

Beiträge der Geodäsie zur Talsperrensicherheit – Zum 100-jährigen Jubiläum der Talsperrenvermessungen in der Schweiz

Vor 100 Jahren begannen in der Schweiz Spezialisten mit der geodätischen Überwachung von Talsperren zur präventiven Sicherung der gefährdeten, unterliegenden Bevölkerung und der Infrastrukturen. Eine Arbeitsgruppe der Gesellschaft für die Geschichte der Geodäsie in der Schweiz (GGGS) legt in einem Bericht, der auf ihrem Internetportal www.gggs.ch zusammen mit einer umfassenden Bibliografie abrufbar ist, die Entstehung und Entwicklung dieser Überwachungsmessungen dar. In der vorliegenden Kurzfassung werden die geschichtlichen Hintergründe der Talsperrenvermessung in der Schweiz beschrieben, die methodische und instrumentelle Entwicklung der geodätischen Überwachung im Überblick erläutert, sowie die modernen Technologien und möglichen Entwicklungen angesprochen.

A. Wiget, B. Sievers, R. Huser, U. Federer

Aufgaben und Ziele

Gemäss den Richtlinien, welche das Bundesamt für Energie (BFE) als Aufsichtsbe-

hörde des Bundes über die Sicherheit der Stauanlagen in der Schweiz gemeinsam mit Fachorganisationen, insbesondere dem Schweizerischen Talsperrenkomitee (STK) herausgegeben hat, ist die Geodäsie ein integraler Bestandteil der Stauan-

lagenüberwachung. Verbunden mit anderen Messeinrichtungen leistet sie wichtige Beiträge zur:

- Ermittlung des Talsperrenverhaltens als Teil der laufenden Beurteilung der Einwirkungen und des Zustandes der Anlage;
- raschen Beurteilung im Falle von aussergewöhnlichen Situationen oder nach einem ausserordentlichen Ereignis;
- Abklärung der Ursachen von Verhaltensanomalien, die mit anderen Messinstrumenten festgestellt wurden.

Geodätische Deformationsmessungen an Staumauern 1921–1945

1919–21 errichteten die Freiburger Kraftwerke an der Jogne oberhalb Broc (FR) die Talsperre *Montsalvens*. Sie war die erste doppelt (horizontal und vertikal) gekrümmte Bogenstaumauer Europas und mit 55 m Höhe die erste Staumauer der Schweiz über 30 m. Während man früher bei kleineren Talsperren mittels Alignements nur die Mauerkronenmitte überwachte, wollte man bei diesem besonderen Bauwerk erstmals die Mauerdeformationen an verschiedenen Punkten der Maueroberfläche erfassen. Zudem war die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Alignements infolge Refraktionserscheinungen und unkontrollierter Beobachtungspfeiler eingeschränkt. Ingenieur H. Zölly, Chef Geodäsie der Eidg. Landestopographie (L+T, heute swisstopo), schlug daher die Anwendung von trigonometrischen Methoden der Landesvermessung vor. Die auf der luftseitigen Mauerfläche eingelassenen Zielbolzen wurden durch wiederholtes Vorwärtseinschneiden von zwei ausserhalb des Bauwerkes gelegenen Beobachtungspfeilern aus eingemessen (Fig. 1 – franz. Version). Die ersten Messungen fanden vom 4.–7.1.1921 vor dem Einstau und vom 28.11.–1.12.1921 bei vollem See statt.

Im Juli 1922 wurde die trigonometrische Methode an der Bogenstaumauer *Pfaffensprung* (UR) der Schweizerischen Bundesbahnen SBB bei deren Füllung erneut

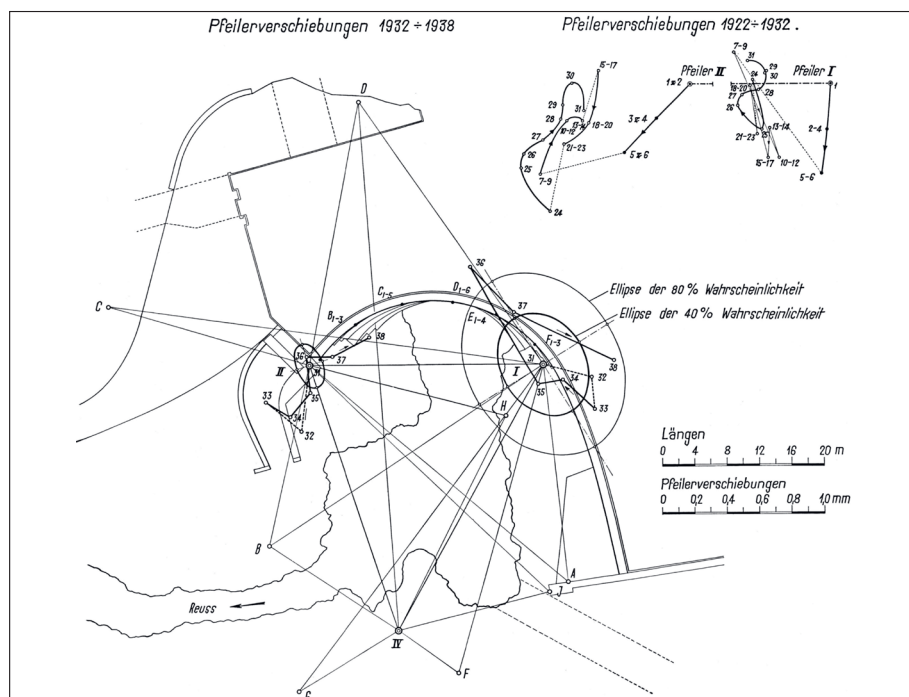


Abb. 1: Netzplan der erweiterten Beobachtungsanlage «Pfaffensprung» und geodätisch bestimmte Pfeilerverschiebungen (Lang in STK 1946).

eingesetzt (Abb. 1). Um die Mauerbewegungen möglichst zeitnah sowohl beim Einstauen wie beim Entleeren messen zu können, wurden die Mauerbolzen gleichzeitig durch zwei Beobachter von zwei Pfeilern aus vorwärts eingeschnitten und bestimmt.

Staumauerunfälle im Ausland beunruhigten breite Kreise der Bevölkerung bezüglich der Sicherheit der Talsperren. Aber auch der Bau immer höherer Staumauern veranlasste die Behörden und die Werkbetreiber, geodätische Deformationsmessungen zur Kontrolle des elastischen Verhaltens der Staumauern ausführen zu lassen. So beauftragte in den frühen 1920er-Jahren auch die AG Kraftwerk Wägital die L+T als «neutrale Amtsstelle», die Deformationen der Staumauern *Rempen* (SZ) und *Schräh* (SZ, Abb. 2; bis 1930 mit 111 m die höchste Gewichtsmauer der Welt) trigonometrisch und nivellistisch zu kontrollieren.

Trigonometrische Messmethoden an Staumauern

Die Ingenieure der L+T adaptierten die trigonometrischen Methoden der Staumauermessungen mit Richtungs- und Winkelmessungen (Triangulation), Vorwärts- und Rückwärtseinschneiden sowie Präzisionsnivelllements aus den Erfahrungen der Landesvermessung. Die L+T war praktisch bei allen Staumauern mit einer Sperrenhöhe über 20 m, welche von 1920 bis 1940 in der Schweiz erstellt wurden, mit Beratungen und Messungen beteiligt: Bei den SBB-Staumauern *Piora* (Ritom TI), *Barberine* (VS, Fig. 2) und *Les Marécottes* (VS), beim *Illsee* (VS) der Illsee-Turtmannwerke, beim Kraftwerk *Wettingen* (AG) sowie bei den Staumauern *Spitallamm*, *Seeuferegg* und *Gelmer* (BE) der Kraftwerke Oberhasli AG. Die «Spitallammsperre» war die erste Mauer, deren Deformationen schon während der Bauausführung verfolgt wurden. Die Staumauern *Garichte* (GL) der Kraftwerke Sernf-Niedererbach AG und *In den Schlagen* am Sihlsee (SZ) der Etzelwerk AG wurden, wie viele der oben genannten Mauern, seit ihrem Bau bis 2020 von der L+T/swisstopo mittels geodätischen Deformationsmessungen überwacht.

Die geodätische Methode wurde von den Ingenieuren der L+T bezüglich Netzanlage, Materialisierung und Instrumentarium stetig weiterentwickelt. Nebst Verbesserungen an den Instrumenten, also den Präzisions-Theodoliten und Nivellieren mit zugehörigen Invar-Messlatten, wurden für die hochpräzisen Anwendungen der Ingenieurgeodäsie auch spezielle Entwicklungen bei den Zwangszentrierungen sowie den Zielmarken und Zieltafeln getätigt. Die L+T stellte dazu eigene Untersuchungen an, beispielsweise zur optimalen Dicke des Fadenkreuzes im Fernrohr oder zur Ausgestaltung der Zielmarken und Mauerbolzen sowie deren Montage an verschiedenen Maueroberflächen und im Fels. Sie arbeitete eng mit den Instrumenten-Herstellerfirmen zusammen, u.a. der Max Hildebrand GmbH, Freiberg in Sachsen, Kern & Co. AG in Aarau und Wild Heerbrugg AG. Die Firma Haag-Streit AG, feinmechanische Werkstätte in Bern, konstruierte für die L+T nach deren Angaben spezielle Bolzen und Zielmarken für die Staumauervermessungen, teilweise sogar als Einzelanfertigungen für bestimmte Zieldistanzen.

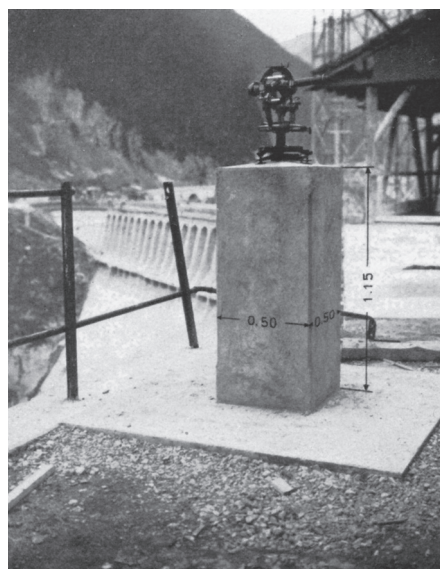


Abb. 2: Beobachtungspfeiler im Netz der Staumauer «Schräh»; Einachsertheodolit von Hildebrand (Lang 1929).

Mit der Geodäsie konnten die räumlichen Verformungen der Sperren, welche die Erbauer besonders interessierten, bereits

beim ersten Aufstau bestimmt werden. Im Allgemeinen haben sich die Staumauern übrigens beim Einstau mehr deformiert als die damalige Theorie vorsah und diese Deformationen haben sich beim Absenken des Seespiegels nur zum kleinen Teil zurückgebildet. Die Verformungen vieler Mauern wurden anschliessend im Wechsel des Auf- und Abstaus bis zur Erreichung der (nahezu) endgültigen Elastizität untersucht. Erst dann setzten die langperiodischen Kontrollmessungen der Talsperre ein. Als grosser Vorteil der geodätischen Überwachung ist zu erwähnen, dass ihre Methoden von der Netzanlage über die Instrumentierung, Signalisierung und Durchführung der Messungen bis hin zur Auswertung relativ flexibel und situativ auf die verschiedenen Talsperrentypen und lokalen Verhältnisse angepasst werden können. Von Bedeutung ist zudem, dass mit den geodätischen Methoden auch allfällige Bewegungen des Fundamentfelsens sowie der Talsperrenumgebung erfasst werden.

Dokumentation und Erfahrungsaustausch

Die L+T berichtete im Beitrag «Trigonometrische Beobachtung der elastischen Deformationen der Staumauer am Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg der S.B.B.» über diese Messungen, ihre Erfahrungen und die Resultate. Der Bericht wurde 1923 sowohl in der Schweizerischen Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik wie auch in der Schweizerischen Bauzeitung publiziert. Noch detaillierter und praxisnah beschrieb Ing. W. Lang die Methode und Anordnung der trigonometrischen Deformationsmessungen, die Materialisierung der Pfeiler und Bolzen, die Instrumentierung sowie die Auswertung und die Diskussion der Resultate der Beobachtungen in dem von der L+T 1929 publizierten Buch «Deformationsmessungen an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie» (Lang 1929). Er erläuterte auch sorgfältig die Methodik zur Untersuchung der Festpunkte sowie allfälliger Bewegungen des Umfeldes der Talsperre

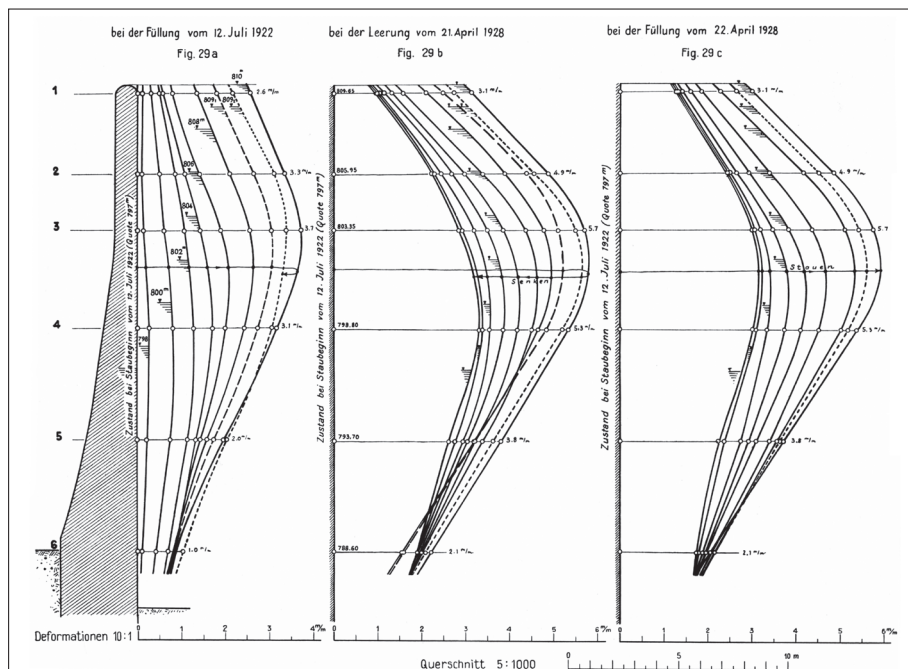


Abb. 3: Deformationslinien quer zur Staumauer «Pfaffensprung» (Lang 1929).

und dokumentierte instruktive Darstellungen der Deformationen und Verschiebungen (Abb. 3/Fig. 3).

Das Buch wurde im Bauingenieurwesen und in der Geologie mit Interesse zur Kenntnis genommen und in Fachpublikationen zitiert. Die Veröffentlichungen der L+T fanden auch im benachbarten Ausland und in Nordamerika Beachtung und teilweise Nachahmung. Auf Empfehlung der Elektrobank Zürich (spätere Elektrowatt AG) wurden Ingenieure der L+T zwischen 1929 und 1937 sogar persönlich zu Beratungen, Messungen und Auswertungen von geodätischen Deformationsmessungen an drei Staumauern in Spanien beigezogen. Gelegenheiten zum Wissens- und Erfahrungsaustausch boten ab den 1930er-Jahren auch die Kongresse der Internationalen Kommission für Grosse Talsperren ICOLD sowie die Fachtagungen der 1930 gegründeten Schweizerischen Talsperrenkommission, welche 1948 zum Schweizerischen Nationalkomitee für Grosse Talsperren (SNGT) erweitert und 1988 in Schweizerisches Talsperrenkomitee (STK) umbenannt wurde. Die Arbeitsgruppe Talsperrenüberwachung des STK erarbeitete ihrerseits Empfehlungen für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei

Stauanlagen. Diese geben grundlegende und umfassende Informationen zu den Anforderungen an die Messkonzepte und Messanlagen, die Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen sowie die Interpretation und Dokumentation der Messresultate bis hin zur Archivierung. Die Berichte sind zusammen mit weiteren Informationen auf der Webseite www.swissdams.ch abrufbar.

Der grosse Aufschwung 1945–1980

Nach dem Zweiten Weltkrieg, besonders in der Zeit von 1955 bis 1969, folgte wegen dem Kraftwerkboom ein grosser Aufschwung im Schweizer Talsperrenbau, auch bezüglich Kühnheit der Ausführungen. Dank den im allgemeinen guten Felsverhältnissen in den Alpen wurden die neueren Staumauern primär als Bogen- oder Bogengewichtsmauern errichtet, wie die 1948 vollendete, weitgespannte Bogenmauer über die Saane bei *Rossens* (FR). Als weitere Beispiele seien erwähnt: *Mauvoisin* (VS, Fig. 4), welche 1957 als damals grösste Bogenmauer der Welt in Betrieb genommen wurde und die 1961 fertiggestellte und bis 1980 weltweit höchste Gewichtsmauer *Grande Dixence*

(VS). In den 1970er-Jahren wurden die ersten grossen Pumpspeicherwerke in Betrieb genommen bzw. umgerüstet, wie beispielsweise *Robiei–Naret/Cavagnoli* (Maggia Kraftwerke AG), *Mapragg–Gigerwald* (Kraftwerke Sarganserland AG) oder *Grimselfsee–Oberaarsee* (Kraftwerke Oberhasli AG).

Weiterentwicklung der Mess- und Auswertemethoden

In dieser Zeit wurden an verschiedenen Hochschulen im In- und Ausland die Methoden zur Überwachung von Talsperren und ganz allgemein von grossen Bauwerken wie Brücken und Tunnels wissenschaftlich untersucht und weiterentwickelt; so auch die geodätischen Methoden – in der Schweiz insbesondere an den Instituten für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der Eidgenössischen Technischen Hochschulen in Zürich (ETHZ) und Lausanne (EPUL/EPFL).

1947 wurde F. Kobold, der seit 1932 als Ingenieur bei der L+T tätig war und dort bei Deformationsmessungen an Staumauern mitwirkte, als Professor für Geodäsie und Topografie an die ETH Zürich berufen. Er brachte seine Erfahrungen und sein Engagement für dieses Thema mit an das IGP. An der EPUL/EPFL engagierte sich Prof. W. K. Bachmann für die Weiterentwicklung der Methoden und Instrumente für geodätische Deformationsmessungen. Zur Gewährleistung des Praxisbezugs führte das Institut de photogrammétrie et de géodésie der EPFL ab 1952 geodätische Deformationsmessungen an der Staumauer *Châtelot* aus, ab 1954 auch an der Staumauer *Mauvoisin*. Beide Professoren bzw. Institute arbeiteten wiederum eng zusammen mit den Schweizer Firmen für geodätische Instrumente, der Kern & Co. AG in Aarau sowie der Wild Heerbrugg AG. Beispiele für die Weiterentwicklung geodätischer Instrumente dieser Zeit sind die Verbesserungen an den Zentriereinrichtungen (Kugelfenzentrierungen resp. Pfeilergrundplatten), welche Theodolitaufstellungen mit einer Genauigkeit von Zehntelmillimetern ermöglichten (Abb. 4/5). Zwangszentrierungen hatten sowohl bei den Polygonzügen wie bei

deren Verknüpfung mit der Triangulation grossen Einfluss auf die Genauigkeit. In den 1970er-Jahren wurden die mechanischen Sekundentheodolite von Wild und Kern sowohl bezüglich Messgenauigkeit wie auch Komfort weiterentwickelt (z.B. verbesserte Fernrohroptik und diametrale Kreisablesung mit Mikrometer).

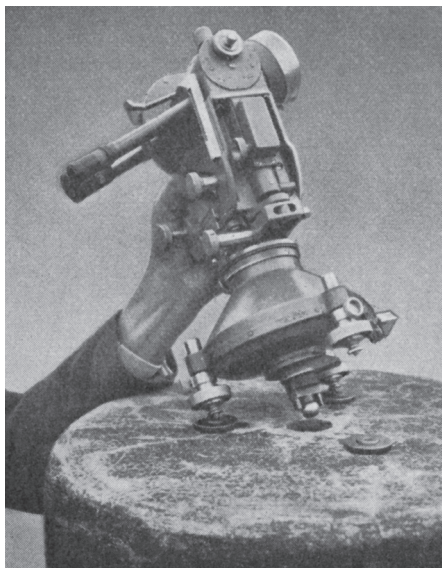


Abb. 4: Wild T3 mit Kugلزentrierung (Untersee 1951).

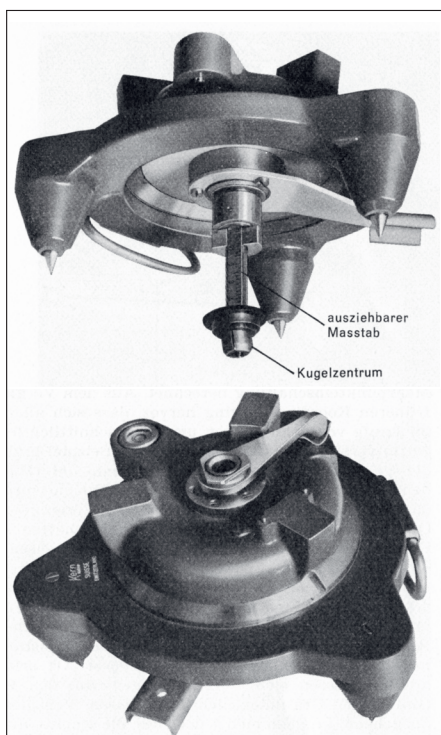


Abb. 5: Kern Pfeilergrundplatte (Kern 1958).

Ein wesentlicher Grund für das Interesse an neuen, verbesserten Messmethoden waren die grösseren Dimensionen der neu gebauten Talsperren, welche trigonometrische Visurlängen von 500 m und mehr verlangten. Bereits bei der Planung neuer Stauanlagen wurde deren spätere Überwachung vermehrt beachtet und in die Projektierung einbezogen. Die Überwachungskonzepte der bestehenden wie der neuen Talsperren wurden erweitert, die geodätischen Beobachtungsverfahren verbessert und den Baugrössen angepasst. Neben den Methoden der Landesvermessung wurden weitere vermessungstechnische und geophysikalische Verfahren und Instrumente der Geotechnik und der Felsmechanik mit der Geodäsie kombiniert, primär im Innern der Staumauern. Beispielsweise wurden Draht-Alignements und Präzisionspolygonzüge in den Kontrollgängen gemessen und die Referenzpunkte der Lote/Pendel daran angeschlossen; dies direkt durch Einmessen der Lotdrähte oder durch Kontrollpunkte sehr nahe bei den Aufhängungen oder Ablesestellen der Loteinrichtungen.

Für die Polygonzüge waren auch die neuen Methoden der Distanzmessung von Interesse. Ab den 1950er-Jahren wurden Polygonseiten mit Invarbändern und -drähten gemessen (Abb. 6), mit denen in den Kontrollgängen der Mauern eine Standardabweichung von 0.07 mm erreicht werden konnte. An der ETHZ sowie am CERN wurden Instrumente für die Messung hochgenauer Distanzänderungen mittels Invardrähten entwickelt: das Distometer ISETH und das Distinvar. Ab den 1970er-Jahren wurden geodätische Messnetze durch elektronische Distanzmessungen (EDM) erweitert und verstärkt. Dank dem Kern Mekometer ME3000 (Fig. 5) erreichten diese ein Genauigkeitsniveau im Submillimeterbereich, sodass sie in den hochpräzisen Deformationsmessungen eingesetzt werden konnten. Die Distanzmessungen erlaubten es, die Messnetze luft- und see-seitig mit geringerem Aufwand durch zusätzliche Referenz- und Kontrollpunkte zu erweitern (Abb. 7). Zudem brachte die



Abb. 6: Distanzmessung mit Invarband/-draht; Spannbock und Ablesemasstab für Polygonmessung auf der Staumauer «Malvaglia» (Kern Bulletin 7, 1963).

EDM einen deutlichen Zeitgewinn und damit eine Effizienzsteigerung bei der Durchführung der Messungen, welcher höchst willkommen war. Denn nebst der Komplexität der Messkonzepte und der erforderlichen grossen Erfahrung war der enorme Zeitaufwand ein deutlicher Nachteil gegenüber den meisten anderen Methoden der Talsperrenüberwachung. Seit Mitte der 1960er-Jahre wurden auch in der Rechentechnik und in der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) wichtige Fortschritte erzielt. Die Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate war eine Voraussetzung für die Optimierung und die effiziente Auswertung moderner geodätischer Netze, für angemessene geometrische Analysen

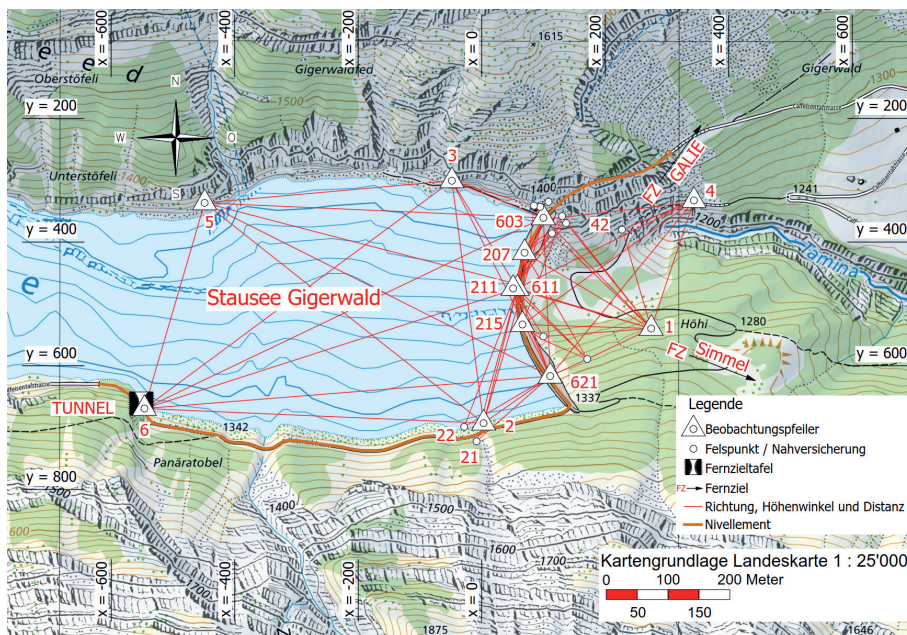


Abb. 7: Erweitertes Aussennetz der Staumauer «Gigerwald» (© Schneider Ingenieure AG).

und Interpretationen von Deformationen sowie für korrekte Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Resultate. Schliesslich trugen die neuen EDV-Mittel wesentlich bei zu besseren oder zumindest einfacher erstellbaren grafischen Darstellungen der Deformationen und ihrer Signifikanz.

Verbreitung des Wissens

Um über die Ausbildungslehrgänge hinaus weitere Kreise mit den neuen Methoden der Distanzmessung und später allgemein der Ingenieurvermessung vertraut zu machen, organisierte das IGP der ETHZ gemeinsam mit anderen technischen Universitäten des deutschsprachigen Raums die periodisch durchgeführten Kurse für geodätische Streckenmessung, später Ingenieurvermessungskurse IVK genannt. Auch Kongressvorträge und Zeitschriftenartikel behandelten regelmässig neuste Entwicklungen und Erkenntnisse für die Talsperrenüberwachung.

Die Professoren und Mitarbeiter der Hochschulinstitute wurden von privaten Ingenieurunternehmungen für die Beratung oder Mitarbeit bei Deformationsmessungen beigezogen. Es ist denn auch nicht verwunderlich, dass die von ehema-

ligen Institutsmitarbeitern gegründeten Vermessungsbüros ab den 1960er-Jahren, also in der Blütezeit des schweizerischen Staumauerbaus, neben der L+T/swisstopo ebenfalls mit Kartierungs-, Bau- und Überwachungsmessungen an schweizerischen und ausländischen Talsperren beauftragt wurden. Schliesslich war die Ausweitung der Durchführung geodätischer Deformationsmessungen auf private Firmen auch wegen der zunehmenden Anzahl der zu überwachenden Objekte unerlässlich.

Erneuerungen und Erweiterungen 1980–2021

Der Ausbau der Wasserkraftanlagen in den Alpen wird in dieser Epoche deutlich geringer vorangetrieben. Abgesehen von den jüngsten Pumpspeicherwerken werden vor allem Sanierungen (z.B. zur Verminderung von Erdbebenrisiken), Erneuerungen und Mauererhöhungen ausgeführt. Dennoch müssen die bestehenden geodätischen Überwachungsnetze unterhalten, erneuert und teilweise erweitert werden. Gründe dafür sind der Wegfall von Referenz- und Kontrollpunkten oder einzelner Visuren, hauptsächlich durch Bautätigkeiten. Aber auch neue

Erkenntnisse bezüglich der Stabilität bisheriger Referenzpunkte («Fixpunkte») können eine Überprüfung und Ergänzung der Messanlage erfordern. Zudem führen modernere Instrumente zu Modifikationen, Verbesserungen und Erweiterungen der Überwachungskonzepte. Sie können sowohl erhöhte Genauigkeiten ermöglichen, raschere und effizientere Ausführung der Messungen erlauben oder auch grundsätzlich neue Möglichkeiten der Bestimmung von Deformationen am Bauwerk und dessen Umfeld bieten.

Die meisten Talsperren der Schweiz haben mittlerweile einen konsolidierten elastischen Deformationszustand erreicht, der primär von Temperatur- und Wasserstandsänderungen beeinflusst wird. Dennoch sind einzelne Talsperren sehr kleinen Verschiebungen, Setzungen oder Hebungen unterworfen. Daher muss es ein Ziel des Überwachungskonzeptes sein, nebst der Bestimmung der (relativen) elastischen Verformungen infolge unterschiedlicher Kraft- und Umwelteinflüsse auch einen (absoluten) Bezug zu geologisch stabilen Zonen herzustellen. Daraus wiederum ergibt sich situativ der Bedarf nach erweiterten geodätischen Deformationsnetzen, welche insbesondere mit Präzisionsnivelements, Präzisionsdistanzen und GNSS-Messungen realisiert werden können. Die zu erwartenden Bewegungen sind meist sehr klein und erfordern höchste Genauigkeit (d.h. Richtigkeit und Präzision).

Die optimale (örtliche und zeitliche) Kombination des «äusseren» geodätischen Netzes mit dem «inneren» Messsystem, welches primär aus nichtgeodätischen Methoden und Instrumenten besteht (z.B. Lote/Pendel, Neigungs-, Fugen- und Dehnungsmesser, etc.), trägt wesentlich zur verbesserten Überwachung und Interpretation bei. So können die hochgenauen relativen und häufiger ausgeführten «inneren» Messungen mit den selteneren geodätischen Beobachtungen verbunden werden, um absolute Verschiebungen zu bestimmen. Selbstverständlich sind auch die Temperatur- sowie die Wasserstands- und Sickerwassermessungen damit zu kombinieren und zu interpretieren. Schliesslich sollen geophy-

sikalische und geotechnische Messinstallationen wie Gleitmikrometer oder -deformeter, Bohrlochstensometer etc. an die geodätischen Netze angeschlossen werden. Die bereits in der vorherigen Epoche 1945–1980 erwähnte Vielzahl vermessungstechnischer, geophysikalischer und geotechnischer Methoden, die nebeneinander beobachtet und ausgewertet werden, wird in modernen Überwachungskonzepten zum eigentlichen «Systemdenken» erweitert, indem sie direkt, also mittels identischer Messpunkte kombiniert und die Resultate gesamthaft analysiert werden.

Aktuelle Methoden und Konzepte der Talsperrenvermessung

Noch heute bilden die «klassischen» Methoden das Rückgrat der geodätischen Deformationsmessungen an Talsperren. Ab den 1980er-Jahren haben die Entwicklungen in der Elektronik und im Instrumentenbau zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeiten der geodätischen Deformationsmessungen beigetragen. Seit 1986 ermöglicht das Kern Mekometer ME5000 (Abb. 8), das bis heute zu den Distanzmessern höchster Präzision zählt, das Messen von Distanzen im Nahbereich oder im Innern der Talsperren im Submillimeterbereich; bei sorgfältiger Erhebung repräsentativer Meteo-Parameter auch über einige Kilometer im äusseren, erweiterten Netz im Millimeterbereich. In jüngster Zeit sind in Tachymetern und Totalstationen Distanzmesser mit ähnlicher Ge-

nauigkeit eingebaut. Zudem ermöglichen die Instrumente neuester Generation dank schnelleren Messverfahren sowie der Motorisierung und dem automatischen Anzielen von Reflektoren raschere und bequemere Messungen, was wiederum die Genauigkeit steigert.

1988 hat swisstopo die ersten satellitengestützten GPS-Messungen an Stauanlagen in der Schweiz durchgeführt (Fig. 6). Wie anfangs der 1920er-Jahre mit den Methoden der Landestriangulation haben diese Entwicklungen einen engen Bezug zu Neuerungen in der Landesvermessung. Dank den GPS- und später GNSS-Messungen kann die bisherige Einschränkung der notwendigen Sichtverbindung zwischen den Messpunkten umgangen werden. Dies ermöglicht es, erweiterte Referenznetze mit Festpunkten in entfernter liegenden, geologisch stabilen Zonen zu errichten. Zudem ermöglichen GNSS-Messungen in situ den Massstab der eingesetzten Distanzmesser zu überprüfen. Denn die Etablierung eines hochgenauen äusseren Referenzrahmens setzt die Gewährleistung eines «absoluten» Massstabes voraus, beispielsweise zur zuverlässigen Beurteilung von Talverengungen. Dies im Gegensatz zu den Bestimmungen der (kurzfristigen) elastischen Verformungen in den Anfängen der trigonometrischen Netze, bei denen die differentiellen Verschiebungsmessungen rein auf Vorwärtseinschnitten basierten und der Netzmassstab noch eine untergeordnete Rolle spielte.

Wesentliche Verbesserungen bringen selbstverständlich auch in dieser Epoche die Digitalisierung und die Weiterentwicklung der EDV-gestützten Auswertung. Die geodätischen Netze werden sogar über mehrere Messepochen «in einem Guss» streng ausgeglichen. Dies ermöglicht eine bessere und zuverlässigere Beurteilung der Resultate und eine verbesserte Dokumentation und grafische Darstellung der Ergebnisse der Deformationsanalyse. Dazu sind in der Ingenieurvermessung verschiedene Softwareprodukte im Einsatz, welche sich in den zugrundeliegenden mathematischen

Modellen (z.B. getrennte Ausgleichung von Lage und Höhe oder 3D-Ansatz), in der Art der kombinierten Ausgleichung von trigonometrischen und GNSS-Messungen oder in der Möglichkeit der gemeinsamen Ausgleichung mehrerer Messepochen unterscheiden.

Mit den heutigen Instrumenten und Softwarewerkzeugen sind auch kontinuierliche Überwachungen von Talsperren möglich. Im Gegensatz zu automatisierten Instrumentierungen im Innern der Staumauern (z.B. automatische Pendelablesungen) sind vollautomatische, kontinuierliche geodätische Überwachungen noch die Ausnahme. Zumindest mit GNSS-Geräten wären sie allerdings relativ einfach und kostengünstig realisierbar (siehe Geomonitoring).

Aktivitäten von Schweizer Firmen an Talsperren im Ausland

Während in der Schweiz in dieser dritten Epoche (ab ca. 1980) primär bestehende Stauanlagen erneuert sowie teilweise erhöht und die zugehörigen geodätischen Überwachungsnetze wie beschrieben erweitert wurden, sind das Wissen und die Erfahrung von Schweizer Firmen und Ingenieuren auch im Ausland für den Bau und die Ertüchtigung von Talsperren gefragt. Dank den guten Kontakten zu grossen Schweizer Ingenieur-Dienstleistungsunternehmen, welche beim Bau von Wasserkraftwerken und Stauanlagen weltweit tätig waren und sind, können Schweizer Vermessungsfirmen und Geodäten ihre wertvollen Kenntnisse auch beim Bau und der Überwachung von Stauanlagen im Ausland einbringen. Auf der GGGs-Webseite sind die Auslandaktivitäten in einem Anhang zum Hauptbericht zusammengestellt.

Moderne Methoden

Seit der Jahrtausendwende werden neue Methoden ergänzend zu den vorgehend beschriebenen eingesetzt: Geomonitoring, Faseroptische Messsysteme, terrestrisches Laserscanning, terrestrische bzw. satellitengestützte Radarinterferometrie und weitere.



Abb. 8: Kern Mekometer ME5000 (1994) vor der Staumauer «Mauvoisin» (© Pöry Schweiz AG).

Geomonitoring

Zwei Ereignisse bzw. Erkenntnisse im Zusammenhang mit Tunnelbauten motivierten die Bauherrschaft AlpTransit Gotthard (ATG) 1998 zu einem umfassenden Geomonitoring im Gebiet von Stauanlagen der Kraftwerke Vorderrhein AG: Die Beschädigung der Staumauer Zeuzier 1978 infolge der Ausbrucharbeiten des Sondierstollens zur Prospektion des Rawiltunnels sowie die anlässlich des Landesnivellements von swisstopo ent-

lang der Gotthard-Passstrasse festgestellten Setzungen von bis zu 12 cm, welche auf den in den 1970er-Jahren erfolgten Bau des Gotthard-Strassentunnels und dessen Drainagewirkung zurückgeführt werden konnten.

Zusätzlich zu den erweiterten «episodischen» Messungen gemäss Stauanlagenverordnung wurden deshalb zur Überwachung der Talquerschnitte im Umfeld der Staumauern *Curnera*, *Nalps* und *Santa Maria* spezielle, automatisierte geodäti-

sche und geotechnische Messanlagen eingerichtet (Fig. 7).

Das Monitoring vor und während dem Tunnelbau bezweckte, allfällige durch den Bau des Gotthard-Basistunnels verursachte Geländedeformationen und damit die Auswirkungen des Untertagebaus auf die drei Stauanlagen frühzeitig zu erkennen und genügend Zeit für Gegenmassnahmen zu gewinnen (Abb. 9).

Faseroptische Messsysteme

Rasche Seespiegeländerungen belasten die Talsperren von Pumpspeicherkraftwerken vermehrt. Zur Überwachung ihrer Formänderungen werden auch Glasfasern mit integrierten Messsensoren eingebaut. Die Sensoren liegen z.B. in den Blockfugen und erlauben es, Längenänderungen der Glasfaser mit einer Präzision von wenigen Mikrometern zu ermitteln.

Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Der Scanner misst die Talsperrenoberfläche in einem frei definierbaren geometrischen Punktraster dreidimensional und berührungslos (Horizontal- und Vertikalrichtung, Schrägdistanz, Intensität, evtl. RGB-Farbwert) (Abb. 10). Die rasche Messung hoher Punktmengen (bis zu 1 Mio. Punkte/s) ist in der Richtigkeit und Präzision noch tiefer als die herkömmliche, hoch redundante aber zeitaufwändige Mehrpunktbestimmung. Die Georeferenzierung und Modellbildung der Punktwolken sind herausfordernd. TLS wird künftig vermehrt, aber wohl noch für längere Zeit ergänzend zu den klassischen Methoden eingesetzt werden.

Terrestrische Radarinterferometrie

Bei sehr hohem Gefährdungspotenzial kann GB-InSAR (*ground-based Interferometric Synthetic Aperture Radar*) besonders die Umgebung von Talsperren dauernd und flächenhaft überwachen (Fig. 8a). Die Reichweite beträgt ab Sensor bis zu 4 km, die überstrichene Fläche über 5 km² und Bewegungen können im Submillimeterbereich detektiert werden, allerdings nur in Richtung der Achse des Radarstrahls (*Line-of-Sight LOS*) (Fig. 8b). Werden mehrere GB-InSAR Sensoren auf unterschied-

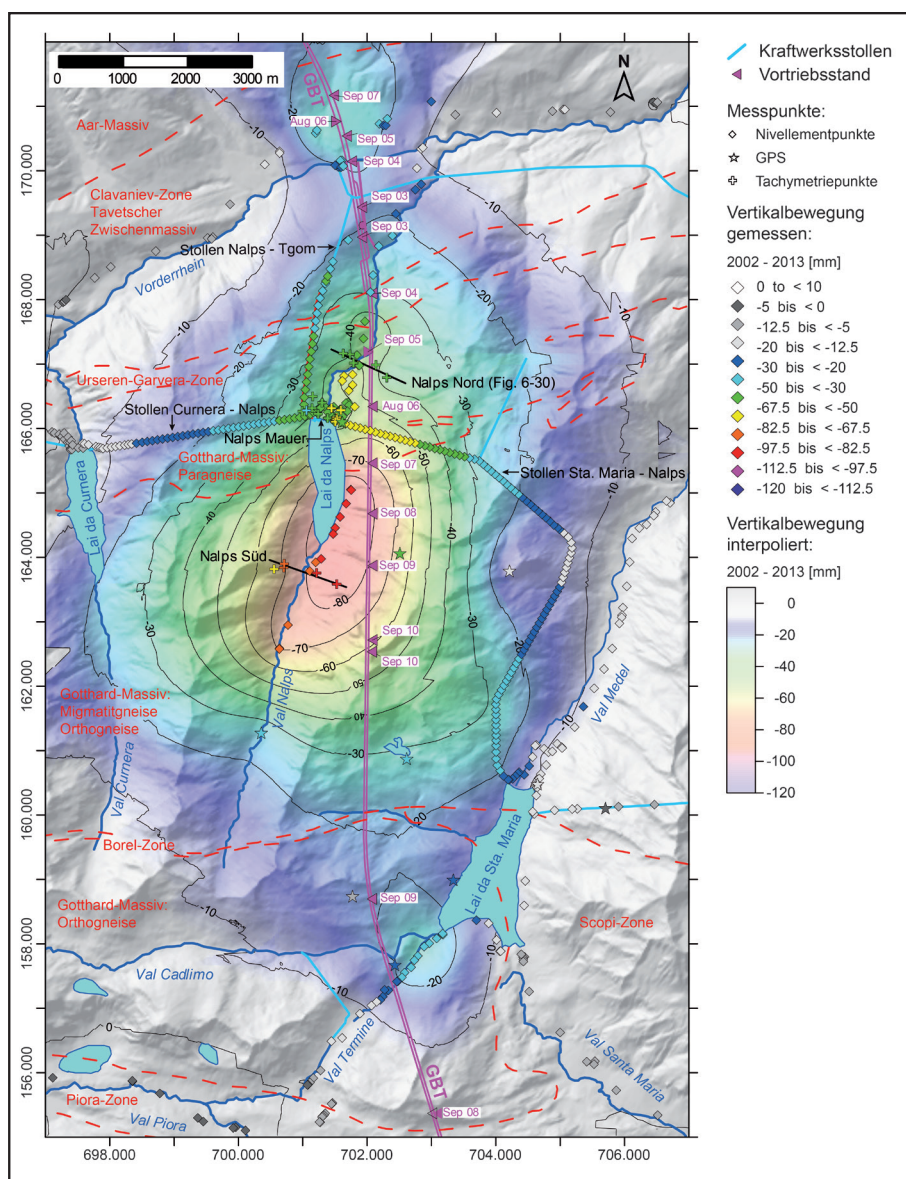


Abb. 9: Setzungen 2002–2013 gemessen mit Präzisionsnivellements, GPS und Tachymetrie gemäss Fig. 7 im Bereich der Stauanlagen der Kraftwerke Vorderrhein AG während des Baus des Gotthard-Basistunnels (Bild aus internem Expertenbericht der ATG-Fachkommission «Vortrieb und Stauhaltungen»; publiziert in: Berichte der Landesgeologie, Nr. 7, 2016; © ATG, swisstopo).

lichen Stationen eingesetzt, lassen sich 3D-Verschiebungen ermitteln. Im Umfeld von Schweizer Talsperren wurde die Methode bisher erst versuchsweise eingesetzt.

Satellitengestützte Radarinterferometrie InSAR

Die Oberflächen ganzer Täler oder Länder lassen sich aus Satelliten mit *Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)* quasi-kontinuierlich überwachen. Die Periodizität ergibt sich aus den Ausleuchtungszonen der Satellitendurchgänge. In der Schweiz werden beispielsweise Setzungen von Salzabbaugebieten, Gelände-rutschungen, Blockgletscher und Permafrostgebiete untersucht. Die Präzision der durchschnittlichen Verschiebungsraten aus differenziellen Auswertungen (*D-InSAR*) ist in LOS Richtung besser als 1 mm/Jahr, bei Einzelmessungen besser als 4 mm/Jahr.

Weitere Methoden

- Elektronische Neigungsmesser zur permanenten Bauwerksüberwachung
- Digitale geotechnische Sensoren für Kluftmessungen im Submillimeterbereich (Extensometer, Telejointmeter usw.)
- Steinschlagradar: detektiert Steinschlagereignisse bei allen Wetterbedingungen, auch bei Dunkelheit, und alarmiert innerhalb von wenigen Sekunden
- Deformationskamera: analysiert automatisch sequentielle, hochaufgelöste Bildaufnahmen und ermittelt dabei mit raffinierten Bildverarbeitungsverfahren flächige Deformationen von instabilen Hängen, Felswänden oder Gletschern auf wenige Zentimeter genau
- Bewegungssensoren, meist piezoelektrische Sensoren oder *MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems)*
- Digitale Pegelmessungen.

Ausblick

Die Zukunft kann uns aus heutiger Sicht bringen:

- Eine zunehmende Vernetzung und Integration von geodätischen, geotechnischen und weiteren Sensoren (meteo-

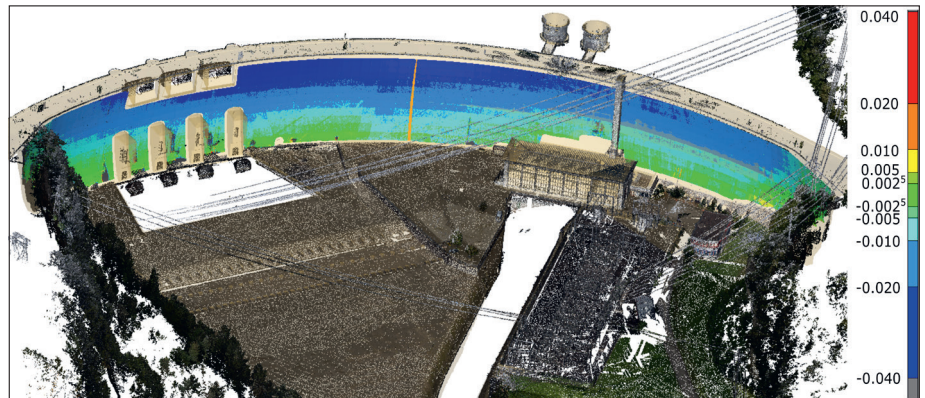


Abb. 10: Differenzmodell aus zwei Laserscans der Staumauer «Schiffenen» (© Vincent Barras; vgl. auch Wieser et al. 2020).

rologische, inertielle Messeinheiten, Wasserstandsmesser usw.)

- Ein Übergang von periodischen Messungen zu kontinuierlichen Zeitreihen auf ausgewählten, permanent und stabil installierten Messstationen
- Einbindung der geodätischen Talsperren-Überwachungsnetze mittels GNSS in den «absoluten», langfristig stabilen und gut überwachten Referenzrahmen der Landesvermessung
- In ihrer Algorithmik weiter entwickelte Auswerte- und Analyse-Hilfsmittel, d.h. komplexere Ausgleichungsmethoden, echtzeitnahe 3D-Zeitreihen- und Strainanalysen, Ableiten von Trends, Cloud-Dienste, künstliche Intelligenz, *Deep Learning*
- Einsatz neuer Technologien aus dem Bereich des *Internet of Things* zur Vernetzung und Fernsteuerung von autonomen Multisensorsystemen (*Machine-to-machine* Kommunikation über 5G, IPv6)
- Terrestrische Positionierungssysteme mit *Pseudolites* (lokal montierte Sender, d.h. «Pseudo-Satelliten»), analog zu *Ground Based Augmentation Systems (GBAS)* in der Luftfahrt
- Technologien aus den *Indoor Navigation* Methoden
- Einbezug von *Augmented* und *Virtual Reality* zur Simulation und Prognose von zukünftigen Objektzuständen.

Fazit

Hochgenaue, langjährig zuverlässige Deformationsmessungen sind ein spannendes, komplexes und höchst anforderungs-

reiches Anwendungsgebiet der Ingenieur-geodäsie. Die geodätische Überwachung von Stauanlagen wird vor allem dank ihren «absoluten» Ergebnissen ein wichtiger Pfeiler im Sicherheitskonzept der Talsperren bleiben.

Literatur und Dokumente

Auf der Webseite der GGGS <https://www.gggs.ch> sind zu finden:

- Hauptbericht der Arbeitsgruppe: Dieser vertieft die hier stark gekürzt präsentierten Inhalte, enthält das Literaturverzeichnis und © Angaben zu den Bildern und Karten und beschreibt in Anhängen die Schweizer Talsperren und die Aktivitäten schweizerischer Vermessungsbüros im Ausland
- Umfassende Bibliografie der einschlägigen schweizerischen Publikationen zu Talsperrenvermessungen
- Viele Publikationen im PDF/A Format sowie zusätzliche Bilder.

Adrian Wiget

Sonnenweg 6, 5507 Mellingen

adrian.wiget@bluewin.ch

Beat Sievers

Bahnhofstrasse 11, 3454 Sumiswald

sievers-frey@bluewin.ch

René Huser

Meisenweg 9, 8600 Dübendorf

rene.huser@glattnet.ch

Urs Federer

Oelbergweg 5, 5234 Villigen

urs.federer-kehl@greenmail.ch