

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	79 (1987)
Heft:	1-2
Artikel:	Versuchsinstallation des Sperry-"Tilt Sensing"-Systems zum Erfassen der Durchbiegung der Bogenmauer Emosson
Autor:	Deinum, Philip J.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-940619

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: 06.02.2026

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

Versuchsinstallation des Sperry-«Tilt Sensing»-Systems zum Erfassen der Durchbiegung der Bogenmauer Emosson

Philip J. Deinum

Zusammenfassung

Der Tilt-Sensor ist ein präzises elektronisches Neigungsmessgerät (Clinometer). Durch serielles Anordnen einer Anzahl von Tilt-Sensoren übereinander und durch entsprechendes Umrechnen der Winkelveränderungen kann die Verformung eines Bauwerkes (Biegelinien) berechnet werden. Die 15monatige Auswertung in der 180 m hohen Mauer Emosson ergab eine beeindruckend genaue Übereinstimmung mit dem dort installierten Pendel. Im «Tilt Sensing System» steht somit ein ideales und kostengünstiges Überwachungsinstrument zur Verfügung, insbesondere zum Nachrüsten älterer Mauern oder als redundantes System.

Résumé: Installation expérimentale du système Sperry mesure les déflexions radicales du barrage voûte d'Emosson.

Le «Tilt Sensor» est un clinomètre électronique à haute précision. Plusieurs «Tilt Sensors» installés dans un plan vertical mesurent les changements angulaires, ce qui permet le calcul des déformations de la structure et du terrain. L'expérience faite à Emosson pendant 15 mois a démontré une corrélation impressionnante avec le pendule inversé, déjà installé en permanence. Le «Tilt Sensing System» est donc un système idéal et économique pour surveiller des structures, spécialement pour l'installation sur des barrages existants ou comme système complémentaire.

1. Einleitung

Die Überwachung von Mauerbewegungen mittels präziser Neigungswinkel-Messgeräte ist nicht neu. Zur Messung von horizontalen Bewegungen in Staumämmen werden oft Clinometer verwendet. Dagegen ist die Verwendung von Clinometern in Staumauern zur Erfassung der Durchbiegung eher selten geworden.

Das übliche Instrument zur Messung der horizontalen Bewegungen ist das Pendel, entweder als Hänge- oder als Schwimmpendel. Letzteres ist in einem tiefen Bohrloch unter der Mauer verankert und am oberen Ende durch einen Schwimmer gespannt. Es stellt dadurch – abgesehen von der Bewegung des unteren Fixpunktes – eine absolute Referenzlinie dar, von welcher Bewegungen mit einer Genauigkeit von bis zu 0,01 mm gemessen werden können. Sein Nachteil sind die hohen Installationskosten, insbesondere für eine Nachrüstung bei einer bestehenden Mauer.

Im September 1984 wurde Motor-Columbus vom kanadischen Sperry-Vertreter, der Emaco Ltd. in Montreal, angefragt, die Verwendung des Sperry-«Tilt Sensing»-Systems als Alternative oder als redundantes Instrument in Staumauern zu untersuchen. Da die früheren Erfahrungen mit den bisherigen, eher umständlichen Clinometern nicht extrapolierbar waren, empfahl Motor-Columbus eine einjährige Versuchsinstallation in einer der unter ihrer Überwachung stehenden Staumauern. Dank der aktiven Unterstützung durch die Electricité d'Emosson SA konnte deren Bogenmauer als Pilotobjekt verwendet werden. Im Juni 1985 wurden im Hauptchnitt der Staumauer Emosson 3 Tilt-Sensoren installiert.

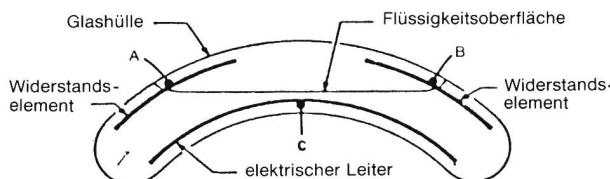
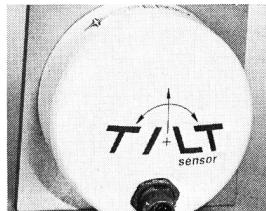


Bild 1. Prinzip des elektrolytischen Pendels. Ausgewertet wird die Änderung des Widerstandsverhältnisses von AC zu BC, die bei Kippen des Pendels entsteht.

Bild 2. Tilt-Sensor mit eingebauter Elektronik (Durchmesser 146 mm).



2. Beschreibung des Tilt-Sensors

Der Sperry-Tilt-Sensor ist grundsätzlich ein elektronisches Clinometer mit einem elektrolytischen Pendel in «Libellen»-Form, in welchem ein elektrischer Anschluss und zwei Widerstandselemente eingebaut sind (Bild 1). Die Änderung des Widerstandsverhältnisses ist das Mass für die Neigungsänderung.

Im Gegensatz zu den bisherigen Clinometern werden die Tilt-Sensoren permanent an den vorgesehenen Stellen montiert. Die Messungen können entweder lokal mit einem tragbaren Digitalanzeigegerät oder in einem Zentralgerät zentral für eine Anzahl Sensoren direkt in Bogenminuten abgelesen werden.

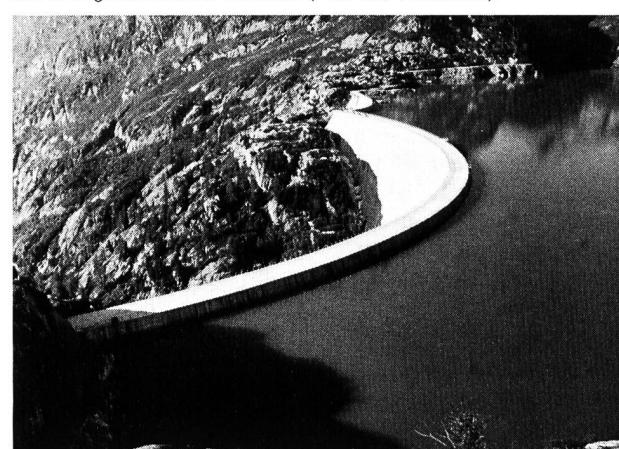
Der Messbereich des Sensors «High Resolution» (Bild 2) beträgt ± 30 Bogenminuten bei einer Auflösung von 0,01 Bogenminuten oder 0,003 mm/m. Eine Temperaturkorrektur von maximal 0,009 min/ $^{\circ}$ C ist normalerweise nötig, jedoch überflüssig im Mauerinneren, wo die Temperatur nur wenig variiert. Der Sensor ist wasserdicht, er eignet sich somit auch für den Einsatz in feuchten Staumauern.

3. Installation

Die 180m hohe Bogenmauer Emosson (Bild 3) wurde 1974 an der französisch-schweizerischen Grenze zwischen Chamonix und Martigny fertiggestellt [1]. Die Staumauer steht am Eingang einer Schlucht, die vom Bach Barbarine durch einen Felsriegel geschnitten wurde. Sie schliesst das Emosson-Gletscherbecken.

Für die Pilotinstallation wurde der Hauptsnitt (Bild 4) gewählt. Die Tilt-Sensoren wurden in radialer (Wasserseite-Luftseite) Richtung in der Nähe der Ablesestellen des Pendels Nr. 3 montiert, um so einen direkten Vergleich mit den Pendelmessungen zu ermöglichen.

Bild 3. Bogenstaumauer Emosson (Foto des Verfassers).



Die ersten drei Tilt-Sensoren wurden auf den Koten 1905 m, 1863 m und 1821 m installiert. Im Anschluss an die ersten Versuche wurde erkannt, dass die Genauigkeit der Aussage durch einen vierten Sensor auf Kote 1779 m wesentlich erhöht werden konnte. Dies wurde kurzfristig ausgeführt, so dass das System am 23. Juli 1985 betriebsbereit war.

4. Berechnung der Bewegungen

Zur Umwandlung der Winkeländerungen in horizontale Verschiebungen sollten Form und Art der Mauerdeformation bekannt sein. Bei einem normalen Trägerelement ist dies einfach, nicht so bei einer Bogenmauer. Da eine exakte Herleitung den Umfang dieses Versuches überschritten hätte, ist eine einfache Annäherung gewählt worden, die auf folgenden Annahmen beruht:

– die relative Horizontalverschiebung Δd_{i+1} zwischen zwei Messstationen i und $i+1$ kann definiert werden als

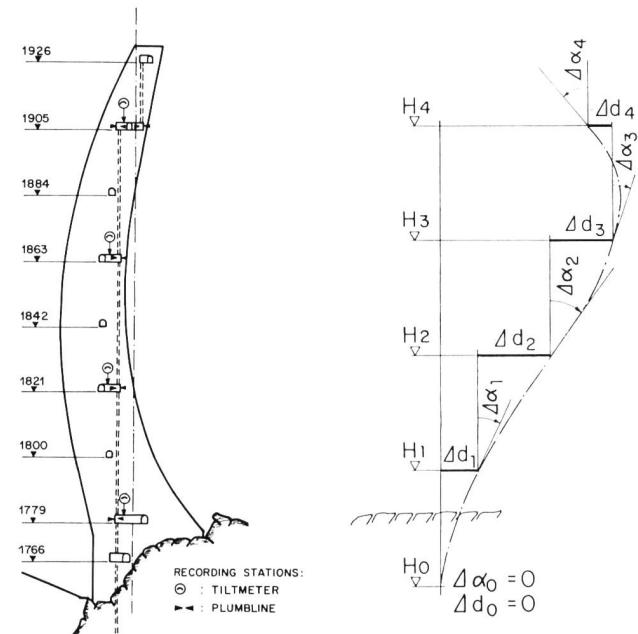
$$\Delta d_{i+1} = 0,5 (\Delta \alpha_i + \Delta \alpha_{i+1}) (H_{i+1} - H_i)$$

mit $\Delta \alpha_i$ = Winkeländerung bei Station i in Rad
 H_i = Höhe von Station i

– In einem Punkt H_0 unterhalb der Fundation betragen die Winkelveränderung und die Horizontalverschiebung Null, somit ist

$$\Delta d_1 = 0,5 \Delta \alpha_1 (H_1 - H_0)$$

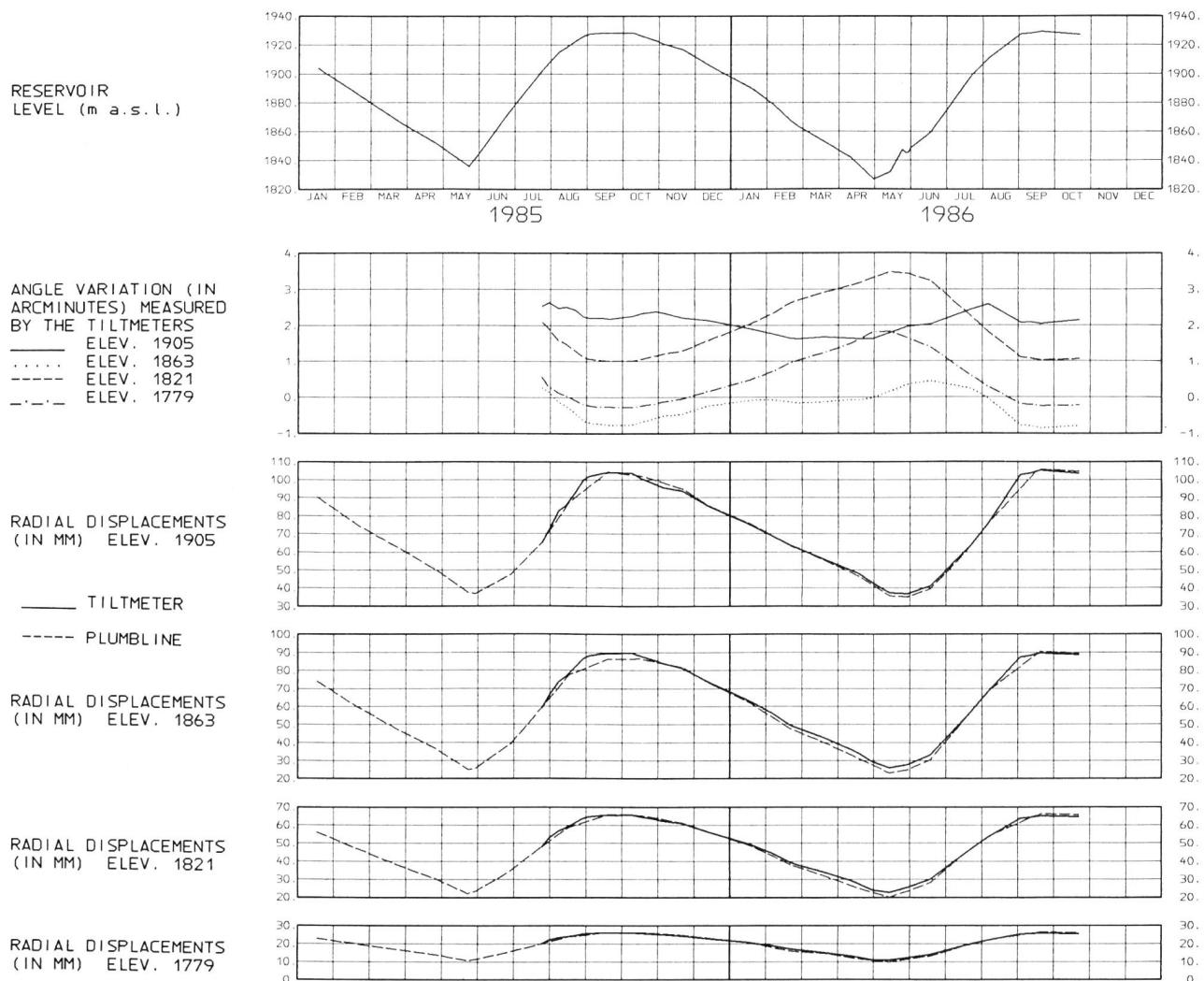
H_0 ist empirisch zu bestimmen.



▲ Bild 4. Hauptschnitt der Staumauer Emosson mit den Positionen der Tilt-Sensoren und den Pendelmessstellen.

Bild 5. Definitionen für die Berechnung der Horizontalbewegungen. ▲

▼ Bild 6. Wasserstand; Winkelmesswerte der 4 Tilt-Sensoren; berechnete Horizontalbewegungen und Vergleich mit den Pendelmesswerten.



Die gesamte Horizontalverschiebung im Punkt H_i wird gefunden durch Integration der einzelnen Teilverschiebungen zwischen H_0 und H_i (Bild 5).

5. Vergleich mit den Pendelmessungen

Die Versuchsauswertung (Juli 1985 bis Oktober 1986) deckte einen kompletten Belastungs-/Entlastungszyklus des Wasserdruckes ab. Die Messwerte wurden alle 2 Wochen abgelesen und an Motor-Columbus zur Auswertung übermittelt.

Aus Gründen des Vergleichs sind die Ausgangswerte der Horizontalverschiebungen der 4 Messpunkte mit denjenigen der Pendelablesungen zum Startzeitpunkt gleichgesetzt worden. Rechnungsgänge mit verschiedenen Werten für H_0 ergaben, dass das Drehzentrum (Nullpunkt H_0) bei einer Höhenkote von 1730m liegt, etwa 25m unterhalb der Fundation.

Die kalkulierten Werte der Horizontalbewegungen sind in Bild 6 zusammen mit den Wasserständen und den eigentlichen Winkelablesungen der Tilt-Sensoren aufgetragen. Die Übereinstimmung mit den Messwerten der Pendel ist beeindruckend genau.

6. Schlussfolgerungen

Die Eignung der Tilt-Sensoren zur Überwachung der Horizontalbewegungen in Staumauern ist durch diese Versuchsinstallation in der Staumauer Emosson belegt worden. Es sei jedoch erwähnt, dass die Kongruenz von Tilt-Sensoren- und Pendelmesswerten durch Variation von H_0 optimiert werden kann. Allerdings ist die Empfindlichkeit auf variierende H_0 -Werte gering. Das «Tilt Sensing»-System darf somit als ein ausgezeichnetes Gerät für redundante Messungen in Kombination mit dem Pendel bezeichnet werden.

Obwohl die bereits guten Ergebnisse durch zusätzliche Sensoren weiter verfeinert werden könnten, glaubt der Autor nicht, dass die Tilt-Sensoren als Alternative zum Pendel betrachtet werden können. Ungenauigkeiten durch die bei der Umwandlung von Winkeländerungen in Horizontalbewegungen getroffenen Annahmen können nicht vermieden werden.

Das «Tilt Sensing»-System ist jedoch – auch wegen seiner günstigen Installationskosten – ein ideales Instrument für die Nachrüstung von älteren Staumauern, wo keine Pendelschächte verfügbar sind. In diesen Fällen könnten die erwähnten Ausgangsannahmen durch geodätische Präzisionsmessungen abgesichert werden.

In der Schweiz wurde neben der Staumauer Piora auch die Gewichtsmauer Darbola kürzlich mit 8 Tilt-Sensoren, einem zentralen Messsystem und einem automatischen Alarm nachgerüstet [2]. Die geschätzten Totalkosten betragen 70000 Franken, wovon etwa 50000 Franken auf die Anschaffung der Geräte fallen.

Literatur

- [1] Deinum, Ph. J.: The Emosson Arch Dam/Le barrage-voûte d'Emosson. Swiss Dams – Monitoring and Maintenance/Barrages suisses – Surveillance et entretien. Swiss National Committee on Large Dams/Comité National Suisse des Grands Barrages. Baden/Zürich 1985. S. 105–111 und Schnitter, N. J.: The Emosson Arch Dam, «Water Power and Dam Construction», 1974, S. 77

- [2] Diethelm, W.: Die Überwachung der Staumauer Darbola, «wasser, energie, luft» 78 (1986) Heft 10, S. 250–254

Adresse des Verfassers: Philip J. Deinum, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, CH-5401 Baden.

Renouvellement et agrandissement des installations de l'usine électrique de Vernayaz des CFF

Martin Neuhaus

Renouvellement après 60 ans de service

L'usine hydro-électrique de Vernayaz a été mise en service en janvier 1927, à la fin de la première période de l'électrification du réseau ferroviaire national. Ses turbines et ses alternateurs tournent donc depuis presque 60 ans, sans autres interruptions que le temps strictement nécessaire à leur entretien et c'est ainsi qu'elle a produit au fil des années plus de 12 milliards de kWh. Il peut paraître étonnant que ce ne sont pas les machines, mais les conduites forcées qui ont donné le signal du «compte-à-rebours» pour le renouvellement des installations. On aperçoit le tracé rectiligne de ces conduites forcées, au flanc de la montagne, sur la rive gauche du Rhône entre Martigny et St-Maurice, peu avant la cascade de Pisseyache. Elles comprennent deux tuyaux parallèles en acier, dont le diamètre varie du haut en bas de 1,5 m à 1,2 m, fixés au sol tous les cent mètres environ par des massifs d'ancrage en béton. Pour tenir compte des expériences faites avec les conduites forcées d'autres usines des CFF, on a fait expertiser cet ouvrage entre 1970 et 1972 par le Laboratoire fédéral d'essais des matériaux de Dübendorf (EMPA). Après des essais réalisés sur place et en laboratoire sur échantillons prélevés dans l'acier des conduites, le verdict rendu par l'expert a été clair: sans être urgent, le remplacement complet de ces tuyaux devrait être considéré comme inévitable à terme. Non pas que l'acier ait vieilli avec le temps, mais la métallurgie a fait de tels progrès au cours des dernières décennies que la tôle fabriquée en 1926 ne peut plus être considérée aujourd'hui comme absolument sûre par rapport à un acier de fabrication récente, du point de vue de sa résistance au choc par température très basse. Cette considération a déterminé les CFF à entreprendre les travaux.

Etudes et projet

Deux solutions pouvaient être envisagées: ou bien chercher à minimiser les coûts immédiats en remplaçant chaque tuyau par un tuyau identique de même diamètre, suivant le même tracé, avec pour résultat de perpétuer l'existence d'un aménagement ancien sans amélioration notable; ou alors étudier une nouvelle disposition d'ensemble des ouvrages d'aménée d'eau de façon à s'adapter à la situation créée au niveau du palier supérieur de Châtelard-Barberine. Il se trouve ainsi que celui-ci peut turbiner plus d'eau que n'en peut absorber au même moment le palier inférieur. L'idée d'une adaptation des ouvrages d'aménée de ce dernier par la construction d'une nouvelle galerie sous pression et d'un puits incliné reliant Le Châtelard à Vernayaz était donc parfaitement fondée.

Les résultats d'une étude d'ensemble ont plaidé en faveur du maintien de la centrale à Vernayaz et d'une modernisation de cette dernière en trois étapes. La première de celles-ci, en cours d'exécution, consiste en la construction d'un puits blindé et d'une chambre d'équilibre. Provisoirement raccordés à la galerie d'aménée existante en provenance du bassin des Marécottes, ces ouvrages permettront d'abord de mettre hors service l'ancienne conduite forcée, qu'il ne sera cependant pas possible de démonter avant 1989. A ce moment, le funiculaire disparaîtra lui aussi; le tracé entier de la conduite pourra dès lors être reboisé, et la nature ne tardera pas à reprendre ses droits.