

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 78 (1986)  
**Heft:** 1-2

**Artikel:** Überwachung der Talsperre und ihre Foundation = Auscultation des barrages et de leurs fondations  
**Autor:** Müller, Rudolf  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940829>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

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

# Überwachung der Talsperren und ihrer Foundation

Ergebnisse der am  
15. Internationalen Talsperrenkongress 1985  
in Lausanne behandelten Frage 56

Rudolf Müller

Zur Frage 56 liegen 82 Berichte (R) und 10 Sammelberichte (GP) vor, die noch durch 25 Diskussionsbeiträge ergänzt wurden. Von den 82 Einzelberichten betrafen 36 Dämme, 25 Betonsperren und 21 Verschiedenes. Am meisten wurde dabei zu den Themen «Planung von Instrumentierung und Instrumentierungssystemen unter Berücksichtigung des Talsperrentyps, seiner Bedeutung und seines Alters sowie der Sicherheits- und Betriebsbedürfnisse» und «Vergleich des beobachteten Verhaltens der Talsperre mit dem erwarteten und dadurch erfolgter Verbesserung von Berechnungsmethoden» berichtet, während die «Zuverlässigkeit der Instrumente, Reparatur und Ersatz defekter Geräte» sowie «Neuere Entwicklung bei der Auswertung von Messergebnissen und ihrer Interpretation» eher wenig behandelt wurden.

## Zweck der Talsperrenüberwachung

Der Generalberichterstatter *Georges Post*, Paris, sowie verschiedene Autoren von Berichten nennen folgende Gründe für die Durchführung von Messungen und Beobachtungen an Talsperren und ihrer Umgebung:

- zur Beurteilung der Sicherheit der Bauwerke durch Nachweis, dass sie sich normal verhalten bzw. um frühzeitig ein anormales Verhalten festzustellen,
- zum Vergleich des tatsächlichen mit dem erwarteten Verhalten und damit zur Überprüfung der beim Projekt gemachten Berechnungsannahmen. Die dabei gesammelten Erfahrungen dienen zur Verbesserung der Kenntnisse hinsichtlich nachfolgender Projekte,
- zur Eichung von Berechnungsmodellen,
- zur verbesserten Kenntnis des Verhaltens des Bauwerks während der Bauphase mit allfälliger Vornahme von Verbesserungen am Projekt.

Die Talsperrenüberwachung soll aussagen, ob die Sicherheit des Bauwerkes sowohl beim Ersteinstau als auch während seiner gesamten Lebensdauer gewährleistet ist. Bei der Wahl der Instrumente für Langzeitmessungen sind folgende Kriterien bestimmend: Dauerhaftigkeit, Einfachheit, Benutzerfreundlichkeit. Messungen sind für die Beurteilung der Talsperrensicherheit wohl sehr wichtig, genügen allein aber nicht, um diese zu garantieren; visuelle Kontrollen gehören unabdingbar dazu. Untersuchungen der Electricité de France [1] und in der Tschechoslowakei (R33) ergaben, dass mehr als zwei Drittel aller Anomalien durch visuelle Kontrollen erkannt wurden.

## Schwierigkeiten bei Messungen

Messungen geben nur Auskunft auf das, worauf eine Antwort gesucht wird. Die Erstellung des Instrumentierungsplans ist daher Aufgabe des projektierenden Ingenieurs, der weiss, welche Fragen sich im Zusammenhang mit seinem Bauwerk stellen und welche Punkte speziell zu beobachten sind. Dazu kommt die räumliche und zeitliche Diskontinuität der Messungen. Während durch zeitliches Verdichten der Messintervalle von wichtigen Parametern – speziell auch mit Hilfe der Automatisierung – die eine Schwierigkeit überwunden werden kann, ist eine beliebige Anhäufung von Messstellen im Bereich sensibler Zonen weniger gut mög-

# Auscultation des barrages et de leurs fondations

Synthèse des contributions à la question 56 traitée lors du 15<sup>e</sup> Congrès international des Grands Barrages, Lausanne 1985

Rudolf Müller

La question 56 a été l'objet de 82 rapports (R), de 10 rapports de synthèse (RS) et de 25 interventions pendant le congrès. Des 82 rapports individuels, 36 traitent des remblais, 25 des ouvrages en béton et 21 de sujets généraux. Les thèmes «Conception des dispositifs et appareillages d'auscultation, compte tenu du type, de l'importance et de l'âge de l'ouvrage, des exigences de sécurité et des contingences d'exploitation» et «Comparaison du comportement observé avec les prévisions – enseignements tirés pour l'amélioration des méthodes de calcul» reviennent le plus souvent. En revanche, les thèmes «Fiabilité des appareils, réparations et remplacement d'appareils défectueux» et «Progrès réalisés dans les méthodes de dépouillement, d'analyse et d'interprétation» apparaissent moins fréquemment.

## But de l'auscultation des barrages

Le rapporteur général *Georges Post*, Paris, et différents auteurs justifient l'observation des barrages et de leurs environs ainsi que l'exécution de mesures par les raisons suivantes:

- juger de la sécurité des ouvrages en apportant la preuve que leur comportement est normal, respectivement pour détecter à temps toute déviation de ce comportement;
- comparer le comportement réel d'un ouvrage au comportement attendu et ainsi contrôler la justesse des hypothèses de calcul. L'expérience gagnée contribue à l'amélioration des connaissances et servira pour les projets futurs;
- étalonner le modèle de calcul;
- mieux connaître le comportement de l'ouvrage déjà pendant la construction et procéder de suite à des corrections éventuelles du projet.

L'auscultation a donc pour but de déterminer si la sécurité d'un barrage est assurée aussi bien lors du premier remplissage de la retenue que tout au long de la vie de l'ouvrage. Il s'ensuit que les instruments choisis pour les mesures à long terme doivent satisfaire aux critères suivants: fiabilité, simplicité et facilité d'utilisation. Bien que les mesures revêtent une importance primordiale pour juger de la sécurité d'un ouvrage, elles ne suffisent pas en elles-mêmes; les contrôles visuels en sont l'indispensable complément. L'expérience montre tant en France [1] qu'en Tchécoslovaquie (R33) que plus des deux tiers des anomalies ont été détectées par les contrôles visuels.

## Difficultés inhérentes aux mesures

Les mesures ne fournissent des informations que sur ce qu'on cherche. La distribution des instruments à l'intérieur de l'ouvrage reste donc tâche de l'ingénieur du projet qui sait mieux que quiconque quels sont les problèmes posés par son ouvrage et quels points doivent être observés plus particulièrement. A cela s'ajoute le fait que les mesures ne fournissent de renseignements qu'en un point et un moment donnés. A l'heure actuelle, si l'on est maître de rapprocher dans le temps les mesures de paramètres importants – notamment grâce à l'automatisation – on est beaucoup moins libre de multiplier les points de mesure dans les



Bild 1. Installation eines Schwimmlots. Um den Schwimmertank und die Setzplatte für das Messgerät unterbringen zu können, musste die vorhandene Nische in der Stauwand erheblich vergrößert werden.  
 Figure 1. Installation d'un pendule inversé. Pour mettre en place la cuve du flotteur ainsi que le gabarit de fixation de l'appareil de lecture, la niche existante a dû être agrandie sensiblement. (Photo F. Matthey)

lich. Neuere Entwicklungen in den letzten Jahren gehen in Richtung auf Geräte, die kontinuierliche Beobachtungen längs Linien erlauben, wie zum Beispiel Dehnungsmessgeräte (Gleitmikrometer, Distofo) oder Porenwasserspannungsgeber (Piezodex, Piezofor). Schon länger bekannt sind Instrumente zur Messung von Setzungen und Dehnungen in Schüttdämmen längs vertikalen und horizontalen Linien mittels elektromagnetischer Sonden und hydraulischer «Torpedos».

Bei Anlagen, wo sich der Ersteinbau nicht an ein bestimmtes Programm mit entsprechenden Messungen hält, sondern eventuell erst nach Jahren anlässlich eines Hochwassers und zudem noch innert sehr kurzer Zeit stattfindet, kommt der visuellen Kontrolle eine grosse Bedeutung zu, sowohl im Hochwasserfall als auch bei noch nicht gefülltem Becken. Dies ist der Fall bei Mehrjahresspeichern in ariden Gebieten, aber auch bei den gegenwärtig in der Schweiz in Mode gekommenen Hochwasserrückhaltebecken.

Eine weitere Schwierigkeit bei Messungen erwächst durch den Verlust an Messinstrumenten im Laufe der Zeit, hervorgerufen durch kurze Lebensdauer derselben, Alterung oder äussere Einflüsse. Als geeignete Gegenmassnahmen werden der Einbau verschiedener Gerätetypen und von Reserveinstrumenten angesehen. Auch sollten eine gewisse Redundanz geschaffen und – wenn möglich – die Austauschbarkeit erleichtert werden. Automatisierte und fernübertragene Messungen sollten – sofern sie zugänglich sind – von Hand auch vor Ort gemessen werden können. Bei

zonen qui se révéleraient sensibles. Les développements récents en matière d'appareils permettent des mesures continues le long de lignes, qu'il s'agisse des déformations (micromètre coulissant, Distofo) ou des pressions interstitielles (Piezodex, Piezofor). On notera aussi que la mesure des tassements ou déformations dans les digues, le long de lignes verticales ou horizontales, est pratiquée depuis longtemps au moyen de sondes électromagnétiques ou de furets hydrauliques.

Les contrôles visuels revêtent une importance particulière en cas de crue mais aussi à retenue partiellement pleine, lorsque le premier remplissage n'a pas lieu suivant un programme défini à l'avance, doublé de mesures de contrôle, mais se produit seulement après plusieurs années, lors d'une crue, c'est-à-dire en général très rapidement. Tel est le cas des accumulations interannuelles en régions arides, mais aussi des bassins de rétention en Suisse.

Les mesures effectuées à un barrage peuvent être interrompues suite à une perte d'instruments. Cette perte peut être due à une faiblesse congénitale de l'appareil, au vieillissement ou à des influences extérieures. C'est pourquoi, il est souhaitable d'utiliser des instruments de différents types et en nombre suffisant pour garantir une certaine redondance. On favorisera en outre l'utilisation d'appareils aisément remplaçables. Les mesures automatiques télétransmises devraient pouvoir être contrôlées par des mesures sur place, ceci pour autant que les instruments soient accessibles. Lors du renouvellement du dispositif d'auscultation, des difficultés particulières peuvent se présenter lorsque l'encombrement des nouveaux appareils dépasse celui des anciens. Ce problème a été exposé par Matthey au cours d'une intervention traitant du renouvellement d'un dispositif qui n'était plus fiable. D'importants travaux de percement de niches sont alors inévitables, ne serait-ce que pour placer une foreuse (figure 1). Le conférencier en conclut qu'il convient d'envisager les réparations et le renouvellement du dispositif d'auscultation déjà lors du projet et de prévoir suffisamment de place. Les coûts du renouvellement s'en trouveront réduits sensiblement.

### *Tendances dans le domaine des mesures*

#### *Mesure des déformations*

Ainsi qu'il est mentionné plus haut, la tendance actuelle consiste à remplacer les mesures ponctuelles par d'autres le long de lignes ou s'étendant sur de plus grandes distances. On note également une extension du dispositif d'auscultation pour englober les fondations. Pour les barrages en béton, on recourt aux pendules, aux polygonales dans les galeries de contrôle, aux alignements et aux extensomètres.

Le rapport 4 indique qu'Hydro-Québec a mis en place des pendules de 100 m de profondeur dans des forages dont le diamètre ne dépasse pas 76 mm. Dans ce même trou, les Canadiens ont encore placé un second fil en invar tendu par un poids, fil qui permet les mesures des déformations verticales. Un appareil cylindrique développé par Hydro-Québec peut être glissé dans le forage de façon à centrer le fil du pendule en un niveau donné. Les déformations horizontales peuvent ainsi être mesurées de manière continue sur toute la hauteur du fil. Les pendules inversés servent également de points de référence pour les mesures géodésiques lorsqu'aucun affleurement rocheux ne se présente.

Dans le rapport 53, un groupe de travail du Comité national suisse des grands barrages décrit, outre l'alignement optique, celui par fil, tel qu'il a été installé aux barrages de Marprag, Schräh et Rempen. Ce fil tendu soit en galerie, soit le

der Erneuerung von Messinstallationen können sich Schwierigkeiten mit den engen Raumverhältnissen in der Talsperre ergeben, wie in einem Diskussionsbeitrag (*Matthey*) anhand der Modernisierung einer alten, nicht mehr zuverlässigen Messanlage dargelegt wurde. Es mussten dazu mit erheblichem Aufwand zusätzliche Nischen, zum Teil nur für die Bohrmaschinen, ausgebrochen werden (siehe Bild 1). Der Referent zog aus diesem Beispiel die Schlussfolgerung, dass schon bei der Projektierung an die spätere Erneuerung und Reparaturen gedacht und die dazu nötigen Platzverhältnisse in der Talsperre von Anfang an geschaffen werden sollten, was sich später auch günstig auf die Erneuerungskosten auswirkt.

### Tendenzen im Bereich der Messungen

#### Deformationsmessungen

Wie bereits oben erwähnt, ist bei Deformationsmessungen eine Entwicklung mit Übergang von punktuellen Messungen zu solchen längs Linien oder über längere Distanzen zu erkennen. Auch ein verstärkter Einbezug der Foundation ist festzustellen. Bei *Staumauern* kommen dabei Lote, Polygonzüge in Kontrollgängen, Alignements und Extensometer zur Anwendung.

Aus Kanada, bei den Stauanlagen der Hydro-Québec, wird über den Einbau von Schwimmloten in Bohrlöchern von nur 76mm Durchmesser und bis 100m Tiefe berichtet (R4). In das gleiche Bohrloch wurde zudem noch ein Höhendraht (zusätzlicher Invardraht, der unter konstanter Kraft gespannt ist) zur Messung der vertikalen Verformung eingelegt. Mit einem eigens dazu entwickelten zylindrischen Gerät, das beim Hinunterlassen den Lotdraht im Bohrloch zentriert, kann die horizontale Deformation kontinuierlich längs des gesamten Schwimmlots gemessen werden. Wo keine geeigneten Felsaufschlüsse für Fixpunkte vorhanden waren, wurden Schwimmlote auch als Referenzpunkte für geodätische Messungen verwendet.

In einem schweizerischen Bericht (R53), den eine Arbeitsgruppe des Nationalkomitees für Grosse Talsperren ausgearbeitet hatte, wurde unter anderem neben dem optischen Alignment das Drahtalignement, das bei den Gewichtsmauern Mapragg, Schräh und Rempen installiert wurde, beschrieben. Es besteht aus einem in Mauerkontrollgängen oder Kronenbrüstungen eingebauten horizontalen gespannten Draht, der als Bezugslinie für die Verformungsmessungen des zwischen den beiden Endpunkten liegenden Mauerteils dient (Bild 2).

Durch seine Fähigkeit, längs einem Bohrloch Meter für Meter die Längenänderungen mit sehr hoher Genauigkeit zu bestimmen, hat das Gleitmikrometer verschiedene Anwendungsmöglichkeiten gezeigt. Riss- und Kluftöffnungen sowie Dehnungen und Stauchungen im Beton und Fels wurden bei der Bogenmauer Kölnbrein (A) und der Gewichtsmauer Albigna (CH) damit untersucht (R36, R42). In Südafrika (R35) wurde das Gleitmikrometer zur Überwachung des Langzeitverhaltens einer mit Vorspannkabeln verankerten Mauer eingesetzt. Die Messungen erfolgten von einem 30m unter der Mauerfundation gelegenen Drainagestollen aus in 60m langen Bohrungen vertikal nach oben. Aus Frankreich wird über das Bohrlochextensometer Distofo berichtet (R72), das in Bohrungen bis über 100m Länge eingesetzt werden kann. Die Anzahl Messstellen scheint jedoch mit etwa 12 begrenzt zu sein. Bei der Bogenmauer Gouët wurde es zur Beobachtung von Fundamentverformungen und bei der Bogengewichtsmauer Villerest zur Messung der Öffnungsbewegungen einer das Fundament durchquerenden Verwerfung angewendet (R22).

long du parapet du couronnement, sert de ligne de référence pour la mesure des déplacements des éléments du barrage situés entre les points d'attache (figure 2).

Parce qu'il permet la mesure très précise des déformations mètre par mètre le long d'un trou de forage, le micromètre coulissant a trouvé des emplois divers. Au barrage de Kölnbrein (Autriche) et d'Albigna (Suisse), il sert à la mesure de l'ouverture de fissures ainsi qu'à celle des déformations linéaires tant en rocher que dans le béton (R36, R42). En Afrique du Sud par contre, on a recours au micromètre coulissant pour suivre le comportement à long terme d'un barrage ancré par des câbles précontraints. La mesure est effectuée dans des trous verticaux de 60 m de longueur forés vers le haut à partir d'une galerie de drainage située 30 m sous la fondation du barrage (R35).

Dans le rapport 72, les Français relatent les expériences faites avec l'extensomètre de forage Distofo. Bien que l'appareil puisse être utilisé jusqu'à des profondeurs dépassant 100 m, le nombre de points de mesure semble cependant se limiter à 12. Le Distofo est utilisé au barrage-voûte de Gouët pour le suivi des déformations de la fondation et au barrage-poids-voûte de Villerest pour la mesure des variations d'ouverture d'une faille recoupant la fondation (R22).

Les déformations des *digues* sont mesurées principalement au moyen des sondes électromagnétiques éprouvées maintes fois et qui, glissées dans des tubes en matière synthétique horizontaux ou verticaux, réagissent au passage d'anneaux métalliques incorporés à intervalles réguliers. Occasionnellement, les déplacements horizontaux de tubes verticaux sont mesurés au moyen d'inclinomètres alors que des instruments fonctionnant selon le principe des vases communicants sont utilisés dans les tubes horizontaux pour l'estimation des tassements. Les déformations au niveau du couronnement et des parements sont déterminées à l'aide des méthodes de la géodésie tandis que des polygonales sont mises en place dans les galeries d'injection, de drainage et d'accès.

Au Maroc, des fils invar sont utilisés pour déceler en crête les zones d'extension et de fissuration éventuelles de 4 digues (R51). On mesure la variation de longueur des fils tendus entre des piliers distants de 20 m.

Le Distofo ainsi qu'un inclinomètre, le Clinofo, ont été mis en place dans les 80 m de moraines et d'alluvions servant de fondation à la digue du Verney (France), de 42 m de hauteur. Ce dispositif a permis de mesurer les tassements et les déformations horizontales au cours du remblayage et de la mise en eau (R74). Dans le même rapport ainsi que dans le rapport général, on mentionne la digue du Vieux-Pré où l'on a procédé à titre d'essai à la mise en place dans le remblai de couches minces d'un mélange de matériaux du noyau et de magnétite. A la fin des travaux, des forages ont été exécutés à partir du couronnement de manière à déterminer la position de ces couches au moyen d'une sonde. On évite par cette méthode presque toute perturbation du compactage, mais on perd le détail du tassement au cours des travaux.

En ce qui concerne la mesure géodésique des déformations, une intervention (*Egger*) ainsi que le rapport 53 présentent le système adopté en Suisse ces dernières années: liaison des mesures géodésiques des déformations aux mesures mécaniques effectuées à l'intérieur du barrage. A cela s'ajoute une extension du réseau géodésique qui doit couvrir une zone convenable des environs du barrage, la possibilité de mesures partielles du réseau et l'exécution de mesures en toute période de l'année [2]. Les rapports 4 (Canada) et 41 (Afrique du Sud) montrent qu'un système analogue a été adopté à l'étranger. Une intervention de Fin-

Die Deformationsmessungen im Innern von *Dämmen* erfolgen heute vorwiegend mit den seit Jahren bewährten elektromagnetischen Sonden, die in vertikale und horizontale Kunststoffrohre eingeführt werden und die in bestimmten Abständen angebrachte Metallringe aufspüren. Gelegentlich werden auch Neigungsmessgeräte zur Bestimmung der Horizontalverschiebungen in die vertikalen Rohre eingeführt, während bei den horizontalen Rohren zur Messung der Setzungen hydraulische, auf dem Prinzip der kommunizierenden Gefässe beruhende Messgeräte verwendet werden. Oberflächlich werden geodätisch beobachtete Punkte auf Krone und Paramenten gemessen sowie Polygonzüge in Stollen (Injektions-, Drainage und Zugangsstollen).

Zur Feststellung von Zug- und Risszonen längs der Krone wurden bei 4 Dämmen in Marokko Deformationsmessungen mit Invardrähten ausgeführt (R51). Die Drähte wurden dazu zwischen regelmässig in 20-m-Abständen aufgestellten Messsockeln gespannt und die Längenänderung gemessen.

Im Untergrund des 42 m hohen Verney-Dammes (F), der auf einer 80 m dicken Moränen- und Alluviumschicht ruht, wurde der Distofer zusammen mit einem Neigungsmesser Clinofor eingebaut, so dass zu Setzungen auch die Horizontalverschiebungen infolge der Schüttung und des Einstaus beobachtet werden konnten (R74). Im gleichen Bericht sowie im Generalbericht wird der Damm Vieux-Pré erwähnt, bei dem versuchsweise dünne Schichten einer Mischung aus Kernmaterial und Magnetit eingebracht und einnivelliert wurden. Nach Beendigung der Dammschüttung wurden Bohrungen von der Krone aus abgeteuft und mit einer Sonde die Lage dieser Schichten lokalisiert. Mit diesem Vorgehen konnte man Störungen bei der Verdichtung im Bereich dieser Setzungsmessstellen während der Bauausführung vermeiden. Allerdings können dabei die Setzungen während der Schüttung nicht verfolgt werden. Bezüglich der geodätischen Deformationsmessungen wurde in einem Diskussionsbeitrag (*Egger*) sowie einem Bericht (R53) das neue, in der Schweiz seit einigen Jahren entwickelte Konzept vorgestellt. Dieses beruht auf der Verbindung von geodätischen Deformationsmessungen mit den mechanischen Messungen im Innern der Talsperre, mehrstufigen geodätischen Messanlagen, grossräumigen Triangulationsnetzen und ganzjähriger Messbereitschaft [2]. Berichte aus Südafrika (R41) und Kanada (R4) zeigen, dass das gleiche oder ähnliche Konzepte auch dort angewendet werden. In einem Diskussionsbeitrag aus Finnland

lande (*Reiter*) a présenté un procédé de mesure nouveau: la radio-interférométrie (GPS = Global Positioning System) qui pourrait être d'avenir pour le contrôle des retenues et éventuellement des digues elles-mêmes. Ce procédé utilise les signaux radio émis par des satellites qui gravitent autour de la terre à une distance constante de 20000 km. Ces signaux sont captés par des stations mobiles situées au droit des points à mesurer et dont on peut déterminer les coordonnées. Une précision de 2 mm est donnée pour une distance de 200 à 800 m [3].

#### Pressions interstitielles

La détermination des pressions interstitielles revêt une importance particulière pour les *digues*. Vingt-deux des rapports relatifs à la question 56 traitent des expériences faites lors de l'utilisation de divers instruments et établissent des comparaisons entre les types. Des piézomètres hydrauliques, pneumatiques et électriques sont couramment utilisés dans les noyaux argileux des digues. Les résultats des mesures concordent et ne paraissent donc pas dépendre du type d'appareil. Les auteurs des rapports sont en général satisfaits des valeurs obtenues et de la fiabilité des appareils; les expériences relatées sont toutes positives.

La présence de matériaux argileux non saturés peut conduire à certaines difficultés, l'air enfermé pouvant fausser les mesures. A la digue d'Alicura en Argentine (R20), des pressions interstitielles particulièrement faibles ont été mesurées dans la partie inférieure du noyau constitué de matériaux morainiques. Les raisons de ce phénomène ne sont pas établies; il pourrait s'agir d'air entraîné dans les filtres des piézomètres ou encore de l'effet de la galerie de drainage percée dans le rocher au-dessous du noyau. Les expériences faites avec des piézomètres dans le corps d'appui amont ne sont pas particulièrement satisfaisantes. Dans la digue de Bennet au Canada, les 8 piézomètres électriques sont tombés en panne en l'espace de 5 ans (R8); dans celle de Pueblo Viejo au Guatemala, seuls 5 des 7 instruments fonctionnent encore (*Balissat*). Les auteurs présumant que les câbles ont pu être endommagés lors de mouvements de cisaillement dans le corps de la digue; le problème de la saturation des filtres dans la partie supérieure de la digue, où les piézomètres sont parfois à sec suite aux variations de niveau de la retenue, pourrait être également à l'origine de la mise hors service.

Alors qu'il est habituel de mesurer les pressions interstitielles dans les fondations d'une digue, cette même mesure n'est pas effectuée aussi systématiquement dans le cas des

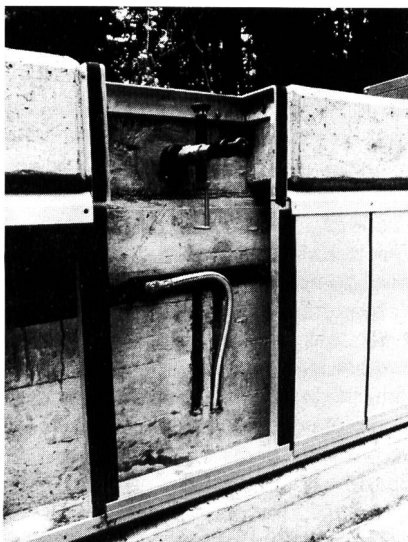


Bild 2a, links. Horizontaler Alignmentdraht in der massiven Brüstung der Staumauer Rempen, Messstelle mit optischem Messinstrument.

Figure 2a, à gauche. Fil d'alignement horizontal mis en place dans le parapet du couronnement du barrage de Rempen.

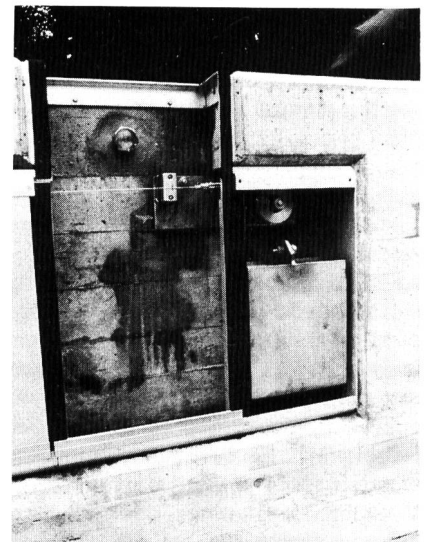


Bild 2b, rechts. Bewegliche Alignmentdrahtaufhängung mit Dehnungsausgleich und Spannungsgewicht.

Figure 2b, à droite. Suspension mobile du fil d'alignement avec compensation de la dilatation et contrepoids.

(Reiter) wurde die Radiointerferometrie (GPS = Global Positioning System) als neues Verfahren der Vermessung vorgestellt, das für die Überwachung von Stauräumen oder auch von Dämmen Zukunft haben könnte. Dabei werden Funksignale von Satelliten, welche die Erde in 20000km Höhe umkreisen, mit mobilen, auf den zu bestimmenden Bodenpunkten aufgestellten Stationen aufgefangen und deren Lage und Höhe bestimmt. Die Genauigkeit wird mit 2mm für Distanzen von 200m bis 800m angegeben [3].

#### Wasserdrücke

Bei Dämmen kommt der Messung der Porenwasserspannungen grosse Bedeutung zu. In 22 Berichten zur Frage 56 werden die Erfahrungen in der Anwendung verschiedener Messgeräte und Typenvergleiche behandelt. In Dammkernen mit tonigem Material kommen hydraulische, pneumatische und elektrische Piezometer zum Einsatz. Bei den gemessenen Werten bestehen offenbar keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Instrumententypen. Im allgemeinen sind die Berichtersteller mit den erhaltenen Messwerten, der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer zufrieden, bzw. es wurde nur über positive Erfahrungen berichtet. Eine Schwierigkeit besteht bei ungesättigten tonigen Materialien, wo die noch vorhandene Luft die Messungen beeinflussen kann. Beim Alicura-Damm in Argentinien (R20) wurden im unteren Teil des Kerns aus Moränenmaterial ungewöhnlich tiefe Porenwasserspannungen gemessen. Man ist sich jedoch über die Ursachen nicht im klaren; es kommen dafür die Luft in den Piezometerfiltern oder die Drainagewirkung eines unter dem Kern im Fels erstellten Injektionsstollens in Frage. Die Erfahrungen mit Piezometern in wasserseitigen Stützkörpern sind nicht besonders gut. Beim Bennet-Damm in Kanada sind alle acht eingebauten elektrischen Piezometer nach fünf Jahren ausgefallen (R8), und beim Publo-Viejo-Damm in Guatemala sind von sieben nur noch fünf Instrumente funktionstüchtig (*Balissat*). Als Gründe für den Ausfall werden Beschädigung der Kabel durch Scherbewegungen im Stützkörper bzw. Schwierigkeiten bei der Sättigung der Filter im oberen Bereich des Dammes, wo die Piezometer infolge der Stauspiegelschwankungen zeitweise trockenfallen, vermutet.

Während die Messung von Wasserdrücken im Untergrund von Dämmen weitgehend üblich ist, wird dies bei *Betonmauern* weniger systematisch durchgeführt. Wurde früher bei Mauern der Auftrieb nur in der Kontaktzone Beton-Fels registriert, so gewinnt heute die Messung der Wasserdrücke in einem grösseren Bereich der Foundation an Bedeutung (R78). Allerdings sind solche Messungen im Fels heikel, da die Durchlässigkeit auf kurzen Distanzen sehr variabel sein kann und mit der Änderung des Spannungszustandes variiert. Die jeweiligen Messstrecken im Fels sollten nicht zu lang sein; aufgrund von Untersuchungen und Erfahrungen beim Waco-Damm, USA, werden Längen von einem bis wenigen Metern empfohlen (R29). In der Schweiz wurden in den letzten Jahren solche Wasserdruckmessrichtungen in langen Bohrlöchern bei den Bogenmauern Zervreila und Valle di Lei sowie den Gewichtsmauern Oberaar und Räterichsboden erfolgreich installiert (Bild 3).

#### Spannungsmessungen

Während bei den Betonmauern das Interesse an der Messung der Spannungen im Innern der Sperre zurückgegangen ist, werden Erddrücke in Schüttdämmen vermehrt gemessen, um die aus den Finit-Element-Berechnungen erhaltenen Resultate zu überprüfen, aber auch um das Risiko von hydraulisch bedingter Rissbildung im Kern abzuschätzen. Zur Vermeidung von Unsicherheiten über die Orientie-

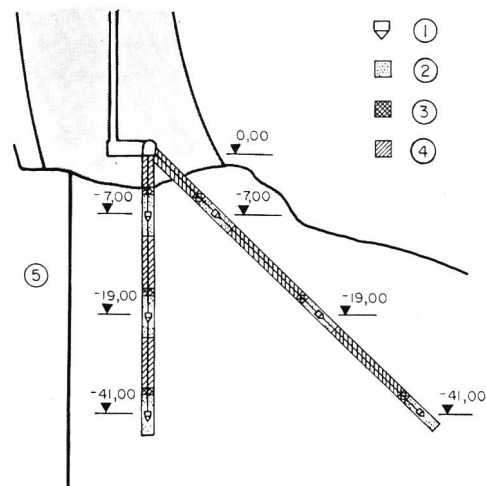


Bild 3. Installation von Porenwasserdruckgebern in verschiedenen Tiefen im Fundationsfels der Bogenstaumauer Zervreila. 1 Piezometer, 2 Sand, 3 Ton, 4 Injektion, 5 Dichtungsschirm.

Figure 3. Installation de cellules de pression interstitielle à différents niveaux dans la fondation du barrage-voûte de Zervreila. 1 cellule de pression interstitielle, 2 sable, 3 argile, 4 injections, 5 voile d'injection.

*barrages en béton.* A l'origine, les constructeurs se sont intéressés aux pressions régnant au contact béton-rocher. Aujourd'hui, on tend à récolter des valeurs donnant une image à plus grande profondeur (R78). Ce n'est pas aisé parce que la perméabilité du rocher peut varier notablement sur de courtes distances et qu'elle est fonction de l'état de contrainte. Sur la base des expériences faites à la digue de Waco, aux Etats-Unis (R29), la longueur du tronçon de mesure devrait être comprise entre un et quelques mètres au plus. En Suisse, des dispositifs de mesure de sous-pressions ont été mis en place avec succès ces dernières années aux barrages-voûte de Zervreila et de Valle di Lei ainsi qu'aux barrages-poids d'Oberaar et Räterichsboden (voir figure 3).

#### Mesure des contraintes

Si dans les barrages en béton la mesure des contraintes a été pratiquement abandonnée, elle est effectuée de plus en plus fréquemment dans les digues, d'une part pour contrôler les résultats des calculs par éléments finis et d'autre part pour évaluer le risque de fracturation hydraulique. Bien souvent, les instruments relativement plats mis en place avec une certaine orientation se sont déplacés suite au compactage ou aux mouvements qui se sont produits dans le remblai. Pour remédier à cet inconvénient, les cellules de mesure de la pression des terres de quelques digues de Norvège ont été équipées d'inclinomètres en miniature (R56, R57) qui ont mis en évidence des rotations atteignant 20° (R62).

#### Mesure des fuites

La mesure des fuites est de première importance. Dans certains pays, comme le Japon (RS 1) et la Norvège (R57), elle est prescrite par la loi; dans d'autres, elle est simplement recommandée. Tel est le cas de la France (R72) où des mesures hebdomadaires ou bimensuelles sont stipulées. L'intérêt ne se limite pas au débit total des fuites mais s'étend également à leur distribution par zones, à la turbidité et aux matériaux entraînés. La mesure des températures et l'analyse chimique en comparaison avec les eaux de la retenue sont les méthodes les plus couramment utilisées pour détecter les fuites (R62).

rung der flachen Messgeräte, die sich nach der Verlegung infolge des weiteren Einbauvorgangs oder infolge Bewegungen in der Schüttung nachträglich noch ändern kann, wurden bei einigen Dämmen in Norwegen die Erddruckmesszellen mit Miniinklinometern ausgerüstet (R56, R57) und tatsächlich Rotationen bis zu 20 Grad festgestellt (R62).

#### *Sickerwassermessungen*

Eine der wichtigsten Messungen ist diejenige des Sickerwassers. In einigen Ländern ist sie gesetzlich vorgeschrieben, zum Beispiel in Japan (GP1) und Norwegen (R57), oder empfohlen, wie in Frankreich (R72), wo Messungen alle ein bis zwei Wochen verlangt werden. Neben der Gesamtsickerwassermenge sind auch die nach Zonen unterteilten Teilabflüsse von Interesse sowie die Beobachtungen der Sickerwassertrübung oder von Materialausschwemmungen. Bekannte Methoden zur Identifizierung der Sickerwasser sind Temperaturmessung und chemische Analyse zusammen mit dem Seewasser (R62).

Zur Lokalisierung von Durchsickerungen durch die Untergrundabdichtung unter dem Sohlstollen, der den wasserseitigen Fuss des mit einer Betonoberflächendichtung versehenen Khao-Laem-Dammes in Thailand (R1) bildet, wurde ein System von Bohrlöchern beidseits der Abdichtung abgeteufelt. Aus dem Sohlstollen kann dann ein Färbmittel in das wasserseitige Loch eingepresst und die Zeit bis es in einem der luftseitigen Löcher registriert wird gemessen werden.

Zunehmende Sickerwassermengen weisen gewöhnlich darauf hin, dass die Talsperre eine Abweichung vom normalen Verhalten hat. Ist das Gegenteil der Fall, so kann dies unter Umständen auch eine Beeinträchtigung der Sicherheit bedeuten, zum Beispiel dann, wenn gleichzeitig mit der Kolmatierung von Drainagen der Auftriebsdruck zunimmt.

#### *Seismische Instrumentierung*

Einerseits werden bei Talsperren seismische Messgeräte installiert, um ihr Verhalten bei Erdbeben zu erkennen, andererseits werden Talsperren künstlich durch Vibratoren (oder natürlich durch den Wind) in Schwingung versetzt, um dynamische Parameter bezüglich der Festigkeit zu bestimmen.

Die Auswertung von 23 Jahren Beobachtung des Verhaltens bei Erdbeben von 15 japanischen Talsperren (Dämme, Gewichts- und Bogenmauern) ergab Gesetzmässigkeiten bezüglich Spitzenbodenbeschleunigung, vorherrschender Frequenz und Verstärkungsfaktoren zwischen Kronen- und Bodenbeschleunigung (R25).

Englische Forscher haben durch erzeugte Schwingungen verschiedene Talsperrentypen untersucht (Dämme, Bogen-, Gewichts- und Pfeilermauern) (R70). Der Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen einer Finit-Element-Analyse war für Bogenmauern am leichtesten, während bei den andern untersuchten Betonmauern wegen der unverpressten Fugen die mathematische Modellierung erhebliche Schwierigkeiten verursachte. Bei Dämmen schliesslich wurde gefunden, dass dreidimensionale Rechenmodelle erforderlich sind, um gute Vergleichsresultate zu erhalten.

In einem Bericht aus Italien (R76) wird die Möglichkeit beschrieben, durch von Zeit zu Zeit zu wiederholende erzeugte Schwingungen, Alterungserscheinungen oder Rissbildungen in der Talsperre festzustellen.

Gemäss einem Diskussionsbeitrag aus Frankreich (*Monfort*) wurden beim Damm Pla de Soulcem in den Pyrenäen auf der Krone nahe der steilen Widerlager Geophone installiert, die allfällige Blockstürze auf den Damm registrieren

Pour localiser les infiltrations à travers le rideau d'injection et à travers le mur parafouille du masque amont en béton de la digue de Khao Laem en Thaïlande, une série de trous ont été forés à partir de la galerie de pied, de part et d'autre de l'élément d'étanchéité (R1). Un colorant peut être injecté de la galerie dans le trou amont et les caractéristiques d'une fuite peuvent être déterminées par le temps nécessaire au liquide pour apparaître dans le trou aval.

La croissance des fuites indique généralement que le comportement d'un ouvrage cesse d'être normal. Leur diminution peut également signifier une atteinte à la sécurité. C'est le cas notamment lorsque les sous-pressions augmentent parallèlement au colmatage des drains.

#### *Mesure des effets sismiques*

Pour mieux connaître le comportement des ouvrages soumis à un séisme, on procède actuellement de deux manières. D'une part des sismographes sont installés pour enregistrer les effets des tremblements de terre. D'autre part, des barrages ont été mis en vibration artificiellement ou par le vent et les paramètres dynamiques relatifs à la résistance ont alors été mesurés ou évalués.

L'interprétation de 23 années de mesures sismiques effectuées sur 15 barrages japonais (digues, barrages-poids ou voûte) a permis d'établir des lois concernant l'accélération maximale du rocher, la fréquence prédominante et l'amplification (rapport de l'accélération de la crête à celle du rocher) pour les divers types de barrage (R25).

Des chercheurs anglais ont étudié le comportement de différents types de barrages (digues, barrages-voûte, poids, à contreforts) excités artificiellement ou par des phénomènes naturels (R70). La comparaison des mesures aux résultats d'un calcul par éléments finis a donné les meilleurs résultats pour les barrages-voûte. Pour les autres types de barrages en béton, la modélisation des joints ouverts s'est avérée difficile. Quant aux digues, un modèle de calcul à 3 dimensions est indispensable pour obtenir une concordance satisfaisante.

Dans le rapport 76, les auteurs italiens montrent l'intérêt de l'excitation artificielle périodique des ouvrages pour mettre en évidence la formation de fissures ou des phénomènes dus au vieillissement.

Dans une intervention, *Monfort* (France) cite la digue de Pla de Soulcem, dans les Pyrénées, où des géophones ont été installés sur le couronnement près des appuis particulièrement escarpés. Ces appareils sont destinés à enregistrer la chute éventuelle de blocs sur la digue pour l'annoncer au personnel d'exploitation par télétransmission.

#### *Enregistrement de bruits*

Le procédé consistant à mesurer les bruits résultant de la formation de fissures dans un barrage ou le massif de fondation ne s'est que peu développé. La raison en est le caractère plus qualitatif que quantitatif de l'information obtenue. Le rapport 42 traite de l'utilisation de ce procédé au barrage de Kölnbrein en Autriche.

#### *Automatisation*

L'automatisation des mesures, de leur télétransmission et de l'interprétation des résultats s'impose de plus en plus dans le domaine des barrages. Il apparaît cependant déjà qu'une automatisation totale est utopique et dangereuse. L'avantage de l'automatisation réside dans la rapidité des mesures, leur comparaison immédiate aux valeurs prédites, leur transmission rapide au personnel responsable et leur stockage en mémoire d'un ordinateur en vue d'une utilisation ultérieure. L'interprétation globale des mesures et le

und automatisch dem entfernt stationierten Betriebspersonal melden sollen.

#### *Geräuschmessungen*

Die Messung von Geräuschen als Folge von Veränderungen (Rissbildungen) in der Talsperre oder im Untergrund setzt sich nicht durch, da nur qualitative und keine quantitative Angaben erhalten werden. Über eine Anwendung bei der Bogenmauer Kölnbrein wird in einem österreichischen Beitrag berichtet (R42).

#### *Automatisierung*

Die Automatisierung der Messwerterfassung, Fernübertragung und Datenauswertung findet immer grössere Verbreitung. Im allgemeinen ist man sich jedoch einig darüber, dass die Automatisierung nicht total sein kann. Ihr Vorteil liegt in der raschen Erfassung von Messwerten, des sofort möglichen Vergleichs mit erwarteten Werten, der raschen Datenübermittlung zu den Verantwortlichen und der elektronischen Speicherungsmöglichkeit für spätere Verwendung dieser Daten. Die Interpretation der Ergebnisse und die Beurteilung der Sicherheit bedarf aber in jedem Fall der menschlichen Intervention durch den Talsperrenfachmann. Auch kann die visuelle Kontrolle der Talsperre keineswegs durch die Automatisierung ersetzt werden.

Diese in Berichten und Diskussionsbeiträgen geäusserten Ansichten stimmen gut mit den Erkenntnissen überein, die der Ausschuss für Talsperrenbeobachtung des Schweizerischen Nationalkomitees für Grosse Talsperren 1982 erarbeitet und in einem Bericht [4] zusammengefasst hat und die in einem Diskussionsbeitrag (*Torrione*) im Zusammenhang mit der Automatisierung bei der Grande Dixence präsentiert wurden.

#### *Auswertung der Messdaten*

Der Vergleich des gemessenen mit dem erwarteten (berechneten) Verhalten ist bei Betonmauern eine allgemein übliche Praxis. Die zwei dabei verwendeten Methoden sind die analytische und die statistische, welche nach *Bossoney* folgende Voraussetzungen haben: Bei der analytischen Methode sind die plastischen Deformationen abgeklungen, und der Temperaturverlauf quer durch die Mauer wird linear angenommen; bei der statistischen Methode sind viele Daten erforderlich, der Temperatureinfluss wird schematisiert erfasst, die Anwendung ist jedoch einfacher. Sind ausreichend Daten vorhanden, das heisst nach Ablauf einiger Betriebsjahre, wird meist die statistische Methode vorgezogen (R78); nach portugiesischen Erfahrungen gibt es aber keine Methode, die jeder Situation gerecht wird, sondern es ist vielmehr die dem betrachteten Fall passendste Methode zu suchen (R39).

Der Vergleich Rechnung-Messung bzw. die Rückrechnung gewinnt bei Dämmen an Bedeutung. Zwei Drittel der Beiträge zur Frage 56, die Dämme behandeln, sind diesem Thema gewidmet. Dabei werden die Ergebnisse der Berechnungen (mit zwei- oder drei-dimensionalen Finit-Element-Modellen) mit den gemessenen Werten (Deformationen, Spannungen) nach der Bauphase und dem Ersteinbau verglichen und die Modelle geeicht, um dadurch sicherere Materialeigenschaften und Stoffgesetze zu erhalten mit der Absicht, das Talsperrenverhalten besser zu verstehen, auch zum Nutzen künftiger Projekte in bezug auf deren Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

judgement sur la sécurité requerront toujours l'intervention du spécialiste en barrage. De même, les inspections visuelles ne doivent pas être supprimées au profit de l'automatisation.

Ces réflexions apparaissant dans les rapports et les interventions concordent bien avec les conclusions du Groupe de travail pour l'observation des barrages du Comité national suisse des grands barrages, conclusions publiées en 1982 [4] et présentées lors de l'intervention de *Torrione*, en relation avec l'automatisation à la Grande Dixence.

#### *Interprétation des résultats des mesures*

La comparaison du comportement mesuré avec celui prédit par le calcul est d'usage courant pour les barrages en béton. Pour ce faire, on recourt soit à la méthode statistique, soit à la méthode analytique. *Bossoney*, dans son intervention, définit les conditions d'application comme suit: la méthode analytique suppose que les déformations plastiques sont terminées et que la température varie linéairement à travers le mur; la méthode statistique nécessite davantage de données, l'influence de la température est schématisée mais l'application est finalement plus simple. Lorsque les données sont en nombre suffisant, c'est-à-dire après quelques années d'exploitation, la méthode statistique a généralement la préférence (R78). Selon l'expérience portugaise, aucune des 2 méthodes ne s'impose a priori; il s'agira de choisir de cas en cas la mieux adaptée (R39).

La comparaison calcul-mesure, respectivement l'analyse en retour, est utilisée toujours plus fréquemment pour les digues. Deux tiers des contributions à la question 56 et relatives aux digues sont consacrées à ce thème. Il s'agit généralement de comparer les résultats des calculs (modèles d'éléments finis à 2 ou 3 dimensions) avec les résultats des mesures (déformations, contraintes) après la construction et le premier remplissage, dans le but d'étalonner le modèle. On peut alors en déduire une estimation plus précise des propriétés et des lois de résistance des matériaux et aboutir à une meilleure compréhension du comportement des ouvrages. Ces connaissances influenceront positivement les projets futurs, du double point de vue sécurité et rentabilité.

#### Literaturhinweise/Références

[1] L'auscultation des barrages à Electricité de France, EdF International, Paris, Juin 1985.

[2] *Egger K.*: «Geodätische Deformationsmessungen: Eine zeitgemässe Vorstellung»; «wasser, energie, luft» 74 (1982) 1/2, p. 1-4.

[3] *Robison R.*: «Surveying's new promise: Centimeters from space», «Civil Engineering/ASCE», February 1984, p. 36-40.

[4] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren: Automatisierung in der Talsperrenüberwachung; «wasser, energie, luft» 74 (1982) 11/12, S. 291-292.

Comité National Suisse des Grands Barrages: «Automatisation dans la surveillance des barrages»; «wasser, energie luft - eau, énergie, air» 75 (1983) 1/2, p. 5-6.

Adresse des Verfassers/Adresse de l'auteur: *Rudolf Müller*, Bundesamt für Wasserwirtschaft/Office fédéral de l'économie des eaux, CH-3001 Bern.