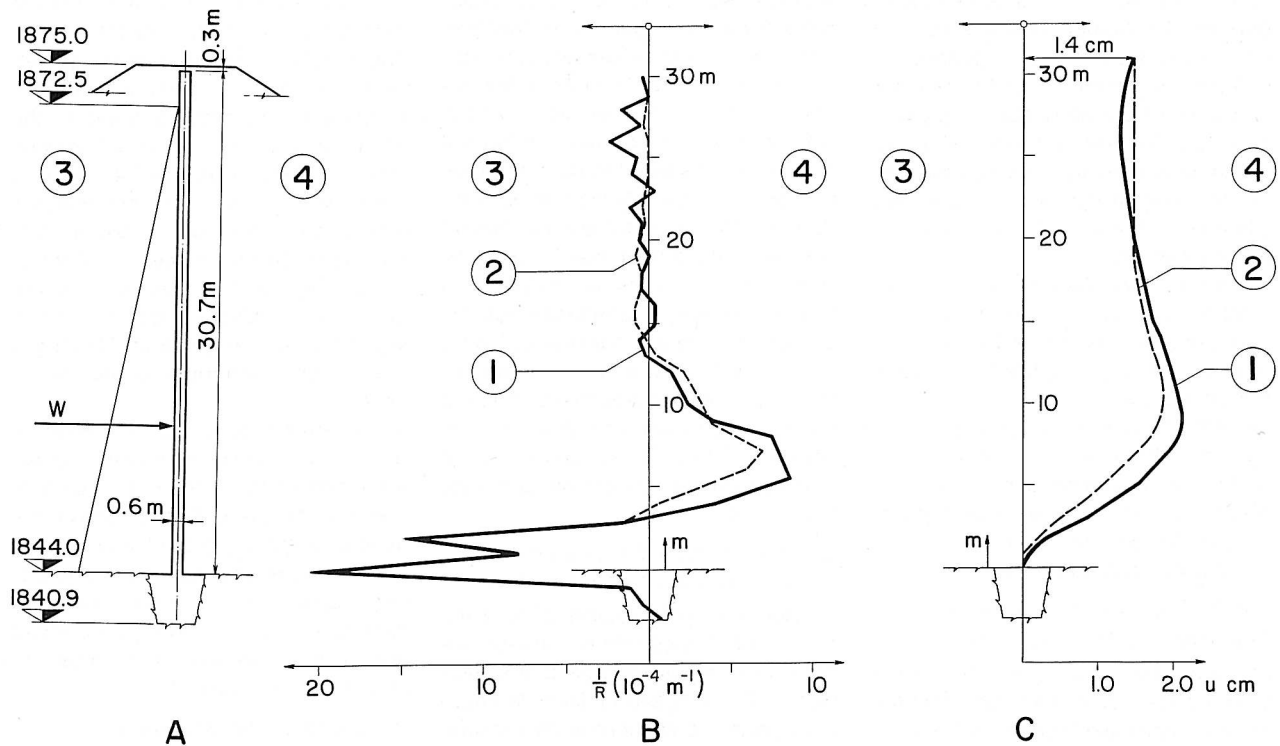


Bild 9. Bockhartsee, Erddamm mit Betonkerndichtung, Gleitmikrometer, Ergebnisse der Messungen.

A Querschnitt, Betonkern
B Verteilung der Krümmung
1 Gleitmikrometer, 2 Gewichtslot
C Verteilung der Horizontalverschiebung
1 Gleitmikrometer, 2 Gewichtslot, 3 wasserseits, 4 luftseits

Figure 9. Bockhartsee, barrage en enrochement, écran en béton, micromètre de forage, résultats des mesures [10].

A Section, écran en béton
B Développement de la courbure
1 micromètre de forage, 2 file à plomb
C Développement de la déformation horizontale
1 micromètre de forage, 2 file à plomb, 3 amont, 4 aval

Figure 9. Bockhartsee, earth dam with concrete core. Sliding micrometer, measuring results.

A Section through the concrete core.
B Distribution of curvature. 1 sliding micrometer, 2 hanging pendulum.
C Lateral displacement. 1 sliding micrometer, 2 hanging pendulum, 3 upstream side, 4 downstream side.

einer bituminösen Gleitschicht zur Verringerung der negativen Mantelreibung während des Baues.

In einem Messquerschnitt wurden in der 0,60 m starken Betonwand nahe der Luft- und Wasserseite je ein Gleitmikrometer-Messrohr während der Bauphasen direkt einbetoniert, um Aufschluss über die Beanspruchung der Mauer beim Einstau zu erhalten. Bild 8 zeigt die theoretischen Grundlagen für die Auswertung [11], die Messlinien *a* und *b* sind mit der Distanz *d* voneinander entfernt. Die axiale Dehnung $\bar{\epsilon}$ ergibt sich aus dem Mittelwert der gemessenen Werte ϵ_a und ϵ_b , und die Krümmung wird errechnet aus der Differenz der Dehnungswerte. Unter der Annahme eines elastischen Verhaltens des Betons können damit das Biegemoment und mit Hilfe einer zweimaligen Integration der Krümmungen die Biegelinie ermittelt werden.

Die Messresultate des Gleitmikrometers sind in Bild 9 enthalten. Es sind die Krümmungsverteilung und die berechneten Horizontalverschiebungen infolge Einstaus der Betonmauer dargestellt. Die Horizontalverschiebungen wurden zusätzlich mit einem Gewichtslot in einem dem Messquerschnitt nahe liegenden Schacht direkt gemessen. In der Abbildung sind die beiden unabhängig voneinander ermittelten Verschiebungen gegenübergestellt. Die äusserst gute Übereinstimmung bestätigt die hohe Messgenauigkeit des Gleitmikrometers.

2.3 Albigna, Gewichtsstaumauer, Schweiz

Die Staumauer Albigna der Industriel- len Betriebe der Stadt Zürich, erbaut 1956 bis 1959, hat eine maximale Kronenhöhe von 115 m und eine Kronenlänge von 760 m. Sie ist auf einem Granitriegel fundiert. Nach einem lang andauernden Stau im Jahre 1977 zeigten sich luftseits der Mauer kleine Wasser- austritte.

Um einen Aufschluss über die Verfor- mungen infolge Einstaus und Absen- kens zu erhalten, wurden in zwei Querschnitten Messlinien für das Gleitmikrometer in Bohrungen einge- baut. Für die eingehende Diskussion der Resultate soll auf die Publikation [12] verwiesen werden.

Im Bild 10 ist die Dehnungsverteilung entlang den Bohrungen im Fels infolge Absenkens des Stausees dargestellt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Gleitmikrometermessungen sind, dass nur wenige aktive Trennflächen im Fels Ursache für das irreguläre Ver- halten der Staumauer sind. Der Fels

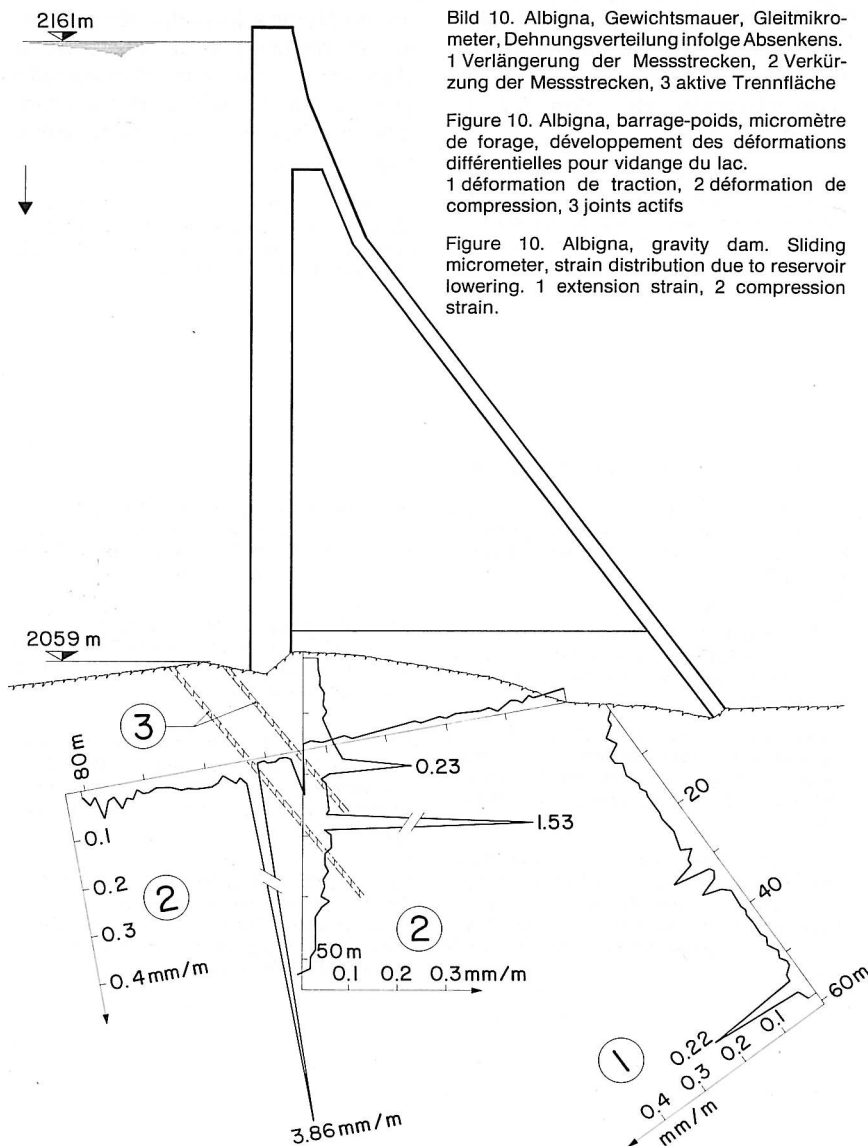


Bild 10. Albigna, Gewichtsmauer, Gleitmikrometer, Dehnungsverteilung infolge Absenkens. 1 Verlängerung der Messstrecken, 2 Verkürzung der Messstrecken, 3 aktive Trennfläche

Figure 10. Albigna, barrage-poids, micromètre de forage, développement des déformations différentielles pour vidange du lac. 1 déformation de traction, 2 déformation de compression, 3 joints actifs

Figure 10. Albigna, gravity dam. Sliding micrometer, strain distribution due to reservoir lowering. 1 extension strain, 2 compression strain.

ve de la haute précision du micromètre de forage.

2.3 Albigna, barrage-poids, Suisse

Le barrage d'Albigna appartient à la ville de Zurich et a été construit de 1956 à 1959. La hauteur maximale est de 115 m et sa longueur au couronnement de 760 m. Le barrage est fondé sur un éperon de granite. Après un remplissage à lac plein de longue durée, des sources de faible débit sont apparues à l'aval du barrage. Pour déterminer les déformations au remplissage et à la vidange du lac, des tubes de mesure pour le micromètre de forage ont été installés en 1982, dans deux sections. La discussion détaillée des résultats se trouve dans la publication [12].

La figure 10 montre le développement des déformations différentielles dans le rocher à la vidange du lac. Le principal résultat est que seulement quelques fissures actives dans le rocher sont la cause du comportement anor-

wall due to reservoir filling. The horizontal displacement was also measured by means of a hanging pendulum installed in a shaft located near the measuring section. The two independently obtained displacement curves are presented in the figure. The extremely good agreement is a confirmation of the high precision of the sliding micrometer.

2.3 Albigna gravity dam, Switzerland

Albigna dam, owned by the Department of Public Works, Zurich, and built in the period 1956 to 1959, has a maximum height of 115 m and a crest length of 760 m. It is founded on a granite ridge. In 1977, after a long period of reservoir filling, a small underseepage of the dam was observed.

In order to get more information about the deformations caused by filling and emptying the reservoir, boreholes for the purpose of sliding micrometer measurements were installed in two sections. For a detailed discussion of

verhält sich im Ganzen als Monolith, und es sind zwei Risse, die sich in einer Diskontinuität der Verteilung mit Risschliessung von etwa 0,2 bis 3,85 mm/m zeigen.

Adresse des Verfassers: Dr. *Arno Thut*, Solexperts AG, Studien- und Beratungsbüro für Anwendungen der Geotechnik, Ifangstrasse 12, Postfach 230, CH-8603 Schwerzenbach (Zürich).

mal du barrage. Le rocher réagit comme un monolithe et deux fissures se manifestent par une discontinuité dans la répartition des déformations différentielles, avec une fermeture des fissures de 0,2 resp. 3,86 mm/m.

Adresse de l'auteur: Dr. *Arno Thut*, Solexperts AG, bureau d'études pour les applications de la géotechnique, Ifangstrasse 12, Postfach 230, CH-8603 Schwerzenbach (Zurich).

the results reference should be made to [12].

Figure 10 shows the distribution of strain in a borehole in rock produced by reservoir emptying. The most important findings of the sliding micrometer readings are that only a few active cracks in the rock are the reason for the irregular behaviour of the dam. The rock as a whole acts as a monolith and just two cracks show up as a discontinuity with opening of 0.2 to 3.86 mm/m.

Author's address: Dr. *Arno Thut*, Solexperts AG, Research and consulting office for applied rock and soil mechanics, Ifangstrasse 12, Postfach 230, CH-8603 Schwerzenbach (Zurich).

Literaturnachweis/References/Références

[1] *K. Kovári, Ch. Amstad* (1981): Das Konzept der «linienweisen Beobachtung» bei Deformationsmessungen. Mitteilung der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik Nr. 102.

[3] *J. Köppel, Ch. Amstad, K. Kovári*: The Measurement of Displacement Vectors with the Trivec Borehole Probe, Field Measurements in Geomechanics, Zurich 1983.

[2] *K. Kovári, Ch. Amstad, J. Köppel*, 1979: New Developments in the Instrumentation of Underground Openings, Proc. of the 4th Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Atlanta, USA.

[4] *U. S. Croucamp*: Some Practices and Experience of Dam and Foundation Monitoring in the Directorate of Water Affairs, South Africa. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 56, R 35.

[5] *R. Widmann*: How to avoid Thermal Cracking of Mass Concrete. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 57, R 15.

[6] *K. Baustädter, R. Wiedmann*: The Behaviour of the Kölnbrein Arch Dam. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 57, R 37.

[7] *W. Demmer, H. Ludescher*: Measures taken to reduce Uplift and Seepage at Kölnbrein Dam. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 58, R 81.

[8] *K. Kovári*: Detection and Monitoring of Structural Deficiencies in the Rock Foundation of Large Dams. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 56, R 36.

[9] *H. Ludescher*: A Modern Instrumentation for the Surveillance of the Stability of the Kölnbrein Dam. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 56, R 42.

[10] *W. Schober, H. Lercher*: The Concrete Core Diaphragm Wall of the Enbankment Dam Bockhartsee Monitoring and Interpretation. Transactions of the Fifteenth International Congress on Large Dams, Lausanne 1985. Q 56, R 66.

[11] *K. Kovári, Ch. Amstad*: Fundamentals of Deformation Measurements. Field Measurements in Geomechanics, Zurich 1983.

[12] *K. Kovári, G. Peter*: Continuous Strain Monitoring in the Rock Foundation of a Large Gravity Dam. Rock Mechanics and Rock Engineering, 16, 1983.