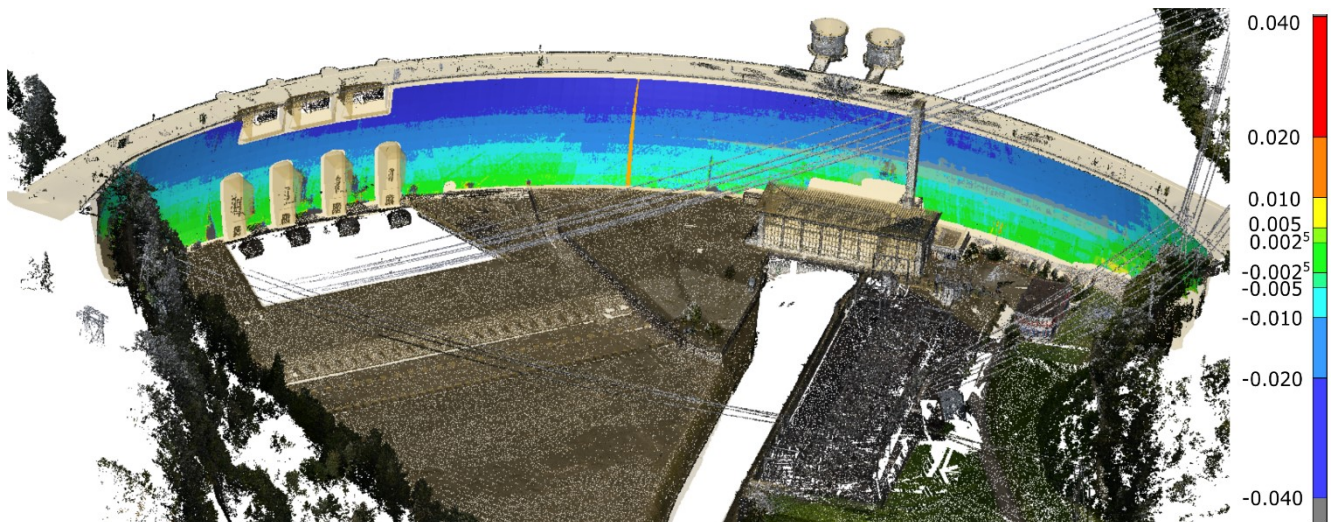
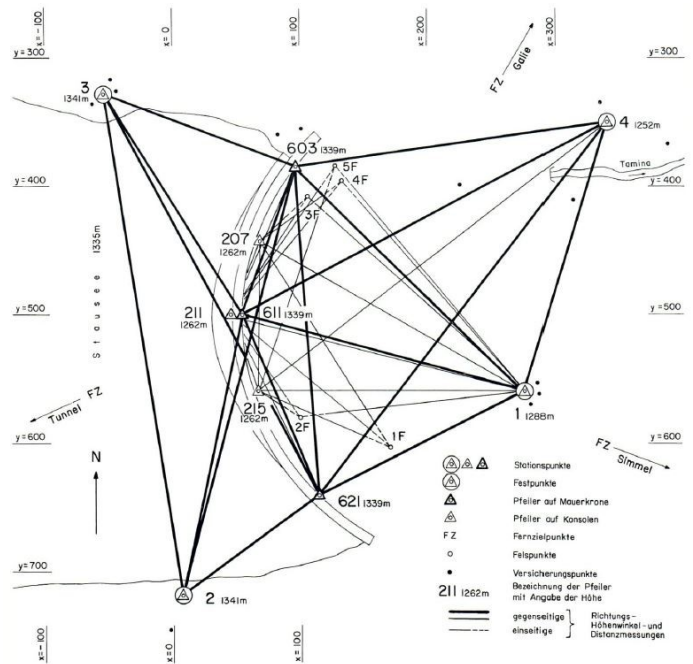


# Beiträge der Geodäsie zur Talsperrensicherheit

Zum 100-jährigen Jubiläum der Talsperrenvermessungen in der Schweiz



## Arbeitsgruppe Talsperrenvermessung

Beat Sievers, Adrian Wiget, Urs Federer, René Huser

**Inhalt**

<b>Zusammenfassung – Résumé – Sommario</b>	<b>4</b>
<b>1 Aufgaben und Ziele der Talsperrenvermessung</b>	<b>6</b>
<b>2 Geschichtliche Hintergründe und Akteure</b>	<b>9</b>
2.1 Epoche 1920 – 1945	9
2.1.1 Erste geodätische Deformationsmessungen an hohen Staumauern	9
2.1.2 Messmethoden	16
2.1.3 Dokumentation und Erfahrungsaustausch	19
2.2 Epoche 1945 – 1980	21
2.2.1 Der grosse Aufschwung	21
2.2.2 Die Weiterentwicklung der Mess- und Auswertemethoden	23
2.2.3 Verbreitung des Wissens	26
2.3 Epoche 1980 – 2021	27
2.3.1 Instandhaltung, Erneuerung und Erweiterung	27
2.3.2 Aktivitäten von Schweizer Firmen an Talsperren im Ausland	34
<b>3 Methodische und instrumentelle Entwicklungen</b>	<b>36</b>
3.1 Alignement	36
3.2 Trigonometrische Messung	37
3.3 Höhenbeobachtung	41
3.4 Distanzmessung	42
3.5 Elektronische Theodolite und Totalstationen	45
3.6 Globale Navigationssatellitensysteme GNSS	50
3.7 Geomonitoring	52
3.8 Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit	55
3.9 Dokumentation und Darstellung der Deformationen	56
<b>4 Moderne Methoden und Ausblick</b>	<b>59</b>
4.1 Geomonitoring	59
4.2 Faseroptische Messsysteme FOS	59
4.3 Terrestrisches Laserscanning TLS	60
4.4 Terrestrische Radarinterferometrie	61
4.5 Satellitengestützte Radarinterferometrie InSAR	61
4.6 Weitere Methoden	64
4.7 Ausblick	64
<b>5 Dank</b>	<b>64</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>65</b>
<b>Anhänge</b>	<b>74</b>
Anhang 1 Schweizer Talsperren und ihre geodätische Überwachung	74
Anhang 2.1 Staumauern in Spanien, an denen die Eidg. Landestopographie 1929-1937 tätig war	75
Anhang 2.2 Stauanlagen im Iran und im südlichen Afrika, an denen die Schneider Ingenieure AG (vormals Ingenieurbüro Walter Schneider AG) seit 1963 tätig ist	77
Anhang 2.3 Stauanlagen im Ausland, an denen die Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG (später Pöyry Schweiz AG bzw. AFRY Schweiz AG) seit 1970 tätig ist	82
Anhang 2.4 Stauanlagen im Ausland, an denen die Straub AG seit 1976 tätig ist	84

Anhang 2.5	Stauanlagen in Albanien, an denen die BSF Swissphoto AG von 2012 bis 2018 beteiligt war	85
Anhang 2.6	Stauanlagen im Ausland, an denen die Geosat SA seit 2013 tätig ist	87

Nachweis der Titelbilder:

Bild 1: W. Keller misst mit Kern Mekometer 3000 auf der Staumauer «Gigerwald» (Keller 1977)

Bild 2: Netzplan der trigonometrischen Messungen der Staumauer «Gigerwald» (Keller 1977)

Bild 3: *Mesh-to-Mesh* Vergleich zweier Laserscan Modelle in [m] der Staumauer «Schiffenen»  
(© Vincent Barras)

## Zusammenfassung

Vor 100 Jahren begannen in der Schweiz behördlich beauftragte Vermessungsspezialisten 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 hier die Entstehung und Entwicklung dieser Überwachungs-messungen dar.

Das erste Kapitel beschreibt die regulatorischen Grundlagen, die Aufgaben der Talsperrenvermessungen und ihre Ziele sowie die Wissensbildung und -verbreitung. Das Kapitel «Geschichtliche Hintergründe und Akteure» unterscheidet drei charakteristische Zeitepochen der geodätischen Entwicklung und nennt bedeutende, in diesen Epochen entstandene Talsperren und alle beteiligten Vermessungsbüros. Im Kapitel «Methodische und instrumentelle Entwicklung» werden die geodätischen Messmethoden, Instrumente, Auswerte- und Darstellungsmethoden besprochen. «Moderne Methoden und Ausblick» widmet sich den seit etwa 2000 zuerst versuchsweise und dann zunehmend eingesetzten Aufnahme- und Auswertemethoden und wagt abschliessend eine Prognose von künftigen möglichen Entwicklungen und Technologien.

Der Bericht nimmt auch Bezug auf wichtige Ereignisse im In- und Ausland sowie auf die Ausstrahlung der erarbeiteten Kompetenzen über die Landesgrenzen hinaus.

Schliesslich versuchte die Arbeitsgruppe, eine umfassende Bibliografie mit hauptsächlich schweizerischen Publikationen zu erstellen; die meisten sind digital verfügbar.

Dieser Bericht, eine Kurzversion (in deutscher und französischer Sprache aus der Zeitschrift «Geomatik Schweiz»), die umfassende Bibliografie und viele Publikationen im PDF/A Format sowie zusätzliche Bilder sind auf dem Internetportal der GGGS [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch) zu finden.

## Résumé

Il y a tout juste un siècle, des spécialistes des mensurations, mandatés par les autorités, se lancèrent dans la surveillance géodésique des barrages afin de contribuer à assurer la sécurité, à titre préventif, des infrastructures et des populations vivant en aval. Un groupe de travail de la Société pour l'histoire de la géodésie en Suisse (SHGS) expose ici la genèse et le développement de ces mesures de surveillance.

Le premier chapitre décrit les bases réglementaires, les missions dévolues aux mensurations des barrages et les objectifs qu'elles poursuivent, ainsi que l'acquisition et la diffusion des connaissances. Le chapitre consacré à l'arrière-plan historique et aux acteurs distingue trois grandes époques dans le développement géodésique, mentionne les principaux barrages construits à chacune d'entre elles et cite tous les bureaux de mensuration impliqués. Le chapitre portant sur le développement des méthodes et des instruments s'arrête longuement sur les méthodes de mesure géodésiques, les instruments, les processus d'exploitation des données et de présentation des résultats. Le chapitre relatif aux méthodes modernes et aux perspectives se concentre sur les méthodes de saisie et d'exploitation d'abord utilisées à titre expérimental depuis l'an 2000 environ, puis de manière de plus en plus large depuis lors, puis esquisse quelques pistes pour les évolutions à attendre et les technologies déployées.

Le rapport fait également référence à des événements importants qui se sont produits en Suisse comme à l'étranger et souligne la réputation dont jouissent nos spécialistes dans le monde entier, grâce à leur compétence reconnue dans ce domaine.

Le groupe de travail a enfin tenté de constituer une bibliographie complète comportant essentiellement des publications suisses, majoritairement disponibles sous forme numérique.

Ce rapport, une version abrégée (publiée en allemand et en français dans la revue « Géomatique Suisse »), la bibliographie complète et de nombreuses publications au format PDF/A ainsi que des illustrations supplémentaires figurent sur le portail Internet de la SHGS à l'adresse [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch).

## Sommario

Cent'anni fa in Svizzera, gli specialisti della misurazione iniziavano, su mandato ufficiale delle autorità, la sorveglianza geodetica delle dighe con lo scopo di proteggere preventivamente la popolazione e le infrastrutture vulnerabili situate a valle. Un gruppo di lavoro della Società per la Storia della Geodesia in Svizzera (SSGS/GGGS in tedesco) presenta qui di seguito le origini e lo sviluppo di queste misure di sorveglianza.

Il primo capitolo illustra le basi legali, i compiti e gli obiettivi, così come l'acquisizione e la diffusione delle conoscenze nell'ambito delle misurazioni delle dighe. Il capitolo «Retrosceca storici e parti interessate» distingue tre epoche specifiche dello sviluppo geodetico ed elenca le dighe più importanti edificate in questi periodi, citando tutti gli uffici di misurazione coinvolti. Nel capitolo «Sviluppi metodologici e strumentali» vengono trattati i metodi geodetici di misurazione, gli strumenti, i metodi di valutazione e di rappresentazione. «Metodi moderni e prospettive» è dedicato ai metodi di rilevamento e valutazione, che a partire dagli anni 2000, vennero introdotti prima in modo sperimentale per poi diventare sempre più la regola. Infine si tenta una previsione su possibili sviluppi e tecnologie future.

Il rapporto prende anche posizione su importanti avvenimenti in Svizzera e all'estero, nonché sulla diffusione delle competenze acquisite al di là delle frontiere nazionali.

Il gruppo di lavoro ha infine cercato di elaborare una bibliografia completa con pubblicazioni prevalentemente svizzere, la maggior parte delle quali sono disponibili in formato digitale.

Questo rapporto, una versione abbreviata dello stesso (in tedesco e francese pubblicato sulla rivista «Geomatica Svizzera» 7-8/2021), la bibliografia completa e molte pubblicazioni in formato PDF/A, così come ulteriori immagini si possono trovare sul portale Internet GGGS [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch).

## 1 Aufgaben und Ziele der Talsperrenvermessung

Die rechtlichen Grundlagen der Sicherheit der Stauanlagen sind im Bundesgesetz über die Stauanlagen (Stauanlagengesetz StAG, SR 721.101) und in der Stauanlagenverordnung (StAV, SR 721.101.1) geregelt. Seitens des Bundes waren über die letzten hundert Jahre verschiedene Bundesämter für die Aufsicht über die Stauanlagen verantwortlich. Heute ist das Bundesamt für Energie (BFE) die Aufsichtsbehörde des Bundes über die Sicherheit der Stauanlagen in der Schweiz. Es übt auch die Oberaufsicht über die Stauanlagen aus, welche der Aufsicht der Kantone unterstehen. Die Sektion «Aufsicht Talsperren» im BFE ist als verantwortliche Bundesstelle direkt für 200 grosse Stauanlagen mit insgesamt 222 Absperrbauwerken zuständig.

Als Vollzugshilfe hat das BFE zusammen mit Fachorganisationen *Richtlinien über die Sicherheit der Stauanlagen* herausgegeben. Darin ist das Schweizer Konzept für die Sicherheit der Stauanlagen mit den drei Elementen (1) Konstruktive Sicherheit, (2) Überwachung und Unterhalt sowie (3) Notfallkonzept beschrieben. Die gesetzlichen Grundlagen und Richtlinien für die Talsperrenüberwachung sind auf der Webseite «Talsperren» des BFE einsehbar (<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/aufsicht-und-sicherheit/talsperren/richtlinien-und-hilfsmittel.html>).

Gemäss diesen Richtlinien (Teil D) ist die Geodäsie ein integraler Bestandteil der Stauanlagenüberwachung und leistet, verbunden mit anderen Messeinrichtungen, wichtige Beiträge:

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

Die geodätischen Messungen können als alleiniges Instrument zur Bestimmung des Verformungs- und Verschiebungsverhaltens der Talsperre und ihres Untergrundes eingesetzt werden. Oder sie gelangen komplementär zu anderen Messsystemen (zum Beispiel Loten) zum Einsatz, um Lage- und Höhenänderungen von ausgewählten Punkten einer Stauanlage zu bestimmen und dadurch eine teilweise Redundanz im gesamten Überwachungskonzept zu erstellen (Biedermann in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 184–193). Kontrollpunkte (Objektpunkte) können auf der Krone und an der luftseitigen Oberfläche der Talsperre, bei gegebener Zugänglichkeit auch im Innern der Anlage (z.B. Bezugspunkte von Loten oder Drahtalignements), in den Widerlagern und in der unmittelbaren Umgebung sowie im weiteren Umfeld der Talsperre, ausserhalb deren Druckzone, in die Beurteilung einbezogen werden. Schliesslich können auch kritische Geländepartien wie Rutschhänge oder Gletscher im Gefährdungsgebiet der Stauanlage überwacht werden (Venzin in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 193–195). Die Grössenordnung der Genauigkeitsansprüche (empirische Standardabweichung) kann wie folgt zusammengefasst werden:

Deformationen	Staumauern (Beton)	Staudämme	Geländerutschungen
in der Lage	0.5 – 1 mm	2 – 5 mm	5 – 10 mm
in der Höhe	0.1 – 0.2 mm	0.5 – 1 mm	1 – 2 mm

Tabelle 1: Grössenordnung der erforderlichen Genauigkeiten (empirische Standardabweichung)

Mit geodätischen Präzisionsmessungen können die absoluten Grössen von Verformungen beurteilt werden, die mit anderen Instrumenten im Talsperrenkörper bestimmt wurden (Lote/Pendel, Inklinometer/Neigungsmesser und Fugenmesser/Dehnungsmesser/Extensometer). Verschiebungen, die nicht mit Neigungs- oder Spannungsänderungen verbunden sind, wie z.B. Gleiten auf dem Felsuntergrund, können mittels Inklinometern oder Spannungsmessern nicht ermittelt werden, wohl aber mit geodätischen Beobachtungen, welche Anschluss an aussenliegende Referenzpunkte haben. Die Geodäsie kann den Bezug der «inneren» Verformungen und Verschiebungen zum äusseren Bezugssystem in der Umgebung der Talsperre herstellen. Ihr Vorteil ist somit, dass absolute Verschiebungen, Lage- und Höhenänderungen sowohl der Staumauer / des Staudamms als auch der Foundation, der Widerlager

und der Felsformationen im Nahbereich der Stauanlage festgestellt werden können. Dazu sind allerdings die Installation, Kontrolle und Beurteilung eines messtechnisch geeigneten Festpunktnetzes erforderlich. Falls grossräumige Bewegungen, welche die Stauanlage betreffen, nicht ausgeschlossen werden können, ist gar ein erweitertes geodätisches Messnetz mit Einbezug von Festpunkten in entfernteren, geologisch stabilen Zonen notwendig, um die mittels des Nahbereichsnetzes gemessenen Absolutbewegungen in einem grossräumigen Referenzrahmen zu verankern.

Geodätische Messungen mit Millimeterpräzision sind sehr anspruchsvoll. Sie müssen von Fachpersonen durchgeführt und ausgewertet werden, die nachweisen können, dass sie die erforderliche Erfahrung und Fachkenntnis haben und über das notwendige Instrumentarium verfügen. Die Geodäsie in der Überwachung von Talsperren kann aber in den wenigsten Fällen als eine reine Vermessungsaufgabe betrachtet werden. Neben der Kenntnis von geologischen und geotechnischen Aspekten sind auch bautechnisches Wissen und das Verständnis über ein mögliches Verhalten von Stauanlagen notwendig. Denn die geodätischen Aufgaben werden im Auftrage der Kraftwerksbetreiber interdisziplinär und in enger Zusammenarbeit mit den Talsperrenwärtern und den unabhängigen Experten für Bau und Geologie erfüllt. Im Verbund mit den übrigen Kontrollverfahren und Messmethoden der Werksbetreiber wie den visuellen Kontrollen und Schachtlotmessungen der Staumauerwärter, welche das geometrische Verhalten des Bauwerkes (und evtl. der Stollensysteme) in sich überwachen, liefert die Geodäsie Grundlagen zur Bestimmung der Verformungen, Bewegungen und der Gleitsicherheit der Talsperre. Sie dient dem Nachweis der Standfestigkeit der Talsperre durch die Experten (Bauingenieur, Geologe). Als Komponente der Sicherheitsüberprüfung der Stauanlagen erfolgen die geodätischen Messungen in der Regel mindestens alle fünf Jahre. Die Berichte über die geodätischen Deformationsmessungen werden in der StAV deshalb als Teil der *Aktensammlung über die Stauanlage* aufgeführt.

Die Erbauer der Talsperren in der Schweiz und im Ausland waren bemüht, ihre Erfahrungen beim Bau und Betrieb dieser einzigartigen Baukörper untereinander auszutauschen. Am 2. Okt 1928 versammelten sich sieben Fachleute zur Schaffung eines nationalen Komitees für Talsperren. Die *Schweizerische Talsperrenkommission (STK)* wurde nach dem ersten internationalen Talsperrenkongress in Berlin im Jahre 1930 gegründet (STK 1946, S. IX). 1948 wurde diese Kommission wegen des grösser gewordenen Kreises von Erstellern und Betreibern von Stauanlagen zum *Schweizerischen Nationalkomitee für Grosse Talsperren (SNGT)* erweitert (Balissat 1998, S. 90). 1988 wurde das Komitee in *Schweizerisches Talsperrenkomitee (STK/CSB)* umbenannt. Diese Organisationen vertreten seit 1928 die Schweiz in der *International Commission On Large Dams (ICOLD)* und wirken in deren Gremien aktiv mit. Innerhalb der SNGT/STK werden verschiedene Kommissionen und Arbeitsgruppen gebildet. Für die Talsperren-Vermessung ist besonders die *Arbeitsgruppe Talsperrenüberwachung (bis 13.3.2018 Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung)* von Interesse. Seit 1970 organisiert sie gemeinsam mit der *Sektion Aufsicht Talsperren* des BFE die von den Ingenieurbüros und Betreibern hochgeschätzten jährlichen Fachtagungen (Talsperrenseminare). An folgenden Tagungen wurden die geodätischen Deformationsmessungen besonders thematisiert und in Fachbeiträgen dokumentiert, welche teilweise auch in der Zeitschrift *«Wasser, Energie Luft»* / *«Eau énergie air»* publiziert wurden (<http://www.swiss-dams.ch/de/publications/journees-d-etudes>):

- SNGT-Fachtagung 1981 in Sion (VS): Geodätische Deformationsmessungen; Exkursion nach Zeuzier (VS)
- SNGT-Fachtagung 1983 in Rapperswil (SG): Talsperrenüberwachung und Unterhalt; Exkursionen nach Schräh und Rempen (SZ)
- SNGT-Fachtagung 1989 in Lugano (TI): Überwachung der Ufer von Stauhaltungen, Massenstürze und Rutschungen; Exkursion nach Malvaglia (TI)
- SNGT-Fachtagung 1993 in Broc (FR): Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen; Exkursionen nach Montsalvens und Rossens (FR) (STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993)
- STK-Fachtagung 2007 in Disentis (GR) zur verstärkten Überwachung der Talsperren; Exkursion zur Stauanlage Nalps (GR)
- STK-Fachtagung 2014 in Chamonix (F): Messverfahren und Überwachung bei Pumpspeichieranlagen; Exkursion nach Vieux Emosson / Nant de Drance (VS).

Die Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung der STK erarbeitete auch Empfehlungen für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei Stauanlagen, z.B. die Berichte (STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993), (STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 2005) und insbesondere (Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 2013). Diese geben grundlegende und umfassende Informationen zu den Anforderungen an die Messkonzepte und Messanlagen, die Durchführung und Auswertung der geodätischen und anderer Messungen sowie die Interpretation und Dokumentation der Messresultate bis hin zur Archivierung (Schneider 1991). Auch die Rolle des Betreibers sowie die Anforderungen an den Geodäten und das Ingenieurvermessungsbüro sind beschrieben. Die Berichte sind zusammen mit weiteren Informationen auf der Website [www.swissdams.ch](http://www.swissdams.ch) (Publikationen) abrufbar. Einen umfassenden englischsprachigen Überblick mit Bezug zur Schweiz bietet (Rüeger 2006).

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass die meisten Schriften und Dokumentationen zu geodätischen Deformationsmessungen an Stauanlagen im Auftrag der Werksbetreiber und als Technische Berichte zu ausgeführten Arbeiten geschrieben wurden und daher nicht öffentlich zugänglich sind.

Weitere Hinweise und Informationsquellen zu den Schweizer Talsperren gibt der Anhang 1.



## 2 Geschichtliche Hintergründe und Akteure

### 2.1 Epoche 1920 – 1945

#### 2.1.1 Erste geodätische Deformationsmessungen an hohen Staumauern

Die ersten geodätischen Verschiebungsmessungen dürften an der «Gothaer» Talsperre in Thüringen im Jahre 1908 durchgeführt worden sein (Aeschlimann 1971, S. 10). In Mauermitte wurde die Bewegung zweier Punkte durch Alignements bestimmt (Hülsemann 1920) (vgl. Kapitel 3.1).

Nach dem Ersten Weltkrieg und anfangs der 1920er Jahre wurden in der Schweiz viele neue Talsperren für die Elektrizitätswirtschaft gebaut. 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, welche höher als 30 m war. Während man früher bei kleineren Talsperren mittels der erwähnten Alignements nur die Mauerkronenmitte überwachte, wollte man bei diesem besonderen Bauwerk in der Schweiz erstmals die Mauerdeformationen an verschiedenen Punkten der Maueroberfläche erfassen. Zudem war die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Alignementsbeobachtungen infolge Refraktionserscheinungen und unkontrollierter Beobachtungspfeiler eingeschränkt (Lang 1929, S. 9); (STK 1946, S. 8, 13). Ingenieur H. Zöllly, Chef Geodäsie der Eidg. Landestopographie (L+T), schlug daher die Anwendung von trigonometrischen Methoden der Landesvermessung vor (Lang 1929, S. 7). Die auf der luftseitigen Mauerfläche eingelassenen Zielbolzen wurden durch wiederholtes Vorwärtseinschneiden von zwei ausserhalb des Bauwerkes gelegenen Beobachtungspfeilern aus eingemessen. Die ersten Messungen fanden vom 4. – 7.1.1921 vor dem Einstau und vom 28.11. – 1.12.1921 bei vollem See statt (Lang 1929, S. 32).

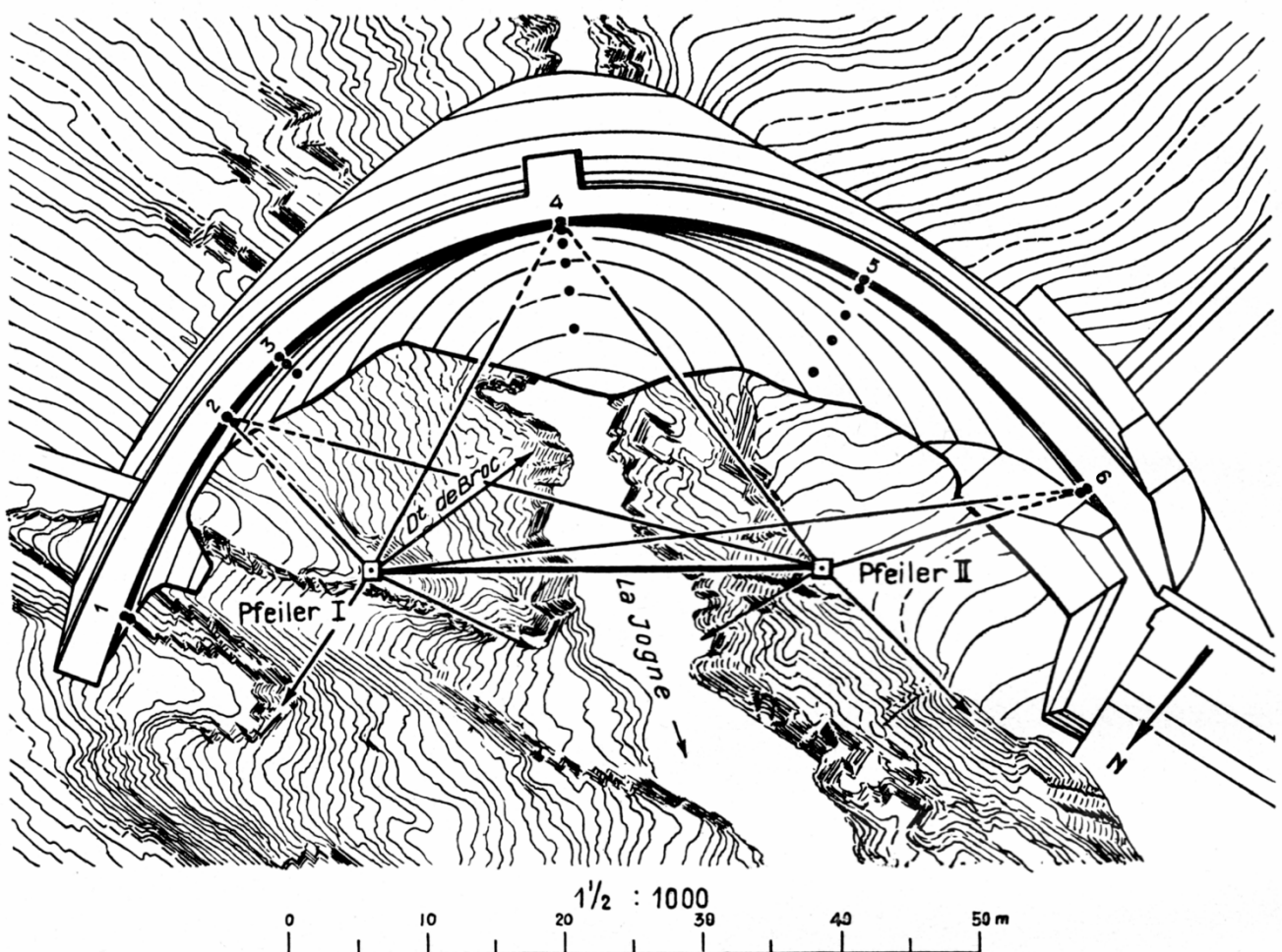


Abb. 1: Netzplan der ersten geodätischen Deformationsmessungen 1921 an der Talsperre «Montsalvens» (Lang 1929)

Dieses erste Messnetz wurde 1932 durch zwei zusätzliche Beobachtungspfeiler erweitert (Abb. 2):

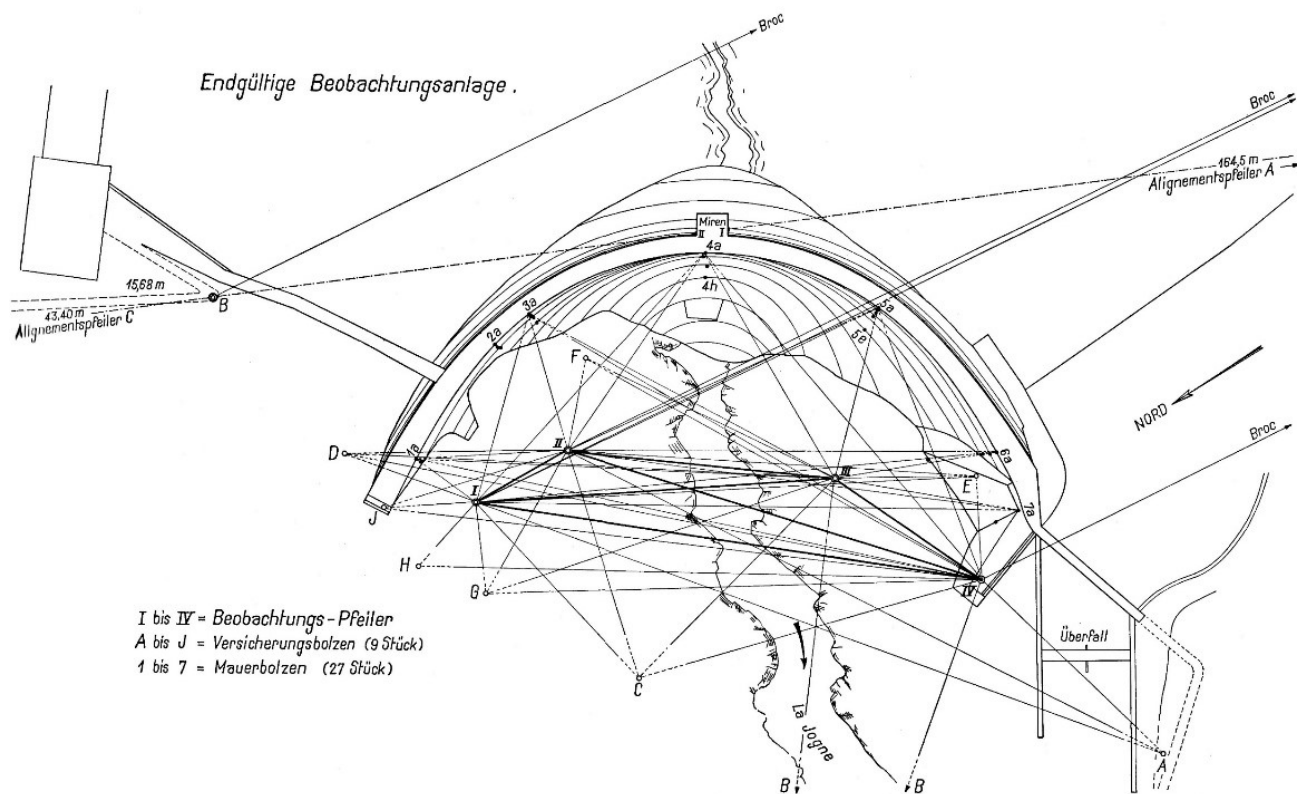


Abb. 2: «Endgültige» Beobachtungsanlage der Staumauer «Montsalvens» 1932 mit trigonometrischen und Alignementsmessungen (Lang in STK 1946); dieses Netz wurde allerdings später nochmals erweitert

Im Juli 1922 wurde die trigonometrische Methode an der Bogenstaumauer «Pfaffensprung» (UR) der Schweizerischen Bundesbahnen SBB bei deren Füllung erneut eingesetzt (vgl. Abb. 3).

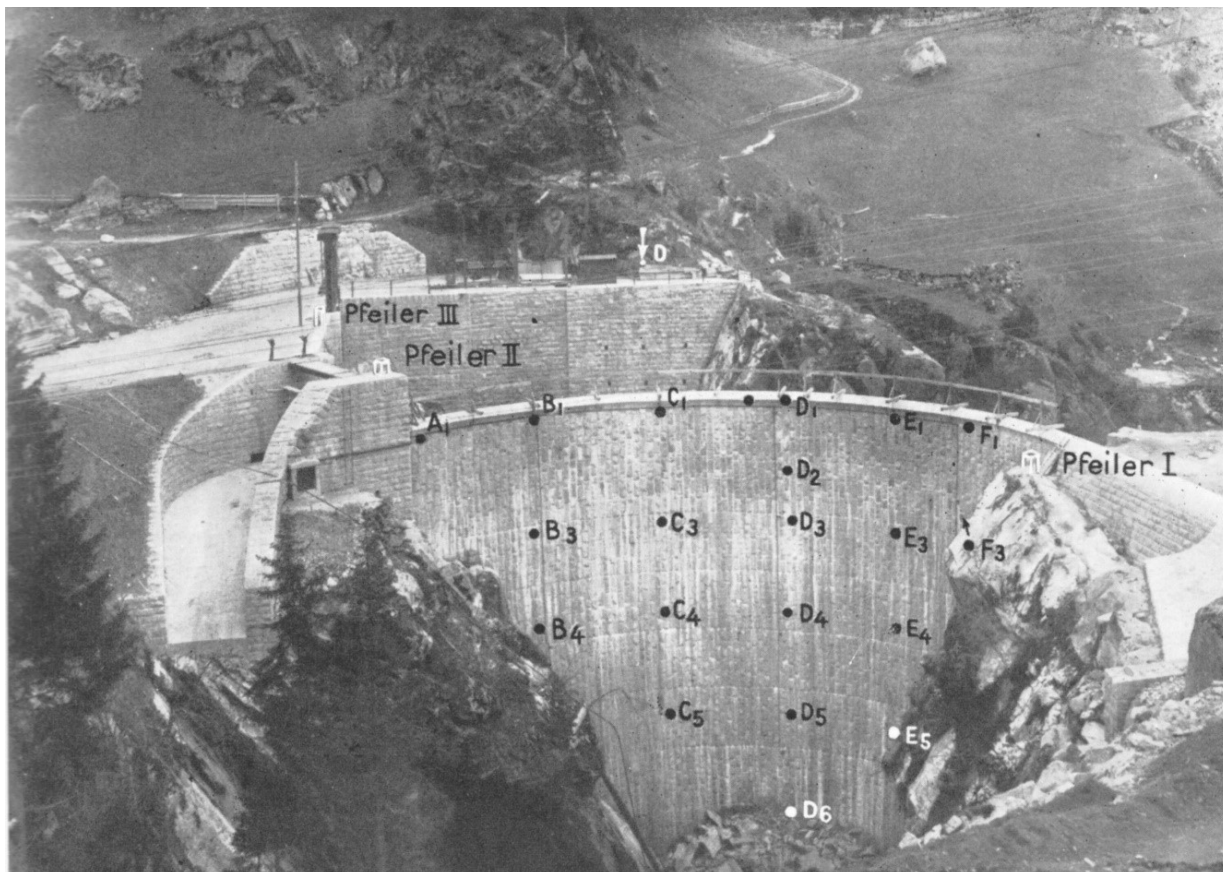


Abb. 3: Staumauer «Pfaffensprung»: Luftseitige Ansicht mit Pfeilern I, II und III («Alignements-Pfeiler») und Bolzen für die trigonometrischen Messungen; vgl. Netzplan in Abb. 4 (Lang in STK 1946)

Um die Mauerbewegungen möglichst zeitnah sowohl beim Einstauen wie beim Entleeren messen zu können, wurden die Mauerbolzen immer gleichzeitig durch zwei Beobachter von zwei Pfeilern aus vorwärts eingeschnitten und bestimmt. Die Sektion für Geodäsie der Eidg. Landestopographie (namentlich die Ingenieure H. Zölly und W. Lang) 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 sowohl in der Schweizerischen Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik wie auch in der Schweizerischen Bauzeitung publiziert (Sektion Geodäsie der Eidg. Landestopographie, Bern 1923a, 1923b). Noch detaillierter sind die «*Deformationsmessungen an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie*» von Ing. W. Lang in dem von der Eidg. Landestopographie 1929 publizierten Buch (Lang 1929) beschrieben.

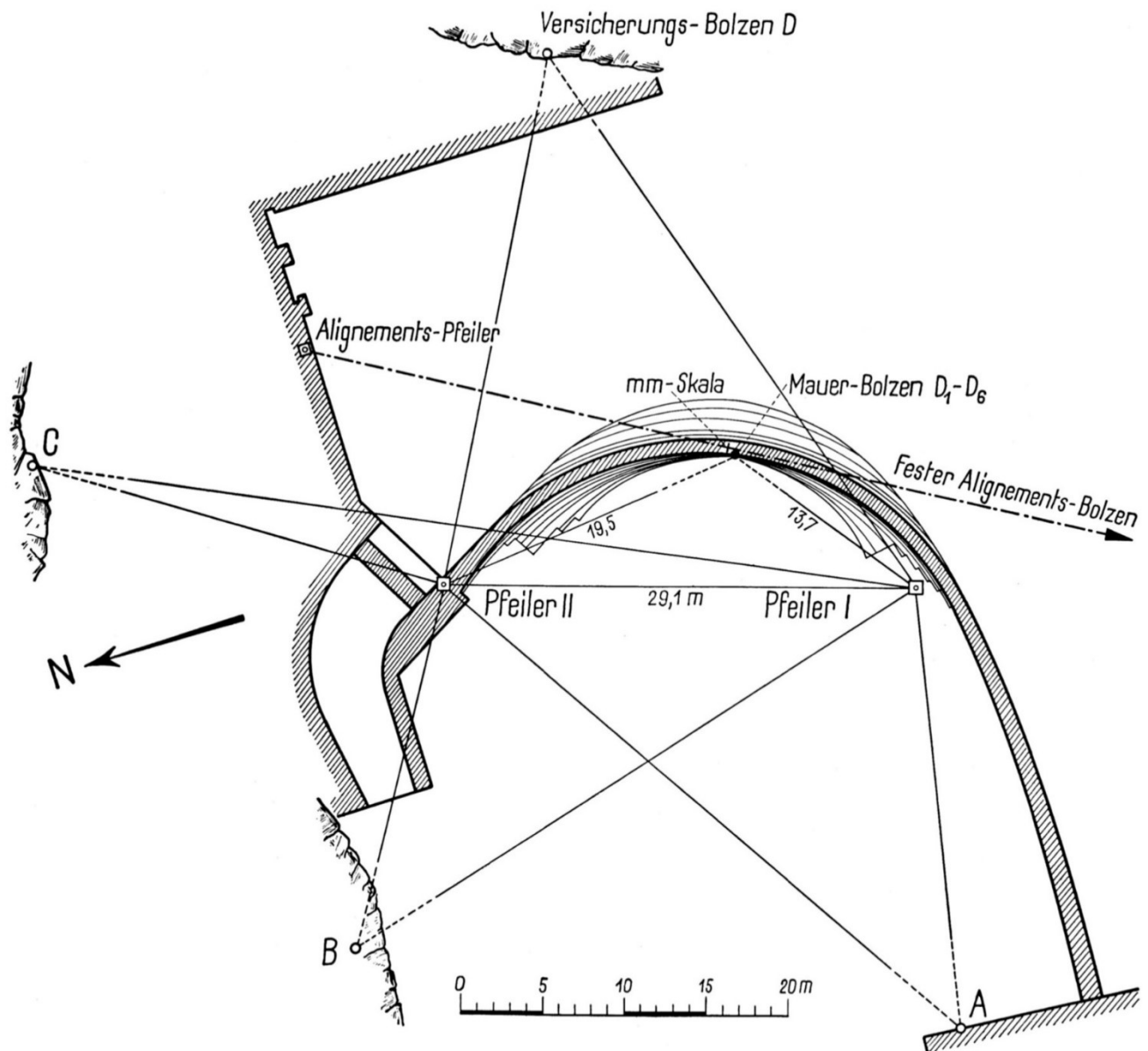


Abb. 4: Netzplan der ursprünglichen Beobachtungsanlage der Staumauer «Pfaffensprung» (Lang 1929), Bild aus (STK 1946)

Wie praktisch alle Beobachtungsanlagen der Pionierzeit wurde auch das Überwachungsnetz «Pfaffensprung» im Laufe der Jahre erweitert. Den Stand des Netzes 1932 zeigt Abb. 5.

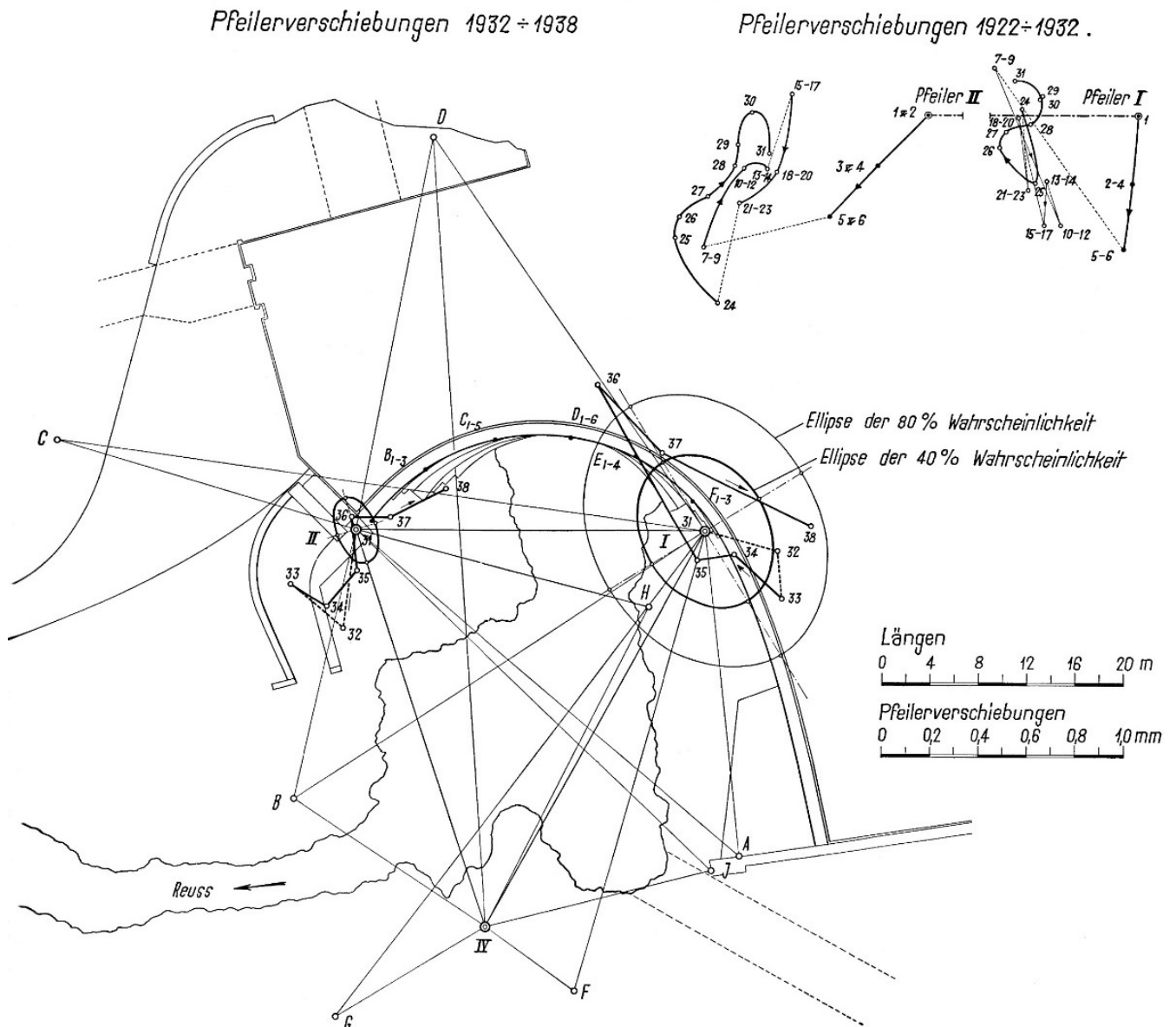


Abb. 5: Netzplan der erweiterten Beobachtungsanlage «Pfaffensprung» und geodätisch bestimmte Pfeilerverschiebungen 1922-1932 bzw. 1932-1938 mit Fehlerellipsen (Stand gemäss Lang in STK 1946)

Die Katastrophe des Bruchs der Gleno-Staumauer in Norditalien am 1.12.1923 (Stucky 1924), (vgl. [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_von\\_Stauanlagenunfällen](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Stauanlagenunfällen)) beunruhigte breite Kreise der Bevölkerung bezüglich der Sicherheit der Talsperren (Lang 1929, S. 9). Aber auch der Bau immer höherer Staumauern und der Einsatz neuartiger Verbundstoffe (Betonzusammensetzung) veranlassten die Behörden und die Werkbetreiber, geodätische Deformationsmessungen zur Kontrolle des elastischen Verhaltens der Staumauern ausführen zu lassen. So hatte auch die damalige AG Kraftwerk Wägital, Betreiberin der Staumauer «Rempen» im Wägital (SZ; Bau 1922-24) sowie der bis 1930 mit 111 m höchsten Gewichtsmauer der Welt «Schräh» (SZ; 1923-24; vgl. Abb. 6) Interesse, gegenüber der Öffentlichkeit und den Behörden den Nachweis grösstmöglicher Sicherheit ihrer Bauwerke zu erbringen. Bei der Staumauer Rempen beschloss die Bauleitung, ihre eigene unbefriedigende Beobachtungseinrichtung (Alignement über 8 Bolzen auf dem Parapett der Mauerkrone) fallen zu lassen und auch bei dieser Talsperre, wie für die Staumauer «Schräh», die Eidg. Landestopographie als «neutrale Amtsstelle» zu ersuchen, die Mauerdeformationen trigonometrisch zu messen (Lang 1929, S. 9).

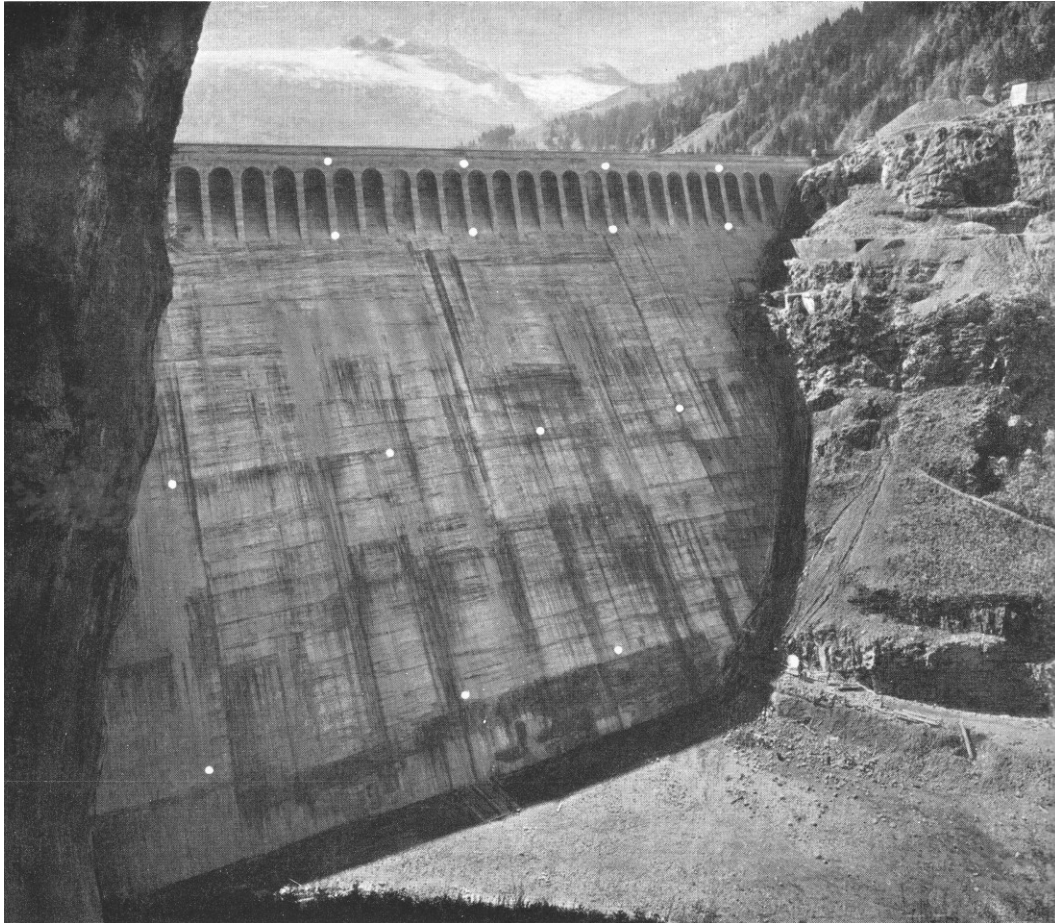


Abb. 6: Gewichtsstaumauer «Schräh» (Wägital, SZ) mit den symbolisch eingezeichneten Zielbolzen an der Luftseite (STK 1946); bis 1930 mit 111 m höchste Gewichtsstaumauer der Welt

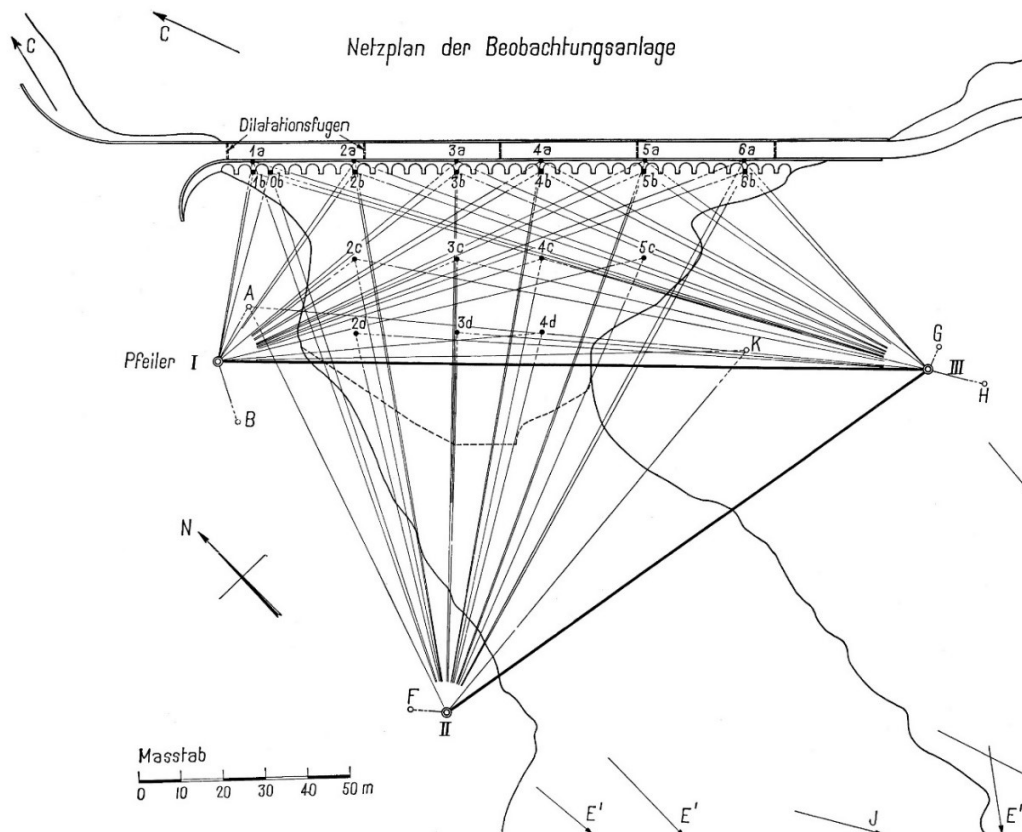


Abb. 7: Netzplan der trigonometrischen Messungen der Staumauer «Schräh» (Lang 1929), aus (STK 1946)



Abb. 8: Beobachtungspfeiler III im Netz der Staumauer «Schräh»;  
Einachsertheodolit von Hildebrand mit 21 cm Kreisdurchmesser (Lang 1929)

Die geodätische Methode wurde von der Eidg. Landestopographie (L+T, heute swisstopo), insbesondere den Ingenieuren Lang, Kobold und Untersee, in den folgenden Jahren bezüglich Netzanlage, Instrumentarium und Materialisierung stetig weiterentwickelt und an vielen weiteren Talsperren angewandt. Die L+T war praktisch bei allen Staumauern mit einer Sperrhöhe über 20 m, welche von 1920 bis 1940 in der Schweiz erstellt wurden, mit Beratungen und Messungen involviert; so auch bei den SBB-Staumauern «Barberine» (VS; 1922-25) und «Les Marécottes» (VS; 1923-26).

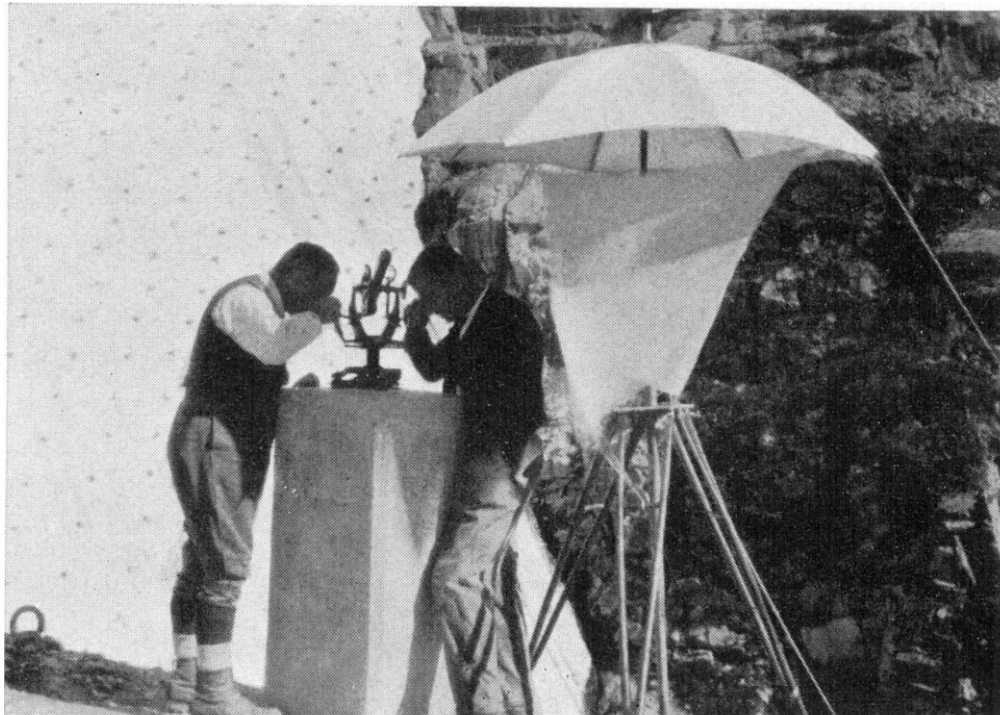


Abb. 9: Beobachtung mit Einachsertheodolit von Hildebrand im Netz «Barberine»;  
Ablesung des Mikroskops, rechts durch einen Hilfsbeobachter (Lang 1929)

Auch bei den Grimsel-Staumauern «Spitallamm», «Seeuferegg» und «Gelmer» (BE; 1928-32) beauftragten die Kraftwerke Oberhasli AG die L+T, die Sperrbewegungen nach der von ihr entwickelten Methode zu beobachten (STK 1946, Bericht KWO, S. 9). Die «Spitallammsperre» war die erste Mauer, deren Deformationen schon während der Bauausführung verfolgt wurden.

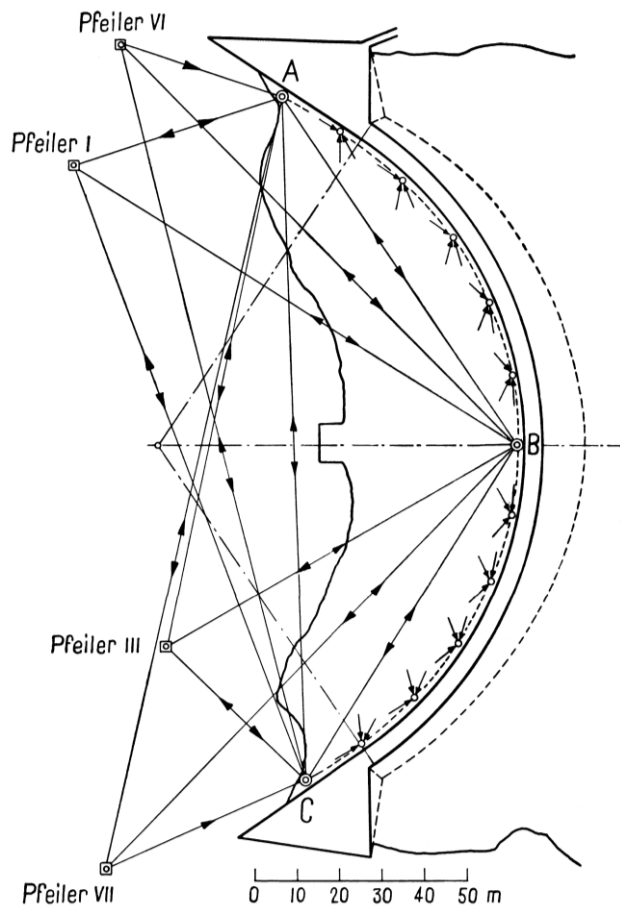


Abb. 10: «Spitallammsperre»: Netzplan der kombinierten Winkel- und Längenmessungen (STK 1946)



Abb. 11: Geodät (vermutlich Ing. W. Lang) am Hildebrand Theodolit Nr. 43 der Eidg. Landestopographie bei Messungen während des Baus der «Spitallammsperre». Einzelbild aus dem Film «Bau der Kraftwerke Oberhasli» (1932) (© Kraftwerke Oberhasli AG)

Die Staumauern «Garichte» (GL; 1930-31) der Kraftwerke Sernf-Niedererbach AG und «In den Schlägen» am Sihlsee (SZ; 1935-36) der Etzelwerk AG wurden seit ihrem Bau bis in Jahr 2020 von der L+T/swisstopo mittels geodätischen Deformationsmessungen überwacht. Bei der Barrage de la «Dixence» (VS; 1931-35) verzichteten die Energie de l'Ouest Suisse (EOS) auf den Einsatz geodätischer Deformationsmessungen. Die Deformationen wurden lediglich mit drei Pendeln (Typ Juillard) gemessen. Immerhin wiesen die EOS in (STK 1946, S. 24) darauf hin, dass zur Bestimmung eventueller Verschiebungen des Felsuntergrundes «von Zeit zu Zeit» geodätische Triangulationsmessungen durchgeführt werden sollten.

Alle in diesem Bericht bisher genannten Talsperren wurden von deren Bau bis 1945 im Bericht der STK über die «Messungen, Beobachtungen und Versuche an Schweizerischen Talsperren 1919 – 1945» (STK 1946) äusserst umfangreich und in vorbildlicher Weise dokumentiert. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass wie viele der oben genannten Mauern auch folgende in dieser Periode gebauten Staumauern seit ihrer Errichtung und teils bis 2020 von der L+T/swisstopo geodätisch kontrolliert wurden: «Piora» (Ritom-Kraftwerk der SBB; TI; 1917-20, 1950 erhöht und erweitert); «Wettingen» (AG; 1930-33) des Kraftwerks Wettingen, betrieben vom Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (EWZ); «Illsee» (VS; 1923-26) der Illsee Turtmann AG und «Rossens» (FR; 1944-48) der Freiburger Kraftwerke / Groupe E.

### 2.1.2 Messmethoden

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 sind, wie erwähnt, in (Lang 1929) detailliert beschrieben. Bezüglich der eingesetzten geodätischen Methoden wurden vor 1920 primär verschiedene Varianten von Alignements (siehe Kapitel 3.1) zur Beobachtung von Punkten auf der Mauerkrone eingesetzt. Ab 1921 führte die L+T dann die trigonometrische Methode ein, welche sie aus den Erfahrungen der Landesvermessung adaptierte: Richtungs- und Winkelmessungen (Triangulation), Vorwärts- und Rückwärtseinschneiden sowie Präzisionsnivelements. Nebst Verbesserungen an den Instrumenten, also den Präzisions-Theodoliten und Nivellieren mit zugehörigen Invar-Messlatten wurden für diese hochpräzisen Anwendungen der Ingenieurgeodäsie auch 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/-tafeln 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.





Abb. 12: Theodolit Kern, 1913 (swisstopo)



Abb. 13: Theodolit Hildebrand Nr. 43, 1924 (swisstopo)

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 (siehe auch Kapitel 3.2).

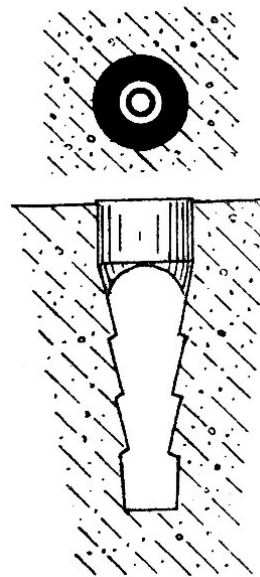
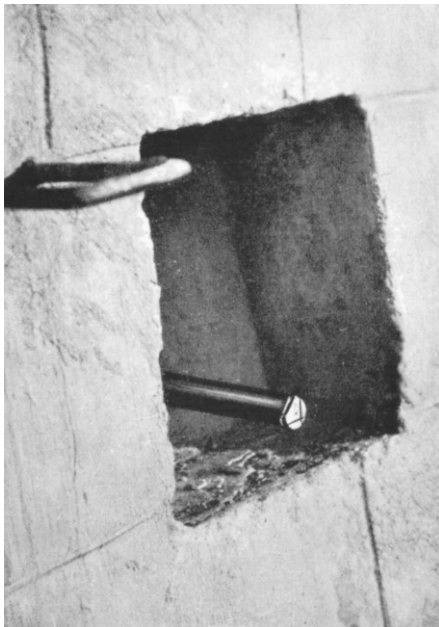


Abb. 14/15: Zielbolzen und «verbesserter» Zielbolzen (rechts) für trigonometrische Messungen an der Staumauer «Montsalvens» (Bilder aus STK 1946)

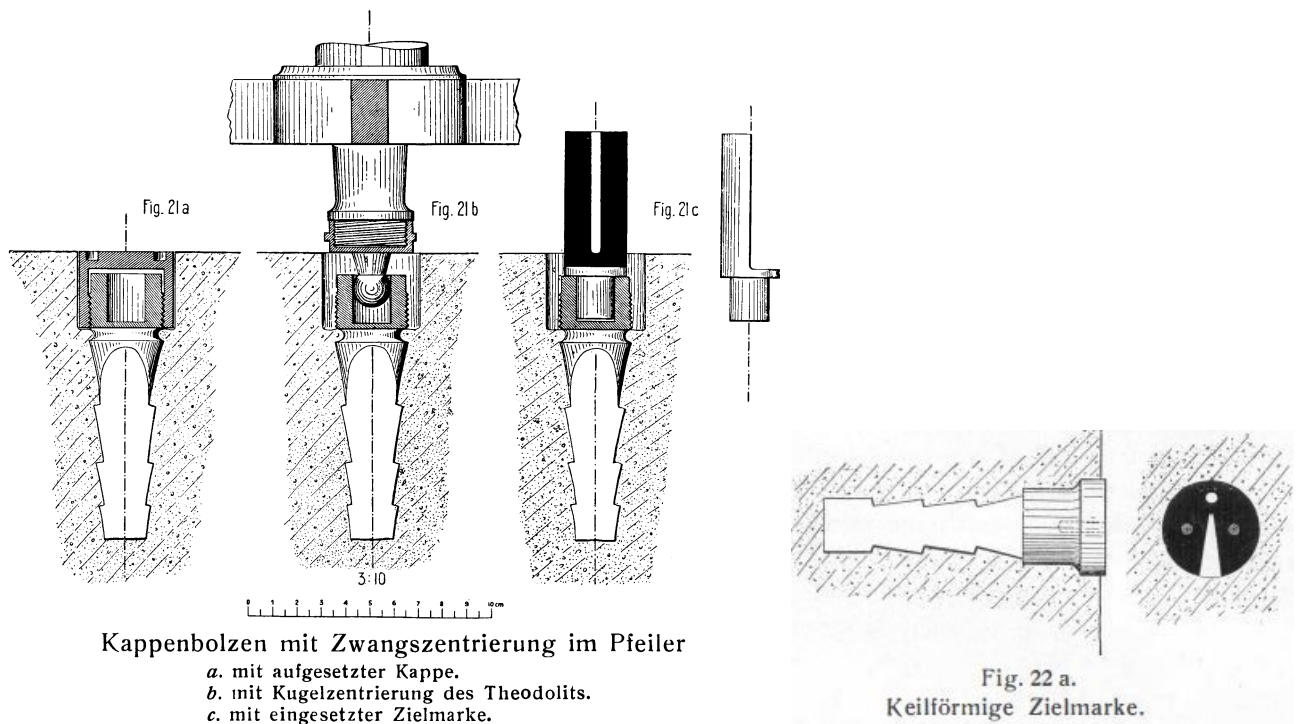


Abb. 16/17: Kappenbolzen mit Zwangszentrierung im Pfeiler (links) und keilförmige Zielmarke (Lang 1929)

Mit der Geodäsie konnten die räumlichen Verformungen der Sperren, welche die Erbauer besonders interessierten, bereits beim ersten Einstau bestimmt werden. Im Allgemeinen haben sich die Staumauern übrigens beim ersten Aufstau mehr deformiert als die damalige Theorie vorsah und diese Deformationen haben sich beim Absenken des Seespiegels nur zum kleinen Teil zurückgebildet (Lang 1929, S. 54). 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. Wichtig ist, dass mit den geodätischen Methoden auch allfällige Bewegungen des Fundamentfelsens sowie der Talsperrenumgebung erfasst wurden.

Im Folgenden sollen einige Vor- und Nachteile der trigonometrischen Methode zusammengestellt werden, welche teilweise schon in (Lang 1929, Kapitel D. Zusammenfassung) erwähnt wurden:

Vorteile:

- Die Beobachtungspfeiler und damit die Messinstrumente sind (vorzugsweise) ausserhalb der bewegten Mauer errichtet bzw. aufgestellt;
- Die Messungen erfolgen vom «Festen» auf das «Sichverändernde» und ergeben (als einzige Methode zur damaligen Zeit) absolute Verschiebungen;
- Es können somit auch Bewegungen bestimmt werden, die nicht mit Neigungs- oder Spannungsänderungen verbunden sind (wie zum Beispiel ein Gleiten auf dem Felsuntergrund);
- Die Messungen und Analysen sind ein-, zwei- oder dreidimensional; die Dimensionen der eindimensionalen Klinometer- oder Spannungsmessungen können allerdings durch geschickte Anordnung auch erweitert werden;
- Die geodätischen Methoden sind von der Netzanlage über die Instrumentierung, Signalisierung und Durchführung der Messungen bis hin zur Auswertung relativ flexibel und können situativ auf verschiedene Talsperrentypen (siehe Tabelle 3) und lokale Verhältnisse angepasst werden;
- Kurzfristige (elastische) Veränderungen (beispielsweise anlässlich des Ersteinstaus) können ebenso bestimmt werden wie langfristige Phänomene (Setzungen, Hebungen infolge Betonveränderungen) oder bleibende Deformationen in Messreihen über Jahrzehnte, auch bei veränderter Methodik und erneuertem Instrumentarium.

Nachteile:

- Die Messungen und Auswertungen erfordern erfahrene Geodäten;
- Je nach Objekt und Aufgabe können die Messprogramme umfangreich, die Beobachtungen und Auswertungen aufwändig sein, beispielsweise im Vergleich zu Alignements;
- Die Methode erfordert die kritische Beurteilung der Stabilitätsverhältnisse (beispielsweise der Beobachtungspfeiler und der «Fixpunkte»); daher sind sog. Versicherungsbolzen im nahen, guten Fels empfohlen;
- Die Messprogramme können lange dauern (von Stunden bis teilweise über mehrere Tage), vor allem bei grossen Stauanlagen, so dass sich die Messungen zum Teil auf verschiedene Zustände (Staukote, Temperaturen) beziehen. In den Anfängen wurden allerdings auch einfache Messungen durchgeführt und die Mauer «ständig» beobachtet (Vorwärtseinschneiden mit zwei Operateuren bei der Staumauer «Pfaffensprung»), was Zustandserhebungen während der Füllung oder Absenkung praktisch in «Echtzeit» möglich machte;
- Trigonometrische Messungen sind abhängig von den meteorologischen Verhältnissen (Sichtbedingungen, Refraktion);
- Reine Triangulationsnetze haben gegenüber Präzisionspolygonzügen und Präzisionsnivellements sowie sehr lokalen Messungen (z.B. Fugen- und Rissmessungen) meist eine reduzierte Genauigkeit der Bestimmung von Verschiebungen benachbarter Punkte;
- Sorgfältige Konzepte und Messungen zur Vermeidung oder Reduktion systematischer Einflüsse und Fehler sind erforderlich, bzw. deren Elimination anlässlich der Auswertung (u.a. durch Instrumentenprüfung, Beachten der Tageszeit und Sonnenverhältnisse, etc.);
- Wie übrigens bei allen Messmethoden ist eine kritische Beurteilung der Resultate der Ausgleichungen und deren Interpretation bezüglich Verlässlichkeit der Aussagen angezeigt (überbestimmte, bezüglich Zuverlässigkeit geprüfte Messungen, gutes funktionales und stochastisches Modell, sinnvolles statistisches Sicherheitsniveau der Verschiebungsangaben);
- Anfänglich waren die geodätischen Messungen nicht automatisierbar; im Gegensatz zu Temperatur-, Neigungs- oder Spannungsmessungen, für welche schon früh im 20. Jh. automatisierte Instrumente entwickelt wurden (Widerstandsthermometer, Klinometer, Spannungsmesser, Telemeter); somit war auch keine Fernübertragung der Messungen und Ergebnisse möglich.

Die neu entwickelten Methoden der Photogrammetrie konnten damals übrigens nicht eingesetzt werden. Sie hätten zwar den Vorteil verkürzter Feld- und Büroarbeiten gehabt und wären auf beliebige Stellen der Mauerfläche anwendbar gewesen. Aber die Genauigkeiten der Instrumente waren ungenügend. Zitat aus (Lang 1929, S. 55): «Während bei der trigonometrischen Methode die Erfassung einer Verschiebung durch Parallax-Messungen von zirka  $\pm 1''$  mittleren Fehler möglich ist, erreicht dieser mittlere Parallaxfehler bei der Photogrammetrie heute noch mindestens  $\pm 10''$ . Da nun aber bei unsern untersuchten Staumauern die Verschiebungen sich selten durch Winkeländerungen von mehr als  $10''$  äusserten, so ist damit der Nachweis erbracht, dass die Photogrammetrie für unsre spezielle Aufgabe zu wenig genau arbeite.»

### 2.1.3 Dokumentation und Erfahrungsaustausch

Der Ingenieur-Geodät W. Lang verfasste das oben schon mehrfach zitierte Grundlagenwerk zu *Deformationsmessungen an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie* (Lang 1929), in welchem er diese vermessungstechnischen Präzisionsarbeiten, deren Grundlagen, Ergebnisse und Erfahrungen detailliert und praxisnah darstellte. Beispielsweise erläuterte er sorgfältig die Methodik zur Untersuchung der Festpunkte sowie allfälliger Bewegungen des Umfeldes der Talsperre. Auch dokumentierte er instruktive Darstellungen der Deformationen und Verschiebungen (siehe Kapitel 3.9). Das Buch fand im Bauingenieurwesen und in der Geologie grosse Beachtung und wurde auch in entsprechenden Fachpublikationen zitiert, z.B. (Haefeli; von Moos 1938, S. 138). Bezugnehmend auf die periodischen Messungen an Staumauer durch W. Lang schrieben Ing. R. Haefeli und Dr. geol. A. von Moos in diesem Artikel über Erdbaumechanik, die Probleme seien derart komplex, «dass Theorie und experimentelle Untersuchungen im Laboratorium allein nicht genügen, um sie zu lösen. Sorgfältige Beobachtungen in

der Natur, systematische Messungen am fertigen Bauwerk, Sammlung und Verarbeitung der praktischen Erfahrungen müssen ergänzend hinzutreten.»

Die genannten Veröffentlichungen der Eidg. Landestopographie sowie weitere Publikationen, insbesondere in der Schweizerischen Bauzeitung (Lang 1934) fanden im benachbarten Ausland und in Nordamerika Beachtung und teilweise auch Nachahmung. Auf Empfehlung der Elektrobank Zürich (spätere Elektrowatt AG) wurden Ingenieure der Eidg. Landestopographie zwischen 1929 und 1937 sogar persönlich zu Beratungen, Messungen und Auswertungen von geodätischen Deformationsmessungen an drei Staumauern in Spanien beigezogen (siehe Kapitel 2.3.2 und Anhang 2.1).

Ein Austausch fand insbesondere mit Ingenieuren der Nachbarländer Deutschland (z.B. Buchbesprechungen in der Zeitschrift für Vermessungswesen 1930 und 1935) und Österreich (z.B. Buchbesprechung in der Österr. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 2, 1930) statt, welche ihrerseits in den dortigen Fachzeitschriften über ihre Erfahrungen berichteten. Besonders erwähnenswert sind zudem die Berichte des Schweizer Ingenieurs Fred A. Noetzli, der in die USA ausgewandert war, aber engen Kontakt zu seiner Heimat aufrechterhielt. Noetzli berichtete in amerikanischen Fachzeitschriften über die geodätischen Deformationsmessungen der L+T an Schweizer Staumauern (Noetzli 1923, 1930, 1932a), andererseits aber auch in der Schweizerischen Bauzeitung über Entwicklungen des Talsperrenbaus in den USA (Noetzli 1932b). Er beschrieb die Messdispositionen von Spannungsmessern, mit denen das elastische Verhalten einer Versuchs-Gewölbe-Staumauer unter Einwirkung verschiedener Belastungszustände (Stauhöhen) beobachtet wurde (Noetzli 1926). Andererseits berichtete Noetzli auch über den Bruch der St. Francis-Staumauer in Kalifornien im Jahr 1928 (Noetzli 1928a, 1928b), einem weiteren tragischen Unglück (mit gegen 500 Toten), welches die Öffentlichkeit verunsicherte.

Eine besondere Gelegenheit zum Wissens- und Erfahrungsaustausch bot der erste Kongress der Internationalen Kommission für Grosse Talsperren ICOLD, welcher im Juni/Juli 1933 in Stockholm abgehalten wurde (*First Congress of the International Commission On Large Dams of the World Power Conference [World Energy Council] / Premier Congrès des Grand Barrages de la Commission Internationale des Grands Barrages de la Conférence Mondiale de l'Energie*). Eine der Fragestellungen (Frage 1b) am Kongress war den «*Einflüssen, die Formveränderungen in Schwergewichtsmauern verursachen*» gewidmet (Hellstrom 1933a). Sowohl zu den Gruppen «*I. Messungen der Deformation und Instrumente hierzu*» wie «*II. Gründe für die Deformation*» berichteten mehrere Schweizer Vertreter (u.a. W. Lang, A. Käch, H. Juillard, F. Bösch, M. Ros und P. Joye) über ihre Erfahrungen bei Deformationsmessungen an Staumauern in der Schweiz, und zwar mittels geodätischer Methoden wie auch Klinometer- und Pendelmessungen. Der Kongressbericht wurde in Englisch, Deutsch und Französisch publiziert (Hellstrom 1933b).

Weitere allgemein zugängliche Publikationen über geodätische Deformationsmessungen an Staumauern waren eine fachtechnische Abhandlung in der Festschrift *100 Jahre Eidg. Landestopographie 1838-1938* (Lang 1938) sowie ein Kapitel im Übersichtswerk *Geschichte der Geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz* von H. Zölly (Zölly 1948, S. 148–150), dem Initianten des Einsatzes trigonometrischer Methoden der Landesvermessung an Talsperren.

In dieser ersten Epoche des Schweizer Talsperrenbaus hat die Eidg. Landestopographie als einzige Institution geodätische Deformationsmessungen an Stauanlagen in der Schweiz durchgeführt. W. Lang erachtete dies 1929 noch als sinnvoll und «*berechtigt, weil die Landestopographie in solchen Präzisionsarbeiten erfahrenes Personal und die nötigen Instrumente besitzt und weil die Durchführung solcher Spezialarbeiten ganz zweckmässig einer neutralen Amtsstelle überbunden bleibt. Vom technischen Standpunkt aus erscheint es zudem wertvoll, wenn die bei solchen Messungen zu machenden Erfahrungen bei einer einzigen Stelle zusammenlaufen und hier für weitere Arbeiten rationell verwertet werden.*» (Lang 1929, S. 55). Karl Ulbrich, Obervermessungsrat im österreichischen Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) vertrat im Übrigen noch 1956 die Meinung, «*dass bei allen Grossbauten obligatorisch amtliche Deformationsmessungen von staatlicher Seite durchzuführen seien. Die alleinige Privatmessung erscheint unzweckmässig zu sein. Da diese Deformationsmessungen vom Auftraggeber, dessen Anlage kontrolliert werden soll, bezahlt werden, besteht für Private keine Möglichkeit, sich objektiv gegen den Willen der Kraftwerksbesitzer durchzusetzen.*» (Ulbrich 1956, S. 67–69).

**Akteure der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Epoche 1920 – 1945:**

Bundesamt für Landestopographie (L+T, swisstopo)  
Seftigenstrasse 264, 3084 Wabern

Tabelle 2: Akteure der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Schweiz von 1920 – 1945

**2.2 Epoche 1945 – 1980****2.2.1 Der grosse Aufschwung**

Nach dem Zweiten Weltkrieg, besonders in der Zeit von 1955 bis 1969, erfolgte 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 beispielsweise die 1948 vollendete, weitgespannte Bogenmauer über die Saane bei «Rossens» (FR; 83 m hoch, 320 m lang). 1957 wurde mit «Mauvoisin» (VS; 237 m hoch) die damals grösste Bogenmauer der Welt in Betrieb genommen und 1961 mit «Grande Dixence» (VS; 285 m hoch) die bis 1980 weltweit höchste Gewichtsmauer fertiggestellt. 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 «Grimselsee – Oberaarsee» (Kraftwerke Oberhasli AG).

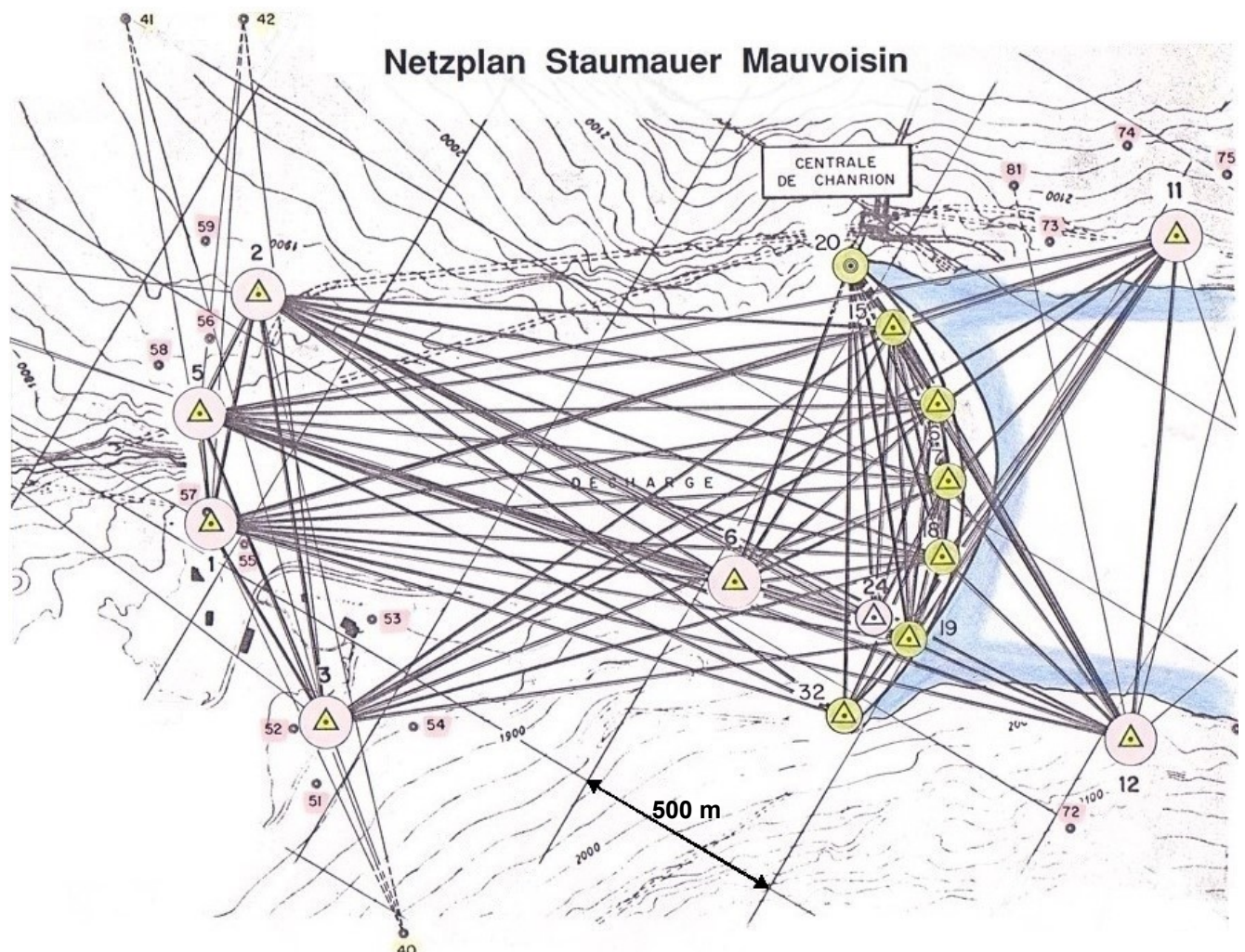


Abb. 18: Netzplan der Staumauer «Mauvoisin» (Stand 2005) (Pöry Schweiz AG)

Andererseits erzeugten Unfälle im Ausland und die höheren Staumauern ein gewisses Unbehagen bei der Bevölkerung und den zuständigen Behörden. Die vielfältigen Themen rund um den Bau, den Betrieb und die Überwachung von Talsperren wurden breiter diskutiert.

In dieser Zeit wurden an verschiedenen Hochschulen im In- und Ausland die Methoden für die Überwachung von Talsperren und ganz allgemein von grossen Bauwerken wie Brücken und Tunnels wissenschaftlich untersucht und weiterentwickelt. Beteiligt waren Institute für Baustatik, Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik, Geotechnik und Werkstoffkunde. Auch die geodätischen Methoden wurden weiterentwickelt; 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 Fritz Kobold, der seit 1932 als Ingenieur bei der Eidg. Landestopographie in Bern 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 (Kobold 1958, 1965, 1966), (Conzett 1985).

Wie Prof. F. Kobold engagierte sich auch sein Kollege Prof. W. K. Bachmann an der EPUL/EPFL für die Weiterentwicklung der Methoden und Instrumente für geodätische Deformationsmessungen. So führte das Institut de photogrammétrie et de géodésie der EPFL ab 1952 geodätische Deformationsmessungen an der Barrage du «Châtelot» aus (Howald 1956a) und ab 1954 im Auftrag der damaligen Electro-Watt AG auch an der Barrage de «Mauvoisin» (Howald 1955).

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 (Kobold 1946), (Bachmann 1956), (Kobold 1958), (Zaki 1963).

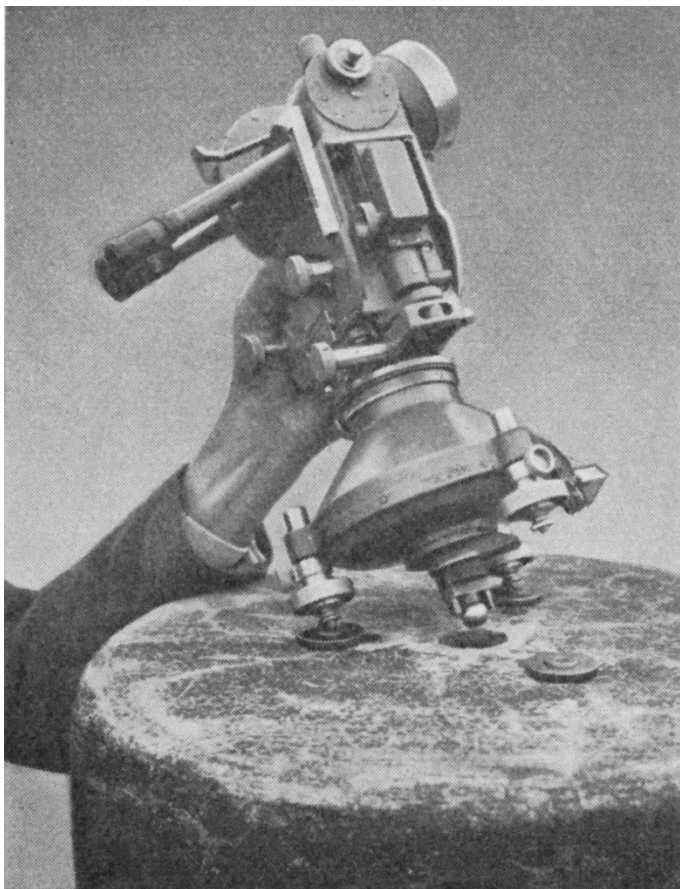


Abb. 19: Wild T3 mit Kugelzentrierung (Untersee 1951)



Abb. 20: Universaltheodolit Wild T3 (swisstopo)

Wie bereits unter den Vorteilen der trigonometrischen Methode erwähnt ist diese sehr flexibel und kann situativ auf verschiedene Talsperrentypen (siehe folgende Tabelle 3) und lokalen Verhältnisse angepasst werden.

Bezüglich **Typen von Talsperren** unterscheidet das Schweizerische Talsperrenkomitee (STK)

(vgl. auch «*Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen*», Teil A, Kapitel 6.3):

- BM: Wehranlage / Flusstauhaltung (barrage mobile);  
Bsp. *Laufenburg, Wettingen, Augst-Wyhlen*
- CB: Pfeilermauer (barrage à contreforts);  
Bsp. *Lucendro, Lessoc*
- ER: Steinschüttdamm (digue en enrochement);  
Bsp. *Göscheneralp, Zervreila Ausgleichsbecken*
- MV: Mehrfache Bogenmauer / Bogenreihenmauer (barrage à voutes multiples);  
Bsp. *Oberems, Les Marécottes*
- PG: Gewichtsmauer (barrage poids / gravité);  
Bsp. *Grande Dixence, Albigna, Schräh, Oberaar*
- PV: Bogengewichtsmauer (barrage poids-voûte);  
Bsp. *Spitallamm, Palagnedra*
- TE: Erdschüttdamm (digue en terre);  
Bsp. *Mattmark, Marmorera, Godey*
- VA: Bogenmauer (barrage voûte / en arc);  
Bsp. *Mauvoisin, Luzzone, Contra, Emosson*

Details sind in <http://www.swissdams.ch/de/les-barrages/les-differents-types-de-barrages>  
bzw. <http://www.swissdams.ch/fr/les-barrages/liste-des-barrages-suissees-zu-finden>.

Tabelle 3: Talsperrentypen gemäss Schweizerischem Talsperrenkomitee STK

## 2.2.2 Die Weiterentwicklung der Mess- und Auswertemethoden

Ein wesentlicher Grund für das Interesse an neuen, verbesserten Messmethoden waren die grösseren Dimensionen der neu gebauten Talsperren (z.B. «Grande Dixence», «Mauvoisin», «Moiry»), 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, welche seit 1921 zur Anwendung und Weiterentwicklung kamen, 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 (Schneider 1970; Keller 1970).

Nebst den Verformungen und relativen Verschiebungen zwischen zwei Messepochen wurden die absoluten Verschiebungen, welche die Bauwerke und deren Fundamente bezüglich der festbleibenden Umgebung erfahren, für die Sicherheit der Bauwerke von zunehmender Bedeutung (Schneider 1970, S. 6). Seit Ende der 1950er Jahre wurden daher die Polygonzüge für felsmechanische Aufschlüsse von der Übergangszone zwischen dem Mauerbeton und dem Felsen bis in den Fels hinein verlängert, um das lage- und höhenmässige Verhalten des Bauwerks im Kontakt mit dem Baugrund besser aufzeigen zu können.

Diese konzeptionellen Erweiterungen mit Polygonzügen, Gewichts- und Schwimmloten sind in der folgenden Grafik schematisch dargestellt (vgl. Abb. 21; vgl. auch Kapitel 3.2).

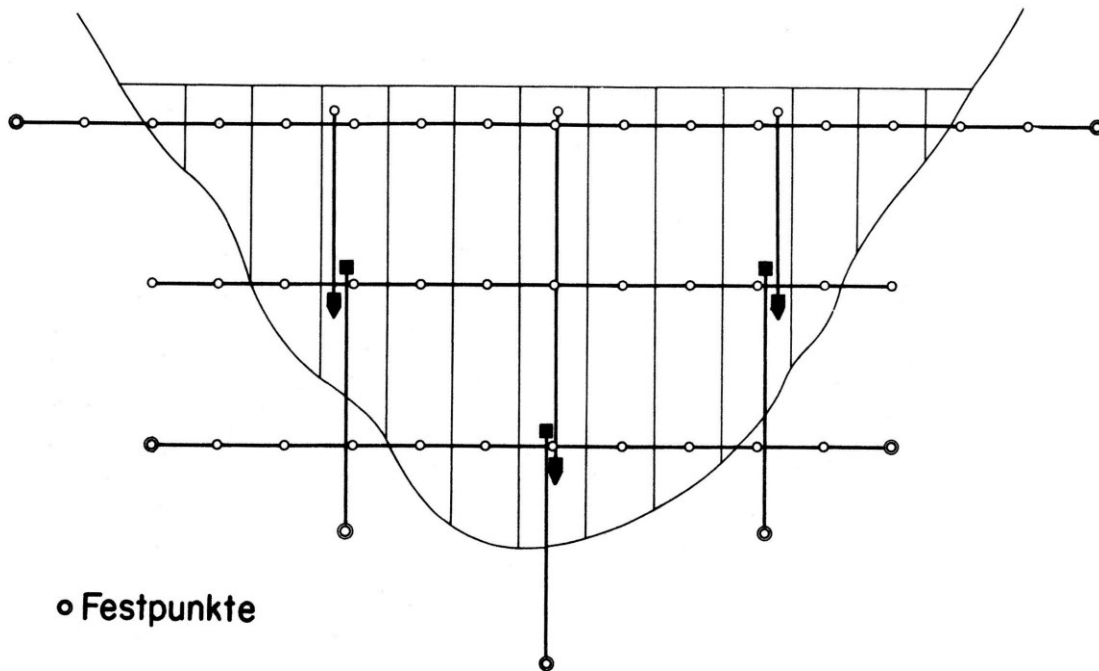


Abb. 21: Messanlage mit Polygonzügen und Loten (Schneider 1970)

Beispiele für die Weiterentwicklung geodätischer Instrumente sind die Verbesserungen an den Zentrierereinrichtungen (Kugelzentrierungen resp. Pfeilergrundplatten, Abb. 22), welche Theodolitaufstellungen mit einer Genauigkeit von Zehntelmillimetern ermöglichten (Kobold 1958). Zwangszentrierungen hatten sowohl bei den Polygonzügen wie bei deren Verknüpfung mit der Triangulation grossen Einfluss auf die Genauigkeit. Bei den Richtungsmessungen auf den Pfeilern des Triangulationsnetzes wurden in den 1950er/1960er Jahren empirische Standardabweichungen von durchschnittlich  $1.5''$  ( $0.15 \text{ mgon}$ ) für eine Messung ausgewiesen (Kobold 1965), mit entsprechender Verbesserung bei Mittelbildung über mehrere Messungen. In den 1970er Jahren wurden die mechanischen Sekundentheodolite von den Schweizer Firmen Wild Heerbrugg AG und Kern & Co. AG Aarau sowohl bezüglich Messgenauigkeit wie auch Komfort weiterentwickelt (beispielsweise verbesserte Fernrohroptik, diametrale Kreisablesung mit Mikrometer) (siehe Kapitel 3.2).



Bild 6 (links). Pfeilergrundplatte zu den Theodoliten und Zielmarken von Kern-Aarau, von unten. Die Pfeilergrundplatte ruht auf drei Spitzen. Sie wird mit der Kugel am unteren Ende des ausziehbaren Masstabes zentriert.

Bild 7 (rechts). Pfeilergrundplatte von oben. Dreht man den oberen Teil um das Kugelgelenk, bis die Dosenlibelle genau einspielt, so liegt der Mittelpunkt der Bohrung vertikal über dem Zentrum und die Auflageflächen für Theodolit oder Zielmarken werden in sehr guter Näherung horizontal.

Abb. 22: Kern Pfeilergrundplatte (Kobold 1958)

Für die Polygonzüge waren auch die neuen Methoden der Distanzmessung von grosser Bedeutung. Ab den 1950er Jahren wurden Polygonseiten mit Invarbändern und -drähten gemessen, mit denen in den Kontrollgängen der Mauern eine Standardabweichung von  $0.07 \text{ mm}$  erreicht werden konnte (Kobold 1965). An der ETHZ sowie am CERN wurden Instrumente für die Messung hochgenauer Distanzänderungen mittels Invardrähten entwickelt: das Distometer ISETH und das Distinvar (Kovari; Amstad; Grob 1974; Keller 1977; CERN 1984; Solexperts AG 2008) (siehe Kapitel 3.4).



Ab den 1970er Jahren wurden geodätische Messnetze durch elektronische bzw. elektrooptische Distanzmessungen (EDM) erweitert und verstärkt (Schneider 1970, S. 6; Egger; Keller 1976; Egger 1976). Dank dem Kern Mekometer ME3000, welches Anfang der 1960er Jahre von Froome und Bradsell am britischen National Physical Laboratory entwickelt und seit 1973 von Kern & Co. AG in Aarau gebaut und vertrieben wurde (<https://www.kern-aarau.ch/kern/wissen/distanzmessung.html>), erreichten diese ein Genauigkeitsniveau im Submillimeterbereich, sodass sie in hochpräzisen Deformationsmessungen eingesetzt werden konnten (Froome; Bradsell 1965; Krötzl 1968; Richardus 1977). Die Distanzmessungen erlaubten beispielsweise mit geringerem Aufwand, die Messnetze durch zusätzliche Referenz- und Kontrollpunkte luft- und seeseitig zu erweitern. Zudem brachte die 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.

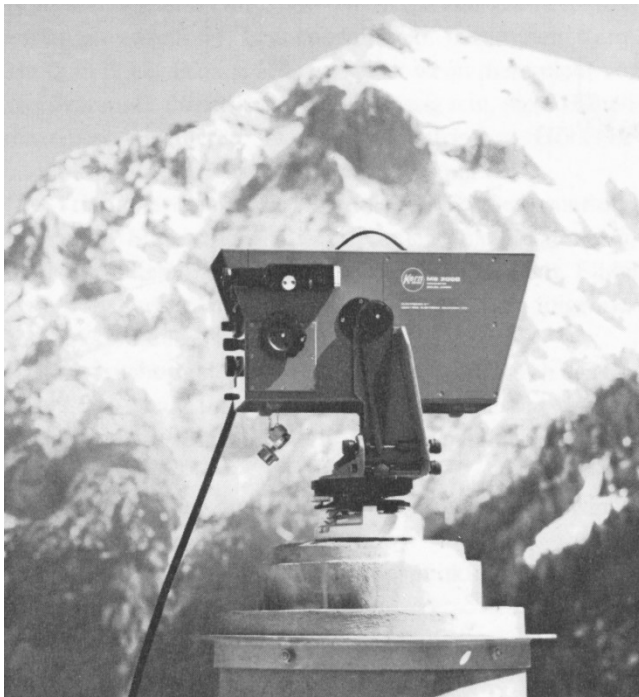


Abb. 23: Kern Mekometer ME3000 (Keller 1977)

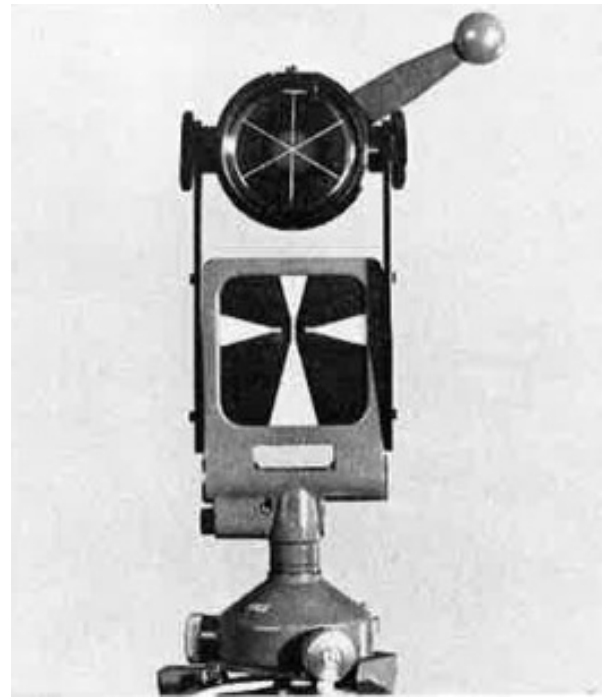


Abb. 24: Reflektor zu ME3000 mit Zielmarke (Keller 1977)

Seit Mitte der 1960er Jahre wurden nebst dem methodischen und dem instrumentellen Gebiet 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 und Interpretationen von Deformationen sowie für korrekte Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Resultate (Conzett 1970; Aeschlimann 1971). Noch zum VIII. Internationalen Kongress für grosse Talsperren in Edinburgh im Jahre 1964 konstatiert H. Aeschlimann (Aeschlimann 1971, S. 11): «Alle am Kongress vorgelegten Ergebnisse von Messungen an Staumauern – nicht nur der geodätischen – befremden durch das Fehlen jeglicher Genauigkeitsangaben und jeglicher Diskussion über die Zuverlässigkeit der Resultate.» Und auf S. 13: «Neben dieser instrumententechnischen Entwicklung ist die rechentechnische durch die tiefe Zäsur des Beginns der automatischen Rechnung gekennzeichnet. Seit diesem Zeitpunkt entwickeln sich die Berechnungsmethoden in der Geodäsie eng verbunden mit der Entwicklung der numerischen Mathematik.» Schliesslich trugen die neuen EDV-Mittel wesentlich bei zu besseren oder zumindest einfacher erstellbaren grafischen Darstellungen der Deformationen und ihrer Signifikanz.

Auch in dieser Epoche wurde die Photogrammetrie nicht für die Bestimmung von Verformungen und Verschiebungen der Bauwerke eingesetzt. Sie kam aber bei der Projektierung und der Kartierung für den Talsperrenbau sowie bei der Überwachung von Geländepartien zum Einsatz (Howald 1953, 1956b) (Scholl 1955).

### 2.2.3 Verbreitung des Wissens

Um über die Ausbildungslehrgänge hinaus weitere Kreise mit den neuen Methoden der Distanzmessung vertraut zu machen, sei's den optischen wie den Invardrahtmessungen und später den elektronischen bzw. elektrooptischen Distanzmessungen, organisierte das IGP der ETHZ gemeinsam mit der TU München und der TU Graz (1976 auch der TH Darmstadt) die periodisch durchgeführten *Kurse für geodätische Streckenmessung*, z.B. (Kobold 1965), später *Internationale Kurse für Ingenieurvermessung (hoher Präzision)*, kurz *Ingenieurvermessungskurse IVK* genannt. Die Mitarbeiter des IGP wurden von staatlichen Stellen wie privaten Ingenieurunternehmen für die Beratung oder Mitarbeit bei Deformationsmessungen beigezogen. Daher waren ihre Untersuchungen praxisbezogen und führten zu Verbesserungen an Instrumenten und Auswertemethoden. Es ist denn auch nicht verwunderlich, dass die von ehemaligen Institutsmitarbeitern gegründeten Vermessungsbüros ab den 1960er Jahren, also in der Blütezeit des schweizerischen Staumauerbaus, neben der Eidg. Landestopographie ebenfalls mit Kartierungs-, Absteckungs- 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. Immerhin vertrat das damals zuständige Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) anfangs der 1990er Jahre als Aufsichtsbehörde des Bundes noch die Meinung, dass die Arbeiten auf wenige ausgewählte, bestens qualifizierte und schweizweit gut verteilte Geodäsie-Büros bzw. Vermessungsfirmen aufgeteilt werden sollten (mündliche Kommunikation Rolf Biedermann, damaliger Beauftragter für die Sicherheit der Talsperren im BWW). Die wenigen in dieser Epoche mit geodätischen Deformationsmessungen an Stauanlagen beauftragten Institutionen und Firmen sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

In Kongressvorträgen wie den erwähnten Ingenieurvermessungskursen (IVK) der deutschsprachigen technischen Hochschulen und in Zeitschriftenartikeln wurde regelmässig über neuste Entwicklungen und Erkenntnisse für die Talsperrenüberwachung berichtet: z.B. (Kobold 1965; Schneider 1970; Keller 1970; Egger 1976; Conzett 1977; Egger 1980). Seminare zur Deformationsanalyse und Interpretation geodätischer Netze bzw. zur elektrooptischen Präzisionsstreckenmessung fanden 1979 und 1983, mit Schweizer Beteiligung, auch an der Hochschule der Bundeswehr (HSBw) in München statt (Welsch et al. 1979; Welsch 1983; Caspary; Heister 1984).

#### Akteure der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Epoche 1945 – 1980:

- Bundesamt für Landestopografie (swisstopo)  
Seftigenstrasse 264, 3084 Wabern
- Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG (später Electrowatt Engineering AG,  
dann Pöyry Schweiz AG, heute AFRY Schweiz AG)  
Herostrasse 12, 8048 Zürich
- Ingenieurbureau Walter Schneider AG (später Schneider Ingenieure AG)  
Spundisstrasse 23, 7007 Chur
- Ingenieurbüro Rolf Kägi (später Trigonet AG)  
Spannortstrasse 5, 6003 Luzern
- Meier SA Studio di Ingegneria Geodetica (Studio Meier SA)  
Via Borgaccio 4, 6648 Minusio

#### Zu Ausbildungszwecken:

- École polytechnique de l'Université de Lausanne (EPUL),  
heute: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL),  
Institut de photogrammétrie et de géodésie  
EPFL, Geodetic Engineering Laboratory, 1015 Lausanne
- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)  
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie  
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Tabelle 4: Akteure der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Schweiz von 1945 – 1980

## 2.3 Epoche 1980 – 2021

### 2.3.1 Instandhaltung, Erneuerung und Erweiterung

Der Ausbau der Wasserkraftanlagen in den Alpen wird in dieser Epoche deutlich geringer vorangetrieben, abgesehen von den jüngsten Pumpspeicherwerken wie «Limmern» (2010) und weiteren Projekten wie «Nant de Drance» (2014). Die meisten Bautätigkeiten an Stauanlagen sind Sanierungen (z.B. «Les Toules» 2012, Verminderung der Erdbebenrisiken), Erneuerungen und Mauererhöhungen wie «Mauvoisin» (1991 auf 250 m), «Luzzone» (1998) und «Vieux Emosson» (2014, im Rahmen von «Nant de Drance»).

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 (Krötzl 1983). Aber auch neue Erkenntnisse bezüglich der (mangelhaften) Stabilität bisheriger Referenzpunkte («Fixpunkte») können eine Überprüfung und Ergänzung der Messanlage erfordern. Zudem können modernere Instrumente zu Modifikationen, Verbesserungen und Erweiterungen der Überwachungskonzepte führen. 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. Ursachen können sein:

- Alkali-Aggregat-Reaktionen im Beton;
- Bewegungen im Bereich des Fundamentes oder der Widerlager (Hebungen, Setzungen, Talverengung, relative Bewegungen im Untergrund, Einflüsse von Bautätigkeiten im Untergrund);
- Tektonische Bewegungen (plötzlich durch Erdbeben oder durch langfristige minimale geologische Verschiebungen).

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 realisiert werden können. Die zu erwartenden Bewegungen sind meist sehr klein und erfordern höchste Genauigkeit (d.h. Richtigkeit und Präzision) (Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 2013).

Die Vorteile der langen geodätischen Messreihen über Jahrzehnte kommen beim Studium des langfristigen Verhaltens der Stauanlage und ihrer Umgebung zum Tragen (Walser 2014). Voraussetzungen dafür sind wiederum:

- Langfristige, zeitbeständige Installationen sowohl bei den Referenzpunkten («Fixpunkten») wie bei den Kontrollpunkten (Objektpunkten) an den Talsperren und in der Umgebung;
- Genau und zuverlässig bestimmte Fixpunktanlage mit genügend Referenzpunkten im Falle von Punkterstörungen;
- Hochpräzise, optimal aufeinander abgestimmte und regelmässig kalibrierte (oder zumindest geprüfte) Instrumente (Gottwald 1998);
- Sorgfältiger Unterhalt und bedarfsgerechte Erneuerung der Messkonzepte und -netze;
- Genügend überlappende Messungen beim Ersatz von Punkten oder Änderungen des Messkonzeptes;
- Verfügbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen bzw. deren Resultate über viele Epochen;
- Fachwissen und Erfahrung der ausführenden Personen bei der Konzeption, der Durchführung der Messungen, den Auswertungen und der Beurteilung der Deformationen.

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, Inklinometer / Neigungsmesser, Fugenmesser / Dehnungsmesser, etc.), trägt wesentlich

zur verbesserten Überwachung und Interpretation bei (SNGT 1991). So können die hochgenauen relativen und häufiger ausgeführten «inneren» Messungen mit den selteneren geodätischen Beobachtungen verbunden werden, um absolute Verschiebungen bestimmen zu können. Selbstverständlich sind auch die Temperaturmessungen (Luft-, Wasser-, Beton- und Felstemperaturen) sowie die Wasserstands- und Sickerwassermessungen damit zu kombinieren und zu interpretieren. Schliesslich sollen geophysikalische und geotechnische Messinstallationen wie Gleitmikrometer oder -deformeter, Bohrlochextensometer etc. an die geodätischen Netze angeschlossen werden. So hat swisstopo in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strassen- und Eisenbahnbau der ETHZ (ISETH) und der Firma Solexperts AG einen Zentrierstab für optische Präzisionslotung entwickelt, mit dem die oberste, kegelförmige Messmarke der Gleitmikrometer (bzw. TRIVEC) direkt als Kontrollpunkt in geodätische Netze integriert werden kann (siehe Abb. 25/26). Damit können die Verschiebungsprofile und räumlichen Verschiebungsvektoren dieser Messmarken, welche sich auf Referenzzonen im Untergrund beziehen, mit der Fixpunktanlage und weiter entfernt liegenden Referenzpunkten der Geodäsie verbunden und gemeinsam interpretiert werden. Die bereits in der vorherigen Epoche 1945-1980 (Kapitel 2.2.2) erwähnte Vielzahl vermessungstechnischer, geophysikalischer und geotechnischer Methoden, die nebeneinander beobachtet und ausgewertet werden, wird in modernen Überwachungskonzepten zum eigentlichen «Systemdenken» erweitert, vgl. (STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 2005, Teil 1), indem sie direkt, also mittels identischer Messpunkte kombiniert und die Resultate gesamthaft analysiert werden.



Abb. 25/26: Zentrierstab für optische Präzisionslotungen (links in der Holzkiste und rechts eingesetzt im Messrohr) zur Kombination mit geotechnischen Messungen wie Gleitmikrometer/TRIVEC (1994); Rechts: Stahlpfeiler mit Kreuzschlitten zur optischen Lotung mit Nadirlot über der Messmarke im Zentrierstab. Einsatz im Netz der Staumauer «Pfaffensprung» (swisstopo 2017)

Ab den 1980er Jahren haben die Entwicklungen in der Elektronik und im Instrumentenbau zur Steigerung der Genauigkeiten der geodätischen Deformationsmessungen beigetragen (Meier; Aeschlimann 1986; Ganzoni; Köchle 1991) (Egger in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 195–203). Seit 1986 ermöglicht das Kern Mekometer ME5000 (Meier; Loser 1986; Ganzoni; Köchle 1991) (siehe Abb. 54), das bis heute zu den Distanzmessern höchster Präzision zählt, das Messen von Distanzen im Nahbereich oder im Innern der Talsperren im Submillimeterbereich, und 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 Genauigkeit 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 zu Genauigkeitssteigerungen beiträgt.

Ab 1988 hat das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) an Stauanlagen in der Schweiz die ersten satellitengestützten GPS-Messungen durchgeführt (Wiget und Schneider 1992) (siehe Kapitel 3.6).

Wie anfangs der 1920er Jahre (Methoden der Landestriangulation für Staumauerdeformationsmessungen) haben diese Entwicklungen einen engen Bezug zu Neuerungen in der Landesvermessung (vgl. Artikel zum Aufbau der neuen Landesvermessung, Schneider; Gubler; Wiget 2015; Wiget et al. 2020). Dank den GPS- und später GNSS-Messungen kann die bisherige Einschränkung der notwendigen Sichtverbindung zwischen den Messpunkten umgangen werden. Dies ermöglicht es, erweiterte (sog. hybride) Referenznetze mit Festpunkten in entfernter liegenden, geologisch stabilen bzw. von der Stauanlage unbeeinflussten Zonen zu errichten (Fritzensmeier et al. 1988), (Schneider und Wiget in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 203–210 sowie Anhänge 2 und 3). Zudem ermöglichen GPS- oder GNSS-Messungen in situ den Masstab der eingesetzten Distanzmesser zu überprüfen. Denn die Etablierung eines hochgenauen äusseren Referenzrahmens setzt die Gewährleistung eines «absoluten» Masstabes voraus, beispielsweise zur zuverlässigen Beurteilung von Talverengungen. Dies im Gegensatz zu den Bestimmungen der (kurzfristigen) elastischen Verformungen mit trigonometrischen Netzen, bei denen die differentiellen Verschiebungsmessungen rein auf Vorwärtseinschnitten basierten, bei denen der Netzmasstab noch eine untergeordnete Rolle spielte.



Abb. 27: GPS-Station (Trimble 5700/Zephyr) auf einem externen Referenzpunkt (LV95-Punkt Einsiedeln) für die Staumauer «In den Schlägen» am Sihlsee (swisstopo 2014)

Wesentliche Verbesserungen bringen selbstverständlich auch in dieser Epoche die Digitalisierung und die EDV im Bereich der Auswertung und Ausgleichsrechnung (Carosio und Dupraz in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 216–225). Ab den 1980er Jahren wird die strenge Ausgleichung der Netze nach der Methode der kleinsten Quadrate zum Standard, sogar über mehrere Messepochen. 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 Ausgleichung mehrerer Messepochen unterscheiden (Kistler et al. 2010).

Mit neuen Instrumenten und Softwarewerkzeugen sind auch kontinuierliche Überwachungen von Talsperren möglich (Aeschlimann in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, Anhang 1). Im Gegensatz zu vielen automatisierten Instrumentierungen im Innern der Staumauern (z.B. automatische Pendelablesungen) sind vollautomatische, kontinuierliche geodätische Überwachungen noch eine Ausnahme (Brunner; Hartinger; Wieser 2000). Zumindest mit GNSS-Geräten wären sie allerdings heute schon relativ einfach und kostengünstig realisierbar (siehe Kapitel 3.6 GNSS und 3.7 Geomonitoring).

Das wohl umfangreichste «Geomonitoring» der Schweiz im Bereich von Stauanlagen wurde im Rahmen des Projektes AlpTransit Gotthard (ATG) im Vorderrheintal realisiert (Bräker 2006; Ehrbar; Bremen; Otto 2010) und ist im Kapitel 3.7 beschrieben. Zusätzlich zu den erweiterten «episodischen» Messungen gemäss Stauanlagenverordnung (sog. Überwachungsstufen<sup>1</sup> 1 und 2) wurden zur Überwachung der Talquerschnitte im Umfeld der Staumauern «Curnera», «Nalps» und «Santa Maria» spezielle, automatisierte geodätische und geotechnische Messanlagen eingerichtet (sog. Überwachungsstufe<sup>1</sup> 3). Ziel dieses umfangreichen Monitorings vor und während des Tunnelbaus war es, allfällige durch den Bau des Gotthard-Basistunnels verursachte Geländedeformationen und damit die Auswirkungen des Untertagebaus auf die drei Stauanlagen frühzeitig erkennen zu können und genügend Zeit für Gegenmassnahmen zu haben. Anlass und Begründung, warum das Verhalten des Gebirgsmassivs beim Ausbruch des tiefliegenden Tunnelbauwerks messtechnisch erfasst werden sollte, boten zwei Ereignisse bzw. Erkenntnisse im Zusammenhang mit anderen Tunnelbauten (Bremen 2005), (Lombardi et al. 2016):

- Die infolge der Ausbrucharbeiten des Sondierstollens zur Erkundung der hydrogeologischen Grundlagen zum Bau des Rawiltunnels ab 1978 bei der Staumauer «Zeuzier» beobachteten Geländesenkungen und Talsperrenverformungen mit Rissen an der Mauer, welche eine sofortige Absenkung des Seespiegels erforderten. Die Setzungen im Taleinschnitt erreichten etwa 13 cm (Biedermann 1980; Egger 1980; Schneider 1980; Arioli; Egger 1989).
- Die vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo 1997 mittels Präzisionsnivellement im Landesnivellement entlang 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 (Schlatter et al. 1998; Schlatter 2007).

Das Ereignis an der Staumauer «Zeuzier» zeigte die Schwäche der kleinräumig angelegten Überwachungsnetze klar auf (Biedermann 1980). Auf Grund dieses Ereignisses wurden viele Messnetze durch zusätzliche Referenz- und Kontrollpunkte seeseitig und talseitig grossräumig erweitert (Egger 1982), wie dies in den obigen Abschnitten auch im Zusammenhang mit den Möglichkeiten dank EDM- und GNSS-Messungen erläutert wurde. Das Aussennetz der Staumauer «Gigerwald» (1976) wurde zum Beispiel durch die Beobachtungspfeiler 5 und 6 erweitert und somit grossräumiger abgestützt (siehe Abb. 28 im Vergleich zu Abb. 29).

---

<sup>1</sup> Der Begriff der «Überwachungsstufen» beim Bau des AlpTransit Gotthard Basistunnels (GBT) ist nicht zu verwechseln mit den Überwachungsstufen 1 bis 4, wie sie definiert sind im Bericht des Bundesamtes für Wasser und Geologie (BWG) «Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zur Überwachung und Unterhalt», Version 1.0 (Dezember 2002). Die heute massgebende «Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil D: Inbetriebnahme und Betrieb, Version 2.0» verwendet die inhaltlich gleichbedeutenden Begriffe «Überwachung auf Niveau 1 bis 4»

Die drei Stufen der Überwachung der Stauanlagen über dem GBT waren (vgl. Kapitel 3.7):

- Überwachungsstufe 1: Ordentliche Messungen der Kraftwerke Vorderrhein AG für die reguläre Talsperrenüberwachung
- Überwachungsstufe 2: Ergänzende episodische geodätische Messungen höchster Genauigkeit in einer erweiterten Messanlage im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE)
- Überwachungsstufe 3: Zusätzliche, weitgehend automatisierte, ganzjährige geodätische Messungen sowie Präzisionsnivellements in einer grossräumigen Monitoringanlage (Geomonitoring) im Auftrag der AlpTransit Gotthard AG (Ausschreibung «Los 349») in Zusammenarbeit mit den Experten der Fachkommission «Vortriebe und Stauanlagen» (FK VST)

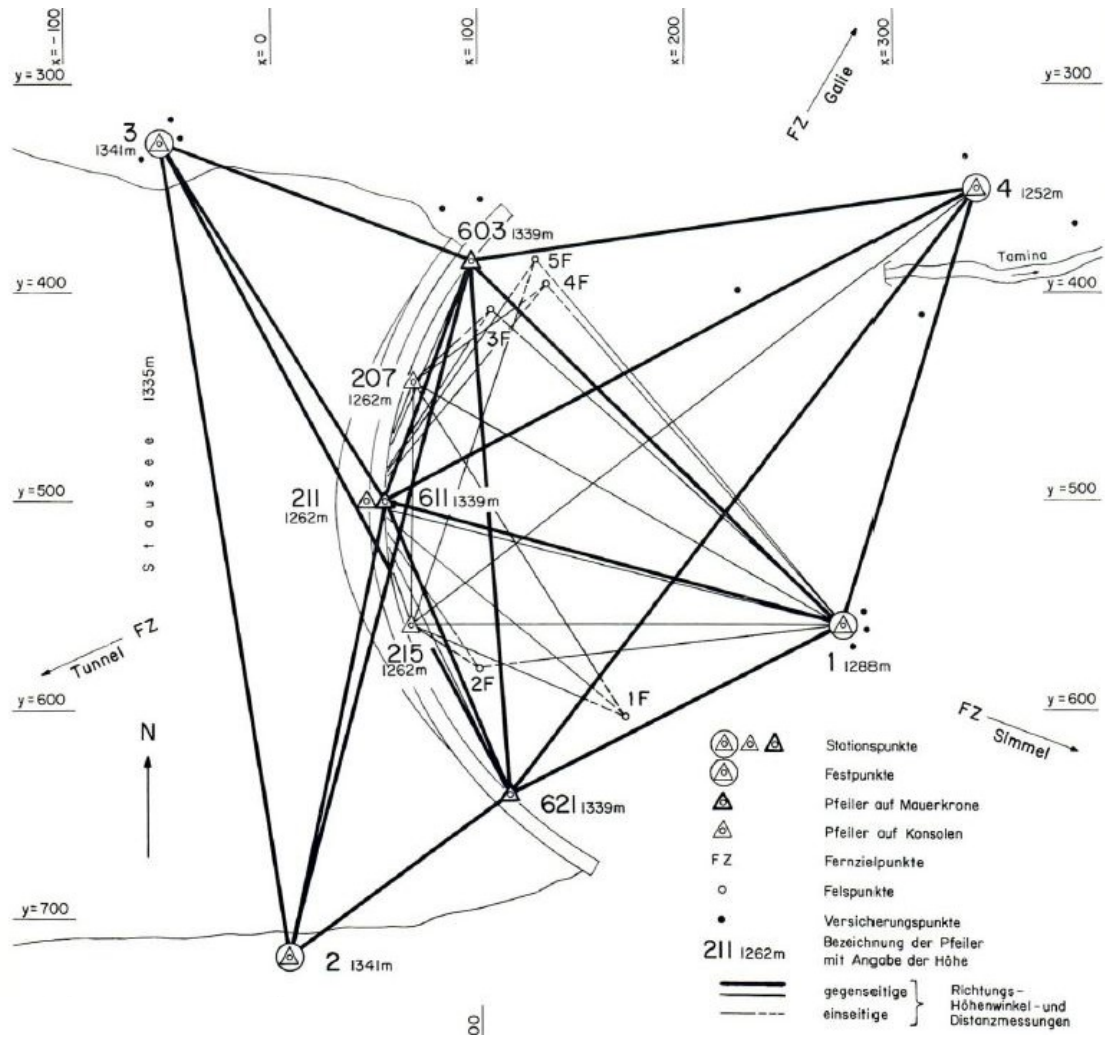


Abb. 28: Netzplan der trigonometrischen Messungen der Staumauer «Gigerwald» (Keller 1977)

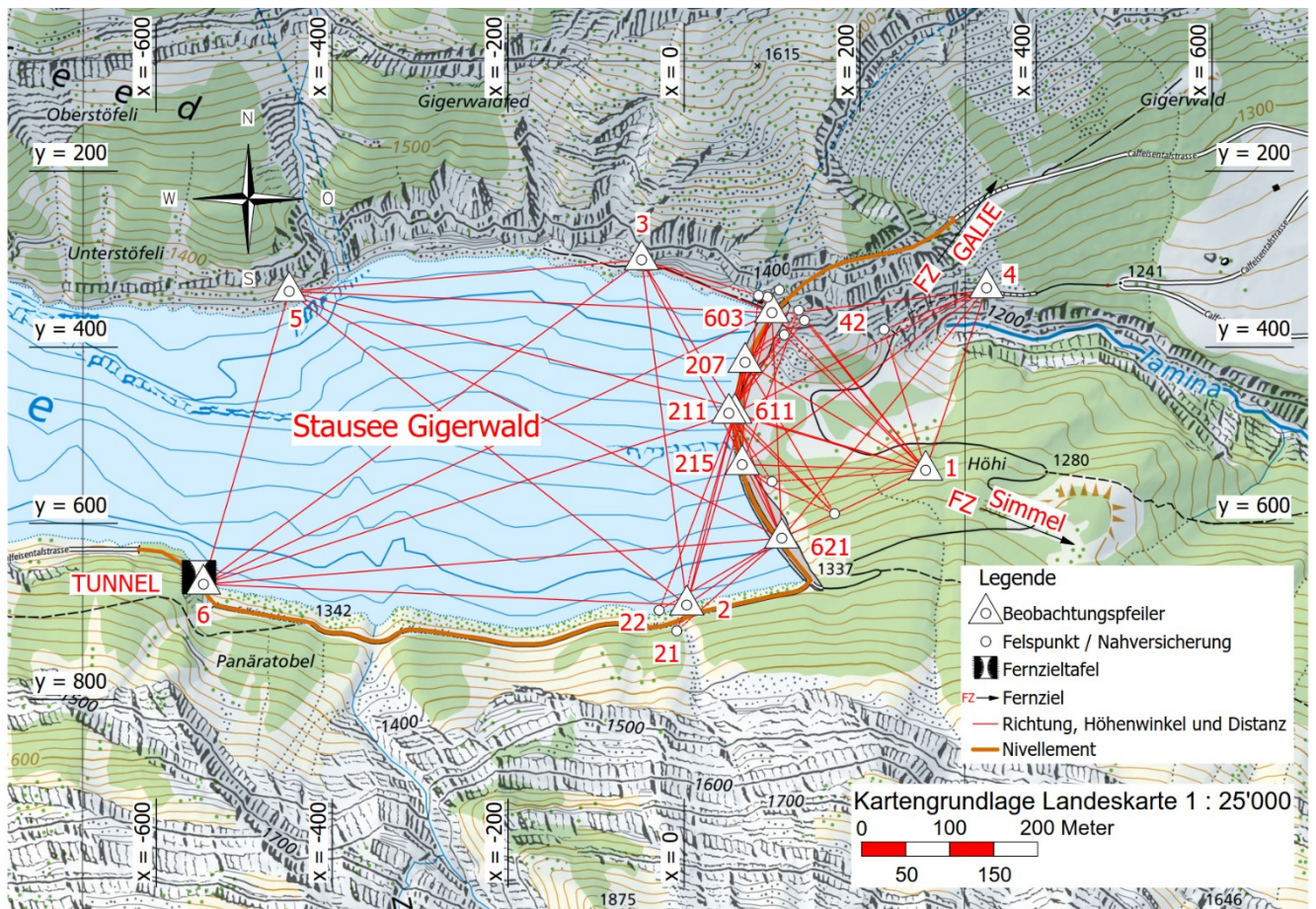


Abb. 29: Erweitertes Aussennetz der Staumauer «Gigerwald» (Stand 2005) (© Schneider Ingenieure AG)

Im Zusammenhang mit der Umstellung der Energieerzeugung auf Pumpspeicherbetrieb können die Staumauern einer erhöhten Anzahl von Lastwechseln ausgesetzt sein. Deshalb wurden auch bei den «inneren» Messsystemen zur Überwachung von Talsperren neue Konzepte und Messmethoden entwickelt bzw. zur Anwendung gebracht. Dazu gehören faseroptische Messsysteme, mit denen Deformationsmessungen (z.B. an Blockfugen) mit einer Präzision im Bereich weniger Mikrometer möglich sind (Lienhart; Woschitz; Klug 2014). Schweizerische Forschergruppen und Firmen, wie die Smartec SA, sind in dieser Sparte der Entwicklung neuer, äusserst vielfältig einsetzbarer Messsensoren sogar führend tätig (Inaudi 1997) (siehe auch Kapitel 4.2).

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden an verschiedenen Stauanlagen oder deren Umgebung erste Versuche mit flächenhaften Messverfahren wie terrestrisches Laserscanning (TLS) und terrestrische Radarinterferometrie durchgeführt (Barras 2014) (Jacquemart; Meier 2014). So hat beispielsweise swisstopo bereits 2004 in Zusammenarbeit mit der Firma terra vermessungen ag an der Staumauer «In den Schlagen» am Sihlsee (Wasserkraftwerk Etzelwerk der SBB) TLS-Testmessungen mit einem Laserscanner vom Typ Trimble/Menzi GS200 durchgeführt (siehe Abb. 30/31). Die Ergebnisse waren zwar für eine messtechnische Bestandaufnahme der Luftseite der Staumauer dienlich. Sie hatten aber noch nicht die notwendige Genauigkeit, um aus einer Zweitmessung differenzielle Verschiebungen der Grössenordnung (Millimeter) bestimmen zu können, wie sie an dieser Gewichtsmauer maximal auftreten (siehe auch Kapitel 4.3).





Abb. 30/31: Laserscanner Trimble/Menzi GS200 (links) mit Messkugel auf Referenzpunkt (rechts) anlässlich von Testmessungen 2004 an der Staumauer «In den Schlagen» am Sihlsee (swisstopo 2004)

Insbesondere wegen Unsicherheiten bezüglich der realisierbaren Genauigkeiten gehören diese Methoden somit noch nicht zum Standardprogramm der geodätischen Überwachung von Talsperren in der Schweiz. Dies mag sich in Zukunft zumindest als Ergänzung zu klassischen geodätischen Messungen oder für Spezialanwendungen ändern (Wieser et al. 2020) (vgl. Kapitel 4.3). Auch der Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie ist auf Spezialanwendungen beschränkt geblieben (Kersten et al. 1995; Auf der Mauer; Erny; Maas 1999). Allerdings werden photogrammetrische Methoden schon seit Jahrzehnten für Geländeüberwachungen im Umfeld der Stauanlagen und der Stauseen und für die Riss-Dokumentation mit Erfolg eingesetzt (Flotron in STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 211–216).

Zum Abschluss der Beschreibung dieser Epoche sei erwähnt, dass das Bundesamt für Landestopografie swisstopo beschlossen hat, sich aus der Stauanlagenvermessung zurückzuziehen (Willi 2020). Über 100 Jahre waren die geodätische Landes- und Ingenieurvermessung bei swisstopo eng verknüpft. Es gab viele Synergien und die Geodäten waren immer bestrebt, die neusten Entwicklungen und Erfahrungen gegenseitig einfließen zu lassen. Als Beispiele seien die trigonometrischen Netzmessungen, die Präzisionsdistanzmessungen und das Präzisionsnivellement, die GNSS-Messungen sowie die Entwicklung und Anwendung der Netzausgleichssoftware LTOP erwähnt. Nun hört swisstopo nach 100 Jahren auf, sich als amtliche Stelle in diesem anspruchsvollen und verantwortungsvollen Bereich der Ingenieurgeodäsie zu betätigen und sich an dessen Weiterentwicklung zu beteiligen. Damit wird auch das wertvolle Wissen und die Erfahrung verloren gehen, um die Aufsicht Talsperren des BFE sowie das Schweizerische Talsperrenkomitee als direkte Ansprechpartner innerhalb der Bundesverwaltung bei der Gewährleistung der Sicherheit grosser Stauanlagen unterstützen zu können. Weiterhin durchführen und sogar ausbauen will swisstopo dafür Beratungen und Mandate, die eng mit der Fundamentalgeodäsie verknüpft sind, wie Lotabweichungsmessungen, Kreiselmessungen oder Präzisions-GNSS-Messungen.

**Akteure (alphabetisch) der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Epoche ab 1980:**

- 3sigmas SA
- Acht Grad Ost AG
- AFRY Schweiz AG (*ehemals Pöyry Schweiz AG bzw. Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG*)
- Axpo Power AG
- BBHN SA
- Bichsel Bigler Partner AG
- Bourgeois et Rudaz SA
- BSAP Ingenieure und Berater
- BSF swissphoto AG
- Bundesamt für Landestopografie (swisstopo)
- Cavigelli Ingenieure AG
- DTP SA Bureau d'études
- Flotron AG
- GEOINFO Gossau AG
- Geomat SA/AG
- GEOSAT SA
- GEO SOLUTIONS Ingénieurs SA
- Grünenfelder und Partner AG
- HYDRO Exploitation SA
- IGemetris Technologies SA
- Jean-Pierre Moret SA
- Lehmann - Visconti Sagl
- Meier SA Studio di Ingegneria Geodetica
- Rudaz + Partner SA
- Schneider Ingenieure AG (*ehemals Ingenieurbureau Walter Schneider AG*)
- Straub AG Ingenieure + Geoinformatiker
- Straub Vermessungen AG
- Studio d'Ingegneria Calastri Gabriele
- Studio ing. Riccardo Calastri
- Trigonet AG (*ehemals Ingenieurbüro Rolf Kägi*)

Tabelle 5: Akteure der geodätischen Talsperrenbeobachtung in der Schweiz ab 1980  
(ohne Gewähr für Vollständigkeit)

### 2.3.2 Aktivitäten von Schweizer Firmen an Talsperren im Ausland

Während in der Schweiz in dieser dritten Epoche (ab ca. 1980) primär bestehende Stauanlagen erneuert und teilweise erhöht wurden 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.

Mehrere grosse Ingenieur-Dienstleistungsunternehmen waren und sind in der Energieversorgungsbranche und im Bau von Wasserkraftwerken und damit auch Stauanlagen weltweit tätig (folgende Informationen stammen aus Firmen-Websites und teilweise aus Wikipedia):

- *Elektrowatt Ingenieurunternehmungen AG*, ursprünglich Teil der Finanzierungsgesellschaft *Bank für Elektrische Unternehmungen*, kurz *Elektrobank*, gegründet 1895; 1946 umbenannt in *Elektro-Watt*

*Elektrische und Industrielle Unternehmungen AG*; die seit 1964 selbständige technische Planungsgesellschaft *Elektrowatt Ingenieurunternehmungen AG (EWI)*, später *Electrowatt Engineering AG*, wurde 1999 als *Pöry Schweiz AG* in die Pöry Gruppe integriert.

- *Motor-Columbus AG*, als Ingenieur- und Finanzierungsgesellschaft im Bereich des Kraftwerkbaus 1895 gegründet; 1969 wurde die technische Abteilung der Motor-Columbus in die *Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG* verselbständigt; diese erwarb 1971 eine Mehrheit an der Straub AG, welche damit zu deren Hauptpartner für Vermessungen wurde. Später wurde die MC ING AG in *Colenco Power Engineering AG* umbenannt und 2007 als *AF-Colenco AG* bzw. *AF-Consult Switzerland AG* in die AF-Gruppe (schwedische Firma Ångpanneförenigen) integriert.
- Die *Pöry Schweiz AG* und die *AF-Consult Switzerland AG* sind heute als *AFRY Schweiz AG* in der ÅF Pöry AB vereinigt.
- *Gruner AG*, gegründet 1862, das Ingenieur- und Planungsunternehmen ist in den Bereichen Hochbau, Infrastruktur und Energie tätig und seit 1898 weltweit im Wasserbau, speziell im Bau von Wasserkraftanlagen und Staumauern engagiert.
- *Stucky SA*, gegründet 1926; das Ingenieurbüro Stucky Ingénieurs-conseils SA mit Schlüsselkompetenzen in den Bereichen Wasserkraftwerke und Stauanlagen wurde 2013 in die Gruner AG integriert.

Heinrich Eduard Gruner und Alfred Stucky waren die Ingenieure der 1918-1920 gebauten Stau-mauer «Montsalvens» (siehe Kapitel 2.1.1). Sie waren auch Gründungsmitglieder der Schweizerischen Talsperrenkommission (siehe Kapitel 0).

Dank den guten Kontakten zu diesen und weiteren Ingenieurunternehmungen, in denen sie teilweise als Vermessungsabteilungen integriert waren (z.B. EWI) oder als Partnerfirmen eng verbunden waren (z.B. Straub AG mit Motor-Columbus AG bzw. AF-Colenco AG), konnten Schweizer Vermessungsfir-men und Schweizer Geodäten ihre wertvollen Kenntnisse auch beim Bau und der Überwachung von Stauanlagen im Ausland einbringen. Beispiele solcher Aktivitäten sind in der folgenden Tabelle 6 kurz erwähnt. Im Anhang 2 sind weitere Detailangaben in firmenspezifischen Tabellen zusammengestellt.

#### **Beteiligungen Schweizerischer Vermessungsfirmen am Bau und der Überwachung ausländischer Stauanlagen:**

- Eidg. Landestopographie in Spanien (1929-1937), u.a. im Auftrag der damaligen Elektrobank
- Schneider Ingenieure AG, insbesondere im Iran und im Süden Afrikas (Südafrika, Sambia und Zimbabwe) (1963 bis heute)
- Elektrowatt Ingenieurunternehmungen AG, später Pöry Schweiz AG, heute AFRY Schweiz AG, bei Talsperrenbauten in Griechenland und der Türkei, Albanien, Georgien, Jemen, Afrika (Nigeria und Burkina Faso) sowie in Laos (1970 bis heute)
- Straub AG bei Stauanlagen in Zentral- und Südamerika (Guatemala, Honduras, Bolivien), im Irak und den Philippinen, primär als Partnerfirma für Vermessung der Motor-Columbus AG (1976 bis heute)
- BSF Swissphoto AG: In Albanien im Auftrag des schweiz. Staatssekretariats für Wirtschaft (SECO) (2012-2018)
- Geosat SA in Afrika (Kongo und Angola), jeweils in Zusammenarbeit mit Experten der Firma Stucky SA (2013 bis heute)

Tabelle 6: Liste von Schweizer Vermessungsfirmen, die an ausländischen Stauanlagen tätig waren

### 3 Methodische und instrumentelle Entwicklungen

Dieses Kapitel beschreibt die bei der Talsperrenüberwachung eingesetzten geodätischen Mess- und Auswertemethoden und die dazu verwendeten Instrumente.

#### 3.1 Alignment

Bauingenieure und Bauleitungen waren sich schon beim Bau der ersten Talsperren bewusst, dass infolge der Belastung durch das eingestaute Wasser Verformungen am Bauwerk entstehen werden. Sie versetzten auf der Mauerbrüstung Kontrollpunkte exakt in einer Geraden und bestimmten die Abweichungen gegenüber den beiden Endpunkten. Dieses Vermessungsverfahren wird in der Geodäsie als Alignment bezeichnet (Aeschlimann 1981). Es kamen zwei Arten von Ablesemöglichkeiten zum Einsatz. Bei der ersten Methode wird bei den Kontrollpunkten ein Massstab aufgesetzt und der Operateur liest die Abweichung aus der Geraden am Massstab ab. Bei der zweiten Methode wird eine Zielmire mit Hilfe einer mechanischen Vorrichtung nach Anweisung des Operateurs in die Gerade eingefluchtet und die Abweichung kann an einer Skala an der Mire abgelesen werden. Verschiedene Einflüsse wie Luftturbulenzen auf der Krone, Refraktionserscheinungen, ungünstige Lichtverhältnisse oder Einschränkungen wie schwierige Kommunikation zwischen Operateur und Gehilfe, Abdeckung des Fadenkreuzes auf dem Massstab, Kontrollpunkte nur auf der Krone möglich etc. befriedigten die Verantwortlichen nicht (Lang 1929). Bei Bogenmauern liess sich nur die Mauermitte überwachen. Eine Lagekontrolle der beiden Endpunkte war nicht möglich.

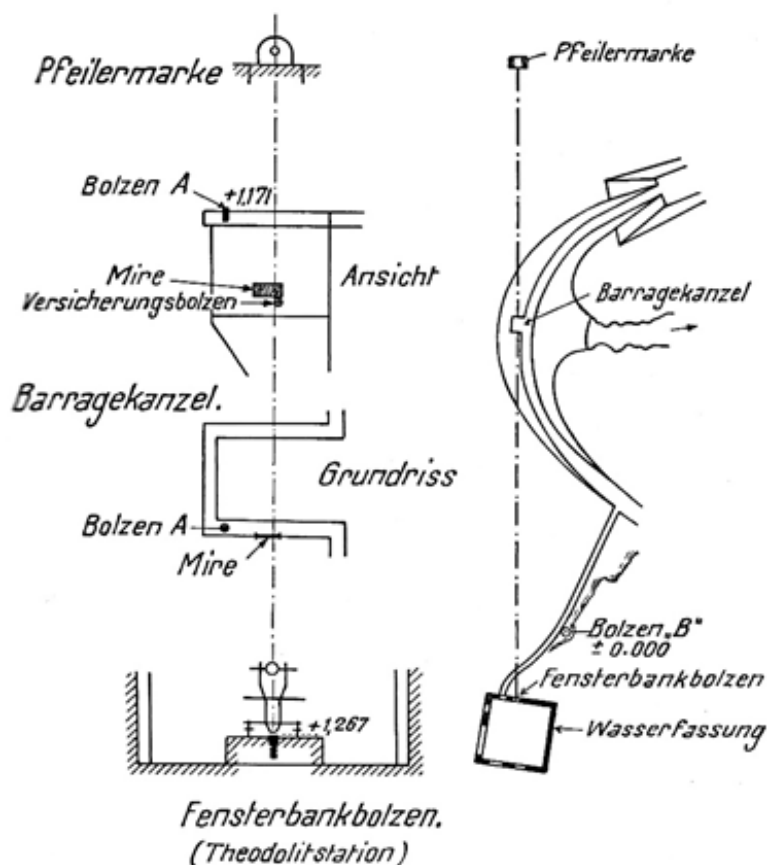


Abb. 32: Alignment an der Staumauer «Montsalvens» (Lang 1929)

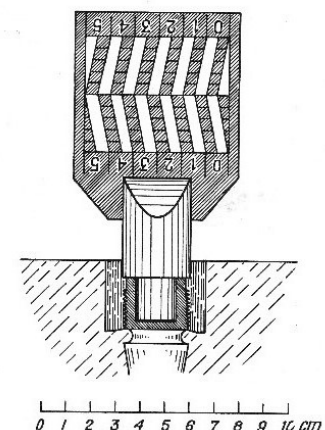


Abb. 33: Zielmire (STK 1946)

### 3.2 Trigonometrische Messung

Von mindestens zwei Beobachtungspfeilern aus, welche gut fundiert und von der Druckzone der Stau-mauer möglichst entfernt sind, werden die Richtungen zu Bolzen an der Luftseite der Mauer und zu entfernten Referenzpunkten («Fixpunkten») für eine gute Satzorientierung gemessen. Die Anordnung der Pfeiler wie der Mauerbolzen («Kontroll- oder Objektpunkte»), meist längs der Krone sowie in verschiedenen Vertikalschnitten bis hinunter zum Mauerfuss angeordnet, soll optimale Bestimmungsrichtungen ergeben, welche sich in den Bolzen unter günstigem Winkel schneiden. Aus den Winkeldifferenzen zwischen den einzelnen Messungen, zum Beispiel bei verschiedenen Staukoten, lässt sich die Querverschiebung der Bolzen rechnen (Vorwärtseinschneiden). Bei der reinen trigonometrischen Methode wird die Lageänderung der Mauerpunkte bis in die 1950er Jahre meist noch (halb)grafisch durch Auftragen der Querverschiebungen von mindestens zwei Beobachtungspfeilern aus ermittelt (Lang 1929; Ulbrich 1956). Da eine Distanzänderung zwischen Beobachtungspfeiler und Mauerpunkt nur einen kleinen Einfluss auf die Querverschiebung hat, wird sie als Konstante angenommen. In einzelnen Netzanlagen werden allerdings auch einmalige, hochgenaue Basismessungen mit Invardrähten zwischen Beobachtungspfeilern durchgeführt. Die rechnerische Netzausgleichung zur Bestimmung der Verschiebungen der Mauerpunkte wird mit zunehmend mehr Beobachtungsstationen und Überbestimmungen immer wichtiger. Das Aufkommen der elektronischen Rechenautomaten in den 1960er Jahren begünstigt diese Entwicklung (Conzett 1970).

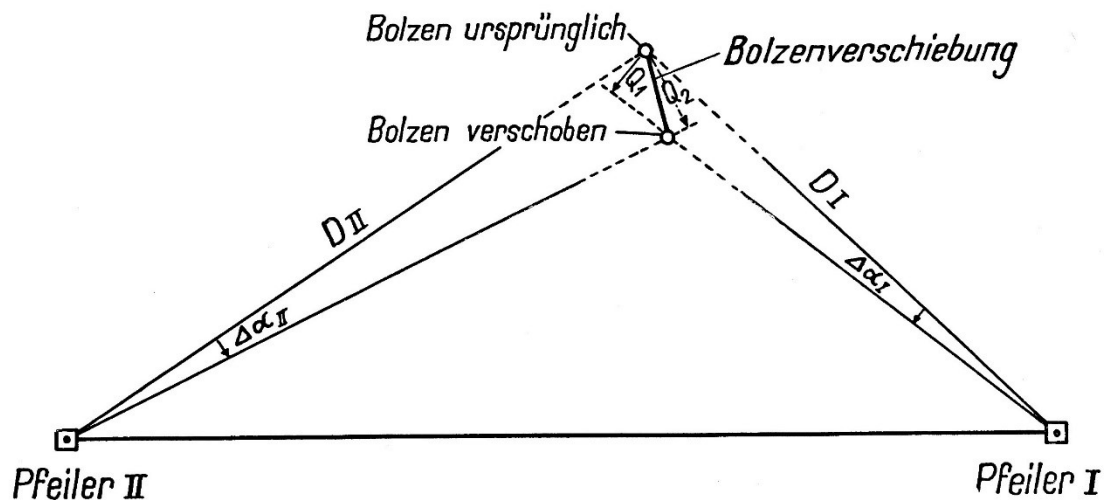


Abb. 34: Wiederholtes Vorwärtseinschneiden von zwei Messpfeilern aus (Lang 1929)

Zum Nachweis der Stabilität der Beobachtungspfeiler werden zusätzliche Richtungssätze zu nahegelegenen, stabil im guten Fels gesetzten Versicherungsbolzen sowie zu entfernten Fixpunkten gemessen. Aus den Winkeländerungen zu den Pfeilerversicherungsbolzen kann mittels Rückwärtseinschnitt die Stabilität des Pfeilers überprüft werden.

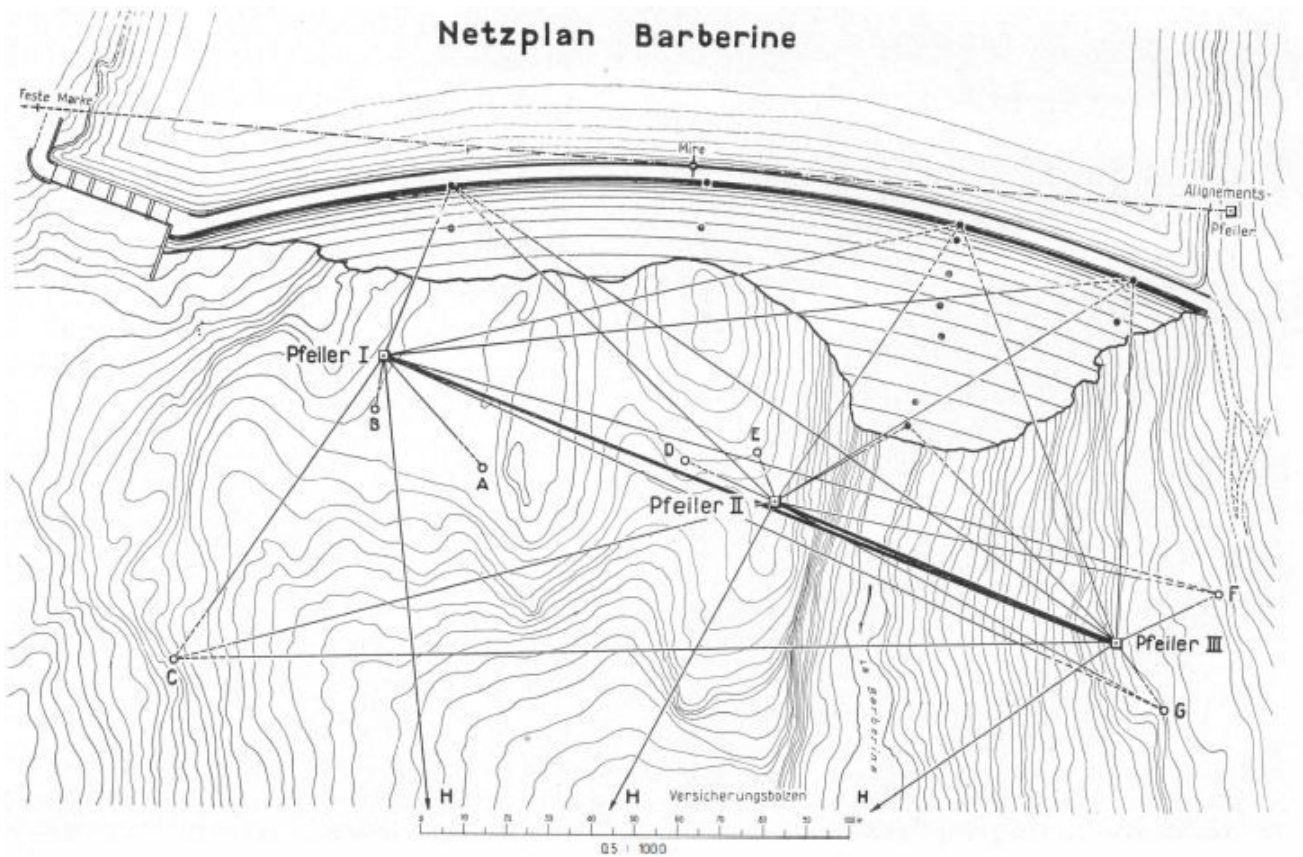


Abb. 35: Netzplan geodätische Überwachung «Barberine» (Lang 1929)

Schon immer war es den Vermessungsfachleuten wichtig, eine Genauigkeitsaussage über die durchgeführten Messungen machen zu können (Aeschlimann 1971). Aus den Satzmessungen lassen sich die erreichten Richtungsgenauigkeiten und mit der Distanz vom Beobachtungspfeiler zum Kontrollpunkt die Genauigkeit der ermittelten Querabweichungen berechnen.

Die beiden Instrumentenhersteller Wild Heerbrugg AG und Kern & Co. AG Aarau bauten ab den 1930er Jahren mechanische Sekundentheodolite mit diametraler Kreisablesung und Mikrometer für die exakte Winkelablesung.



Abb. 36: Präzisions-Triangulationstheodolit Wild T3 (produziert 1925-1988)



Abb. 37: Kern DKM3 mit Spiegellinsen Fernrohr (produziert 1939-1980)

Als Zielmarken werden Bolzen und Miren verschiedenster Art verwendet (vgl. auch Kapitel 2.1.2). So gut wie möglich werden diese direkt im Beton oder im Fels gesetzt bzw. in eingemauerten «Kappen- oder Zentrumsbolzen» eingesteckt (Abb. 38/39/40), in den Kontrollgängen allenfalls auf Konsolen (Abb. 41). Wichtig ist, dass diese Versicherungen dauerhaft sind und die Kontrollpunkte langjährig auf Zehntelmillimeter genau materialisiert bzw. reproduziert werden können.



Abb. 38/39: Steckmiren, Zentrierzapfen, Kleinzielmarke und Kleinreflektor für den Einsatz in Kappenbolzen (links); Kleinzielmarke eingesetzt im Netz der Staumauer «In den Schlagen», Sihlsee (rechts); vgl. auch Abb. 16 (Bilder swisstopo)



Abb. 40: Zentrumsbolzen im Fels mit Schutzring und Schutzdeckel sowie Kleinzielmarke (Schneider Ingenieure AG)

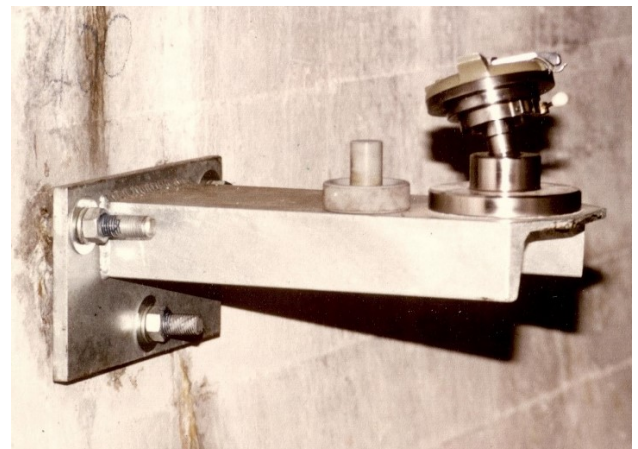


Abb. 41: Metallkonsole in Galerie mit Zentrierflansch CERN und Kern-Adapter (Schneider Ingenieure AG)

Beobachtungspfeiler und Kontrollpunkte, welche auch mit Instrumenten stationiert werden, werden mit Zwangszentrierungen ausgerüstet und mit Präzisionszielmarken bzw. -reflektoren bestückt.

Zur Optimierung der geodätischen Messnetze, besonders auch in Kombination mit elektrooptischen Distanzmessungen, sowie zur Verbindung der Lote und Polygonzüge in den Kontrollgängen mit dem Aussennetz (vgl. Kapitel 2.2.2 und Abb. 21) wurden in grossen Staumauern sogar spezielle Balkone gebaut (vgl. Abb. 43/44/45). Dies bedingt, dass der Vermessungsingenieur bereits bei der Projektierung und Bauplanung einbezogen wird.



Abb. 42: Wild/Leica Zielmarke mit Fernzieltafel, Staumauer «Deriner», Türkei (Pöry Schweiz AG)



Abb. 43: Kombinierte Reflektor-Zielmarke (Kern ME3000), Staumauer «Mauvoisin» (Pöry Schweiz AG)

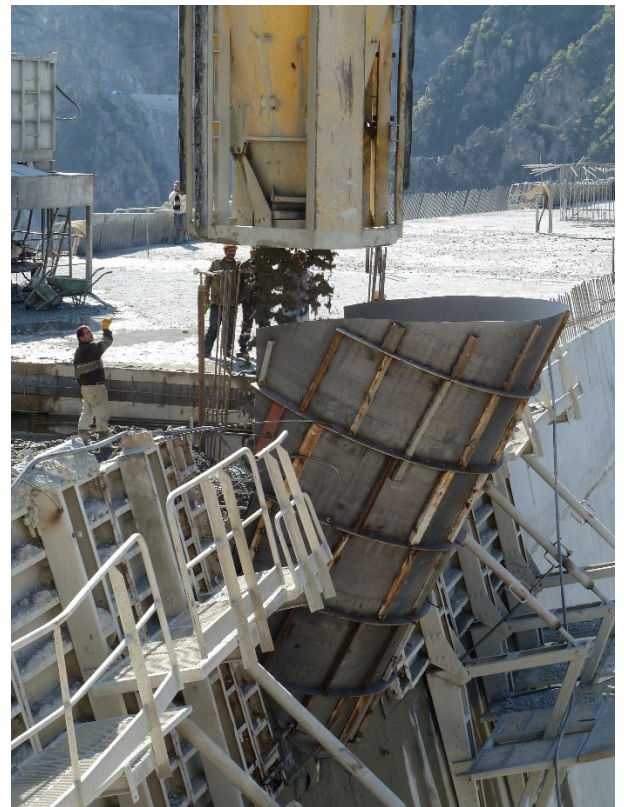


Abb. 44/45: Staumauer «Deriner», Türkei, vor der Fertigstellung der Mauerkrone auf Höhe 250 m; gut sichtbar sind die grossen Schalungen für die Balkone; vgl. auch Abb. 63 (Pöry Schweiz AG)



### 3.3 Höhenbeobachtung

Neben den horizontalen Deformationen interessieren auch Setzungen und Hebungen der einzelnen Mauerteile. Höhenänderungen im Bereich der Krone, innerhalb der Kontrollgänge und am Mauerfuss lassen sich am einfachsten und genauesten mit Präzisionsnivelements erfassen. Da die Höhenänderungen meistens nur einige Zehntelmillimeter betragen, müssen die Messungen mit Instrumenten und Miren (Invarlatten) von höchster Präzision ausgeführt werden. Lattenfuss- und Lattenteilungsfehler sowie Massstabseinflüsse müssen durch geeignete Messanordnungen möglichst eliminiert bzw. rechnerisch berücksichtigt werden. In Lotschächten soll eine gewünschte Höhenübertragung mittels Invarbändern/-drähten (oder senkrechter Präzisionsdistanzmessung mit ME5000) erfolgen, siehe Kapitel 3.4).



Abb. 46: Nivellement mit Leica Digitalnivellier DNA03 beim Bau der Staumauer «Deriner», Türkei (Pöryr Schweiz AG)



Abb. 47: Digital-Nivelliermire Leica im Kontrollgang der Staumauer «Muttsee» (Axpo Power AG)

Die Höhenänderungen von Kontrollpunkten (Mauerbolzen) an der talseitigen Mauerfläche werden mittels trigonometrischer Höhenwinkelmessungen bestimmt.

Die Höhenfestpunkte sind nach Möglichkeit auf beiden Talseiten in Felszonen ausserhalb der Druckeinflüsse durch die unterschiedlichen Wasservolumen des Stausees zu versichern. Die Instrumentenhöhe wird durch nivellieren der Kippachse der Theodolite exakt gemessen. Versicherungsbolzen in der Nähe der Pfeiler ermöglichten eine Kontrolle der relativen Stabilität der Messpfeiler in der Höhe.

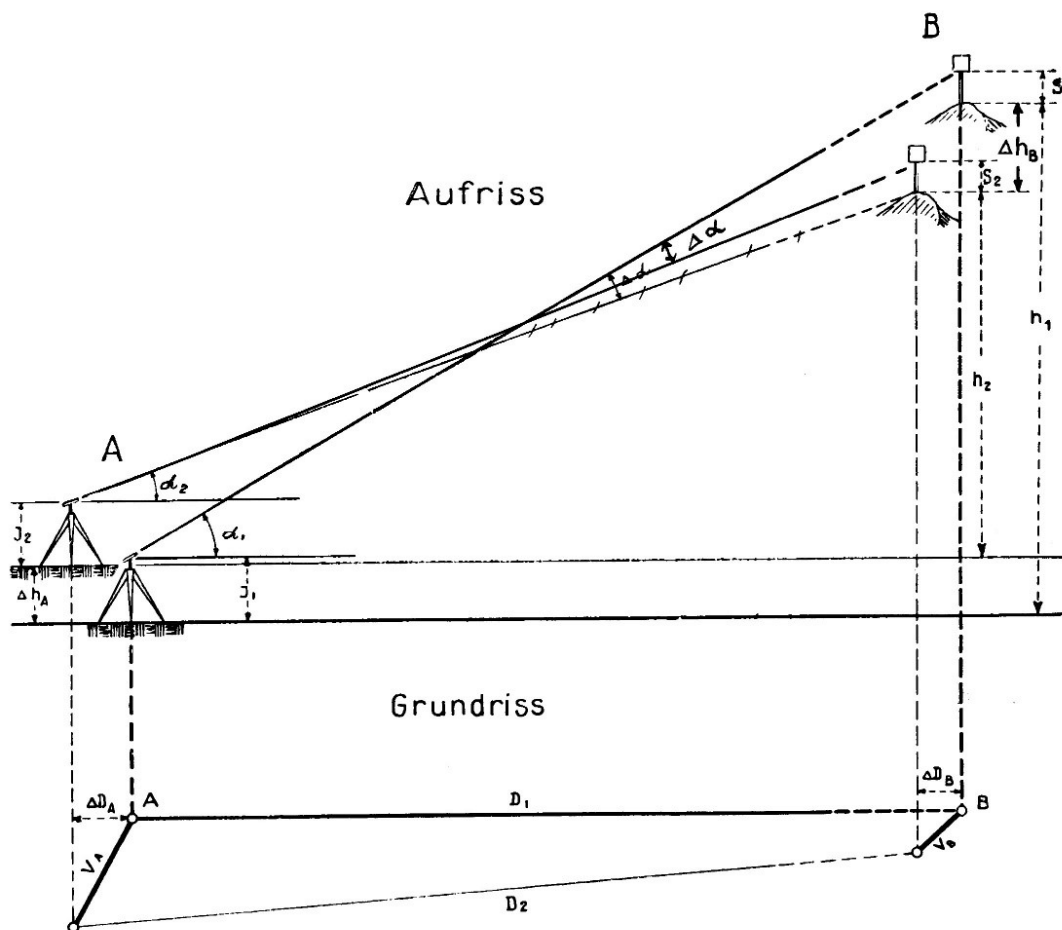


Abb. 48: Trigonometrische Höhendifferenzmessung (Lang 1929)

Die Distanzänderung zwischen den Messungen wird auf dem grafischen Verschiebungsplan gemessen. Da  $\alpha_2 - \alpha_1$  sehr klein ist gilt die Formel:

$$\Delta h_B = \Delta J - \Delta S + (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) D / \rho'' \Delta \alpha + \operatorname{tg} \alpha (\Delta D_A + \Delta D_B) + \Delta h_A$$

### 3.4 Distanzmessung

In den Kontrollgängen und teilweise auf der Krone werden Polygonzüge eingerichtet. Die Distanzmessungen zwischen den Polygonpunkten erfolgen mit mehreren Invarbändern oder -drähten mit speziellen Ablese- und Spannvorrichtungen. Invar ist eine Metalllegierung aus Eisen und Nickel mit einem sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Messungen sind aber sehr personal- und zeitintensiv. Die Standardabweichung einer Distanz beträgt ca. 0.1 - 0.2 mm.

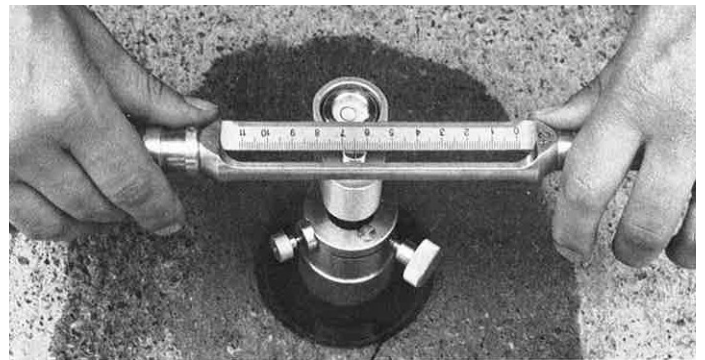
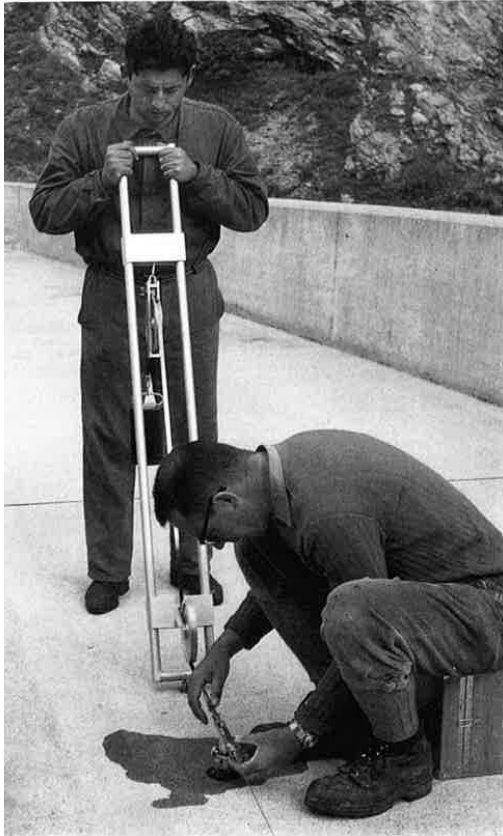


Abb. 49/50: Distanzmessung mit Invarband/-draht, Spannbock und Ablesemasstab für Polygonmessung auf der Staumauer «Malvaglia» (Kern Bulletin 7, 1963)

Das Distanzmessgerät Distometer ISETH (Entwicklung durch das Institut für Strassenbau der ETH Zürich; Abb. 51), mit eingebauter Zugwaage bringt ab 1976 einige Erleichterungen beim Messen der relativen Distanzänderungen. Eine weitere Entwicklung ist das Distinvar vom CERN (Abb. 52) mit einer Genauigkeit von 0.02 mm bei Messdistanzen bis 50 m. Dieses spannt den Draht automatisch und zeigt die Distanzänderung digital an. Die Längenstabilität der einzelnen Bänder oder Drähte wird durch Messen der Polygonseiten mit mehreren Bändern bzw. Drähten sowie mit Referenzmessungen überprüft.



Abb. 51: Distometer ISETH (Kern / ETH Zürich) (Solexperts AG 2008)



Abb. 52: Distivar von CERN 1984 (Bild von Schneider Ingenieure AG)

Im 19. und anfangs des 20. Jahrhunderts können exakte Distanzen auch mit Hilfe der 2-m Präzisions-Invar-Basislatte oder der 1-m Kohlenfaserstoff-Basislatte über die Funktionen am rechtwinkligen Dreieck mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Die Standardabweichung liegt bei weniger als 1 mm bis 20 m Distanz, bei einer Distanz von 100 m bereits bei 25 mm. Die Standardabweichungen wachsen proportional zum Quadrat der Entfernung.

1973 kommen mit dem Kern Mekometer ME3000 und 1986 mit dem Modell ME5000 elektrooptische Präzisionsdistanzmessgeräte der höchsten Genauigkeitsklasse auf den Markt. Die Standardabweichung beträgt bei beiden Instrumenten  $0.2 \text{ mm} + 0.2 \text{ ppm}$ . Die Software PROMEKO, entwickelt von der TU München und von verschiedenen Institutionen weiterentwickelt, steuert das ME5000 und erlaubt raschere Messungen von Distanzen ab 7 Meter bis 5 Kilometer. Die Messzeit für eine Distanzmessung dauert ein bis zwei Minuten.



Abb. 53: Kern ME3000 (1973), Staumauer «Mauvoisin» (Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG)



Abb. 54: Kern Mekometer ME5000 (1994) mit Psion, Staumauer «Mauvoisin» (Pöryr Schweiz AG)



Abb. 55: Reflektor Kern ME5000 mit Funkgerät und Hygro-/Thermo-/Barometer auf der Staumauer «In den Schlagen», Sihlsee (swisstopo 2014)



Abb. 56: Kern Kleinreflektor in Kappenbolzen auf der Staumauer «In den Schlagen», Sihlsee (swisstopo 2014)

Für genaue Distanzmessungen sind Einflüsse, die zu systematischen Abweichungen führen können, zu vermeiden bzw. durch zusätzliche Messwerte zu erfassen und anlässlich der Auswertung zu kompensieren. Nebst der sorgfältigen Bestimmung der Instrumentenparameter wie Additionskorrektion und Massstab ist vor allem über längere Distanzen (einige hundert Meter und mehr) die Erfassung der atmosphärischen Bedingungen mittels repräsentativer Meteo-Parameter entlang der Messstrecke wichtig. Üblicherweise werden der Luftdruck sowie die Lufttemperatur und -feuchte bzw. die Trocken- und Feuchttemperatur zumindest auf der Station und bei längeren Distanzen auch am Zielpunkt gemessen. Die in der Praxis eingesetzten Messgeräte (Barometer, Thermometer, Hygro- und Psychrometer) sind sehr vielfältig und unterliegen ebenfalls einer ständigen Entwicklung.

Die elektrooptische Distanzmessung revolutionierte die Vermessung auf allen Stufen. Die Kombination von Winkel- und Distanzmessung eröffnete neue Konzepte und Einsatzmöglichkeiten der geodätischen Netze (Triangulation, reine Distanznetze / Trilateration).

### 3.5 Elektronische Theodolite und Totalstationen

Die Instrumentenentwicklung ging rasant weiter. Anfangs der 1970er Jahre kamen Instrumente mit aufgesetzten, später mit eingebauten Distanzmessern auf den Markt. Der Einzug der Elektronik ermöglichte den Instrumentenbauern neue Entwicklungen in ihre Geräte einzubauen. Beispiele sind: Elektronische Teilkreisablesung an mehreren Stellen, automatische Horizontierung, automatische Berücksichtigung der Stehachsschiefe, Registrierung der Messdaten auf internen oder externen Datenträgern, automatische Zielerfassung der Prismen (ATR), Motorisierung der Vermessungsinstrumente und teilweise der Prismen.



Abb. 57: Elektronischer Theodolit Kern E2 (1984-1988)



Abb. 58: Wild T3000 mit DI3000 (1995), «Atatürk» Staudamm, Türkei (Pöry Schweiz AG)



Abb. 59: Wild T3000, elektronischer Präzisions-Theodolit mit panfokalem Hochleistungs-Fernrohr, Staumauer «In den Schlägen» (Sihlsee) (swisstopo 2004)

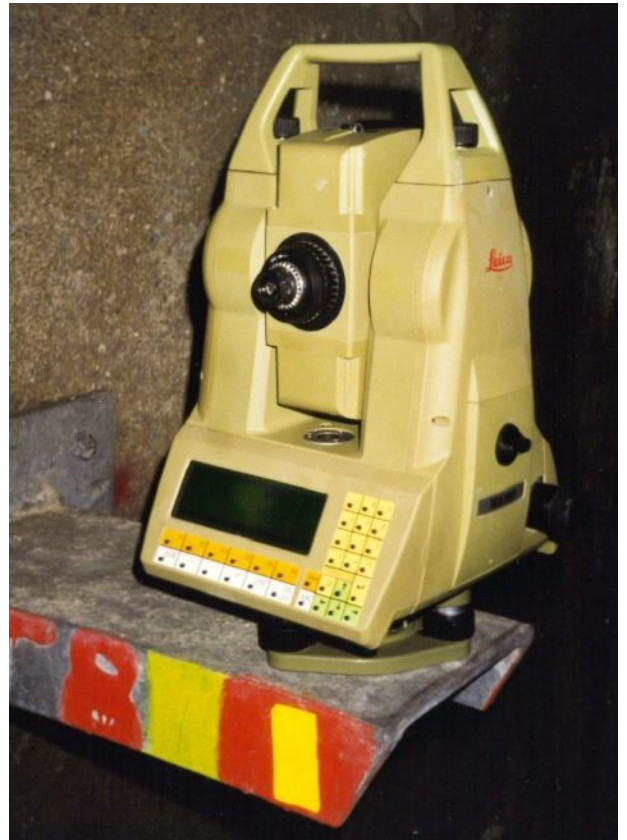


Abb. 60: Leica TCA 2003 auf Konsole für Polygonzüge in den Galerien des «Atatürk» Staudamms, Türkei (Pöry Schweiz AG)



Abb. 61/62: Totalstation Leica TDA5005 (links) und Leica Reflektor mit Zieltafel (rechts, anlässlich des Baus) auf Vermessungspfählen bzw. Steckbolzen der Staumauer «Deriner», Türkei (Pöry Schweiz AG)



Abb. 63/64: Totalstation Leica TDA5005 (links) und Leica Präzisionsreflektor (rechts) je auf doppelwandigen Vermessungspfählen auf Balkonen der Staumauer «Deriner», Türkei (Pöry Schweiz AG)



Abb. 65: Leica Nova TS60 (2020) «Muttsee» (Axpo Power AG)



Abb. 66: Leica Präzisionsreflektor auf Steckbolzen

Anfänglich schrieb ein Sekretär die Messwerte in Formulare ein und er bedurfte an Intelligenz und Schnelligkeit zur Kontrolle der Messwerte auf Richtigkeit und zur Berechnung der Satzmittelwerte. Ab Ende der 1970er Jahre kamen abgesetzte Speichergeräte zur Datenregistrierung zum Einsatz. Die Messdaten (Richtungen, Höhenwinkel, Distanzen sowie Messdatum und -zeit, aktuelle Instrumentenkorrekturwerte, Meteo-Parameter usw.) wurden während der Feldmessung in Satzmessungsprogrammen erfasst. Diese konnten die Messwerte beim Instrument (Totalstation oder ME 5000) «auf Knopfdruck» abrufen und dem Operateur die Ablage vom Sollzielpunkt bzw. die Residuen und Genauigkeit anzeigen (z.B. Satzmittel und empirische Standardabweichung einer Einzelmessung sowie des Mittelwertes). Die im Feld registrierten Messwerte und Zusatzinformationen (wie Messgerätekenung, Stations- und Zielpunktwerte sowie Instrumenten- und Zielmarken-/Reflektorhöhen usw.) wurden im Büro nach einem Datenaufbereitungsschritt in die Ausgleichsprogramme überspielt. Als Feldprogramme kamen sowohl Standardsoftware der Gerätehersteller wie auch «hauseigene» Spezialentwicklungen von swisstopo bzw. der Vermessungsfirmen zum Einsatz. Ebenso breit war die Palette der verwendeten Typen der Registriergeräte und Feld-PCs, beispielsweise Epson HX-20, Wild GRE 3, GRE 4 und GPC1, Psion Organiser und Psion Teklogix Workabout, Husky Hunter, Juniper Systems Allegro/CX, Panasonic Toughbook CF-18, Trimble TSC usw.



Abb. 67: Datenterminal Wild GRE3 mit Magnetblasenspeicher (1983) (Leica Geosystems AG)



Abb. 68: Wild T3000 mit Wild GPC1 und Funkgerät im Netz «In den Schlägen» (Sihlsee) (swisstopo 2004)





Abb. 69: Leica TDA5005 mit PSION Teklogix Workabout Pro, Feld Hygro-/Thermo-/Barometer Greisinger GFTB 200 (links) und Funkgerät im Netz «Piora» (Ritomsee) (swisstopo 2014)



Abb. 70: Panasonic CF-18 mit Satz- und Distanzmessprogramm im Netz der Staumauer «Deriner», Türkei (Pöry Schweiz AG 2013)



Abb. 71: Kern Mekometer ME5000 mit PSION Organizer II (Pöry Schweiz AG)



Abb. 72: Kern Mekometer ME5000 mit Allegro CX von Juniper Systems sowie Funkgerät und Feld Hygro-/Thermo-/Barometer Greisinger GFTB 200 (rechts hinten) im Netz «In den Schlägen» (Sihlsee) (swisstopo 2014)

Ab Beginn der 2000er Jahre enthielt die geräteinterne Software der Totalstationen Programmmodule für Satzmessungen mit Steuerungs-, Registrier- und Kontrollfähigkeiten. Mit den heutigen Tachymetern und Totalstationen können bei der Stationsinitialisierung auf den Messpeilern die Zusatzinformationen eingegeben und die Zielpunkte «angelernt» bzw. vordefiniert werden. In den Satz- und Distanzmessungen werden die vorprogrammierten Zielpunkte dann automatisch angesteuert und die Messwerte insbesondere auf Zielmarken mit Reflektoren in kurzer Zeit erhoben. Die Messungen können so schneller durchgeführt werden und sie lassen sich vor Ort auf ihre Vollständigkeit und interne Genauigkeit

überprüfen. Messungen in der Nacht, bei optimalen atmosphärischen Bedingungen, sind bei Verwendung von Prismen ohne weiteres möglich.

Am IGP der ETHZ wurde das bildbasierte Theodolitsystem QDaedalus zur automatisierten Messung klassischer (nicht kooperierender) Zielmarken und Messbolzen weiterentwickelt. Für die optische Zielerkennung wurde eine Leica MS50 Totalstation mit einer CCD-Kamera ausgestattet (Abb. 73) und deren Bilder auf einem Tablet PC online mit einem automatischen Zielerkennungs-Algorithmus erfasst und ausgewertet. Anlässlich eines im Jahr 2015 gemeinsam mit swisstopo an der Staumauer «Montsalvens» durchgeführten Feldversuchs zeigten die automatischen QDaedalus-Messungen gegenüber den mit einer Leica TS30 «von Auge erfassten» halbautomatischen Satzmessungen (Abb. 74) sowohl eine leichte Genauigkeitssteigerung als auch einen Zeitgewinn (Guillaume et al. 2012, 2016).



Abb. 73: Leica MS50 mit QDaedalus (2015) auf einem Pfeiler im Netz der Staumauer «Montsalvens» (swisstopo/ETHZ)

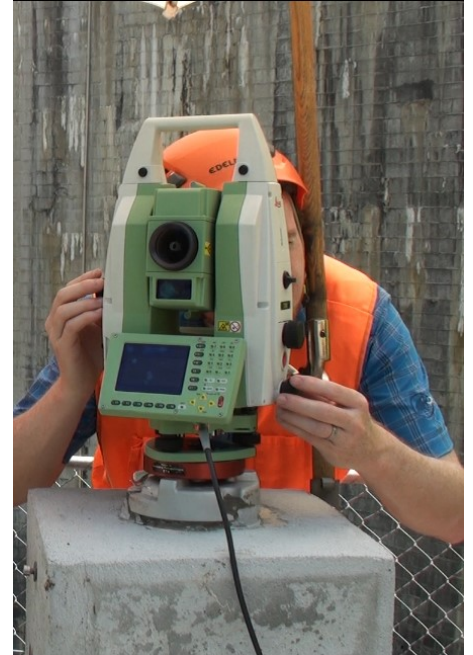


Abb. 74: Vergleichsmessung mit Leica TS30 (2015) im Netz «Montsalvens» (swisstopo)

### 3.6 Globale Navigationssatellitensysteme GNSS

Seit Mitte der 1980er Jahre werden in der Schweiz geodätische GPS-Messungen (*Global Positioning System*) durchgeführt. Ursprünglich wurden sie von swisstopo vor allem beim Aufbau der neuen Landesvermessung LV95 sowie in oberirdischen Grundlagennetzen für die Absteckung langer Tunnel eingesetzt. Anlässlich von Erweiterungen der Überwachungsnetze der Staumauern «In den Schlagen» (Sihlsee, Etzelwerk AG; vgl. Abb. 27) und «Schiffenen» (Freiburger Kraftwerke – EEF, heute Groupe E) hat swisstopo die satellitengestützte Messmethode 1989 erstmals in der Schweiz auch für die Überwachung von Stauanlagen eingeführt. In den 1990er Jahren wurden noch viele weitere Messnetze in gleicher Art erweitert. Dabei wurden die bisherigen terrestrischen Messungen nicht ersetzt, sondern durch GPS-Messungen ergänzt. Denn meist ist dabei eine Kombination der modernen geodätischen Messmittel angezeigt («hybride 3D-Netze»), bei der die Vorteile der jeweiligen Methoden optimal ausgenutzt werden.

Weil mit GPS bzw. GNSS (*Global Navigation Satellite Systems* als Überbegriff beim Einsatz verschiedener Navigationssatellitensysteme wie GPS, GLONASS, GALILEO oder BEIDOU) keine direkten Sichtverbindungen zwischen den zu vermessenden Punkten notwendig sind, bieten sie eine elegante Methode, um ausserhalb der Deformationszone versicherte, geologisch stabile Referenzpunkte in die Kontrollnetze einzubeziehen und die Langzeitverschiebungen im Gebiet der Staumauer in einem dreidimensionalen Referenzrahmen zu überwachen. Als weitere Vorteile von GNSS sind die weitgehende

Unabhängigkeit von Tages- und Jahreszeit sowie vom Wetter zu erwähnen. Damit sind GNSS-Messungen geeignet, in Ausnahmesituationen auch bei Bedingungen, die für terrestrische Messungen ungünstig sind, rasch minimale Kontrollmessungen durchführen zu können.

Trotzdem haben die Standorte minimalen Anforderungen seitens GNSS zu genügen. Um hohe Genauigkeiten zu erreichen, ist darauf zu achten, dass der Horizont frei ist, damit weder durch lokale Objekte (Gebäude, Bäume) noch topographische Hindernisse Satelliten abgeschattet werden und auf allen Stationen möglichst die gleiche Satellitenkonstellation verfügbar ist. Da die Wellenausbreitung im Frequenzbereich von GNSS mit derjenigen des Lichtes vergleichbar ist, können auch Bäume die GNSS-Signale teilweise oder ganz abschatten. Deshalb sind GNSS-Messungen in lichten Wäldern zwar möglich, für Präzisionsanwendungen sollten sie aber vermieden werden. Immerhin haben sich die Verhältnisse dank der Verfügbarkeit der vier Satellitensysteme mit praktisch vollständigen Satellitenkonstellationen gegenüber den Anfangszeiten der 1980er und frühen 1990er Jahre stark verbessert, als GPS nur während einigen Stunden pro Tag verfügbar war. Im Weiteren ist die Nähe zu Sendeanlagen zu meiden, da diese die Signale der Navigationssatelliten stören bzw. damit interferieren können. In unmittelbarer Nähe der GNSS-Stationen sollten auch keine für Mikrowellen reflektierenden Flächen (z.B. Blechdächer) sein, welche Mehrwegausbreitungen der Signale verursachen könnten.

All diese Einschränkungen sind jedoch meist weniger restriktiv als die notwendigen Sichtverbindungen bei konventionellen Methoden und bieten bezüglich der Standortwahl eine grössere Freiheit. Da in der Praxis, wie bereits erwähnt, hybride Netze meist die beste Lösung darstellen, ist es vorteilhaft, wenn zu mehreren Punkten des GNSS-Netzes terrestrische Anschlussmessungen möglich sind, damit beide Netzteile kombiniert und der terrestrische Netzteil optimal gelagert werden kann. Distanzmessungen zwischen GNSS-Punkten dienen daneben auch der Masstabsüberwachung im trigonometrischen Netzteil.

GNSS-Messungen sind zudem bestens geeignet für permanente, automatisierte Überwachungen, sei es direkt auf der Staumauer oder auf Kontrollstationen in rutschgefährdeten Geländepartien im Umfeld der Stauanlage oder des Stausees.

Für die epochenweise Bestimmung der Koordinaten von GNSS-Stationen sind statische Messungen von einigen Stunden Messdauer erforderlich, damit die in Staumauerdeformationsnetzen gesuchte hohe Genauigkeit erreicht werden kann. Optimal sind Messungen über 24 Stunden, um die gesamte Satellitenkonstellation ausnützen zu können, oder zumindest während 12 Stunden in der Nacht, wegen der reduzierten Ionosphärenaktivität. Die einzusetzenden geodätischen GNSS-Empfänger sollten kalibrierte Antennen haben, zumindest sollten alle vom gleichen Typ sein, um den Einfluss individueller Variationen der Phasenzentren zu minimieren. Generell muss der Einfluss von systematischen Abweichungen bei der Standortwahl und Installation der Stationen (Antennenmontage und Zentrierung) und bei den Messungen (z.B. atmosphärische Bedingungen) minimiert bzw. bei der Auswertung kompensiert werden. Dies erfordert entsprechend hochwertige Auswertesoftware, welche den Import oder allenfalls das zusätzliche Schätzen vielseitiger physikalischer Modellparameter (z.B. präzise Satellitenuhren und -bahnen, Ionosphären- und Troposphärenparameter oder Modelle und Parameter der erwähnten spezifischen Variationen der Antennen-Phasenzentren) erlaubt. Zudem muss die Software eine mathematisch strenge Gesamtausgleichung aller Messungen von mehreren Stationen, mehreren Satellitensystemen, in mehreren Sessions in einem Guss ermöglichen. Für die Auswertung von GNSS-Messungen höchster Präzision, insbesondere auch beim empfohlenen Einbezug von Anschlussmessungen an Permanentstationen des Automatischen GNSS Netzes der Schweiz AGNES, wird insbesondere die «Bernese GNSS Software» des Astronomischen Instituts der Universität Bern empfohlen. In kleinen Netzen (wenige km Ausdehnung) kann auch die Standard-Software der Herstellerfirmen geodätischer GNSS-Empfänger genügen. Auf jeden Fall ist aber entsprechende fundierte Erfahrung seitens des Operateurs erforderlich. Bei geeigneten Messstandorten, sorgfältigen Messungen und Auswertungen können in lokalen Staumauer-Überwachungsnetzen (bis einige km) relative Genauigkeiten (Standardabweichung) von  $1 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$  in der Lage und etwa das Doppelte in der Höhengenaugigkeit erreicht werden.

Seitens der GNSS-Empfänger und der eingesetzten Auswertesoftware gibt es eine breite Palette auf dem Markt, wobei in die Schweiz die Firmen Leica Geosystems AG und Trimble (allnav ag) dominieren.



Abb. 75: GPS-Antenne Trimble 4000SSi  
Staumauer «Emosson» (swisstopo 1996)



Abb. 76: GPS-Antenne Trimble 5700/Zephyr  
Staumauer «Châtelot» (swisstopo 2008)

### 3.7 Geomonitoring

Ein eindrückliches geodätisches Monitoringprojekt im Rahmen der neuen Alpentransversalen war das Ausschreibungslos 349 der AlpTransit Gotthard AG (ATG). Auslöser waren die im Kapitel 2.3.1 dargestellten Geländesenkungen und Rissbildungen in der Staumauer von «Zeuzier» als Folge des Baus des Rawil-Sondierstollens sowie die Setzungen von Fixpunkten des Landesnivellements auf dem Gotthardpass zufolge des Baus des darunterliegenden Strassentunnels.

Das «Los 349» bezweckte die grossräumige und ganzjährige laufende Überwachung der Umgebung von Stauanlagen über dem Gotthard-Basistunnel (GBT) (vgl. Abb. 77) in der Zeit von September 2000 bis Frühling 2016 mittels:

- räumlicher Deformationsmessungen bei den drei Staumauern «Nalps», «Santa Maria» und «Curnera» und in drei weiteren Talquerschnitten
- jährlichen Präzisionsnivellements im Umfang von 95 km entlang von Strassen und in Kraftwerkstollen
- räumlichen Deformationsmessungen mittels 10 GNSS-Stationen.

In Absprache zwischen der ATG und dem BFE wurde das «Los 349» als «Überwachungsstufe<sup>1</sup> 3» bezeichnet.

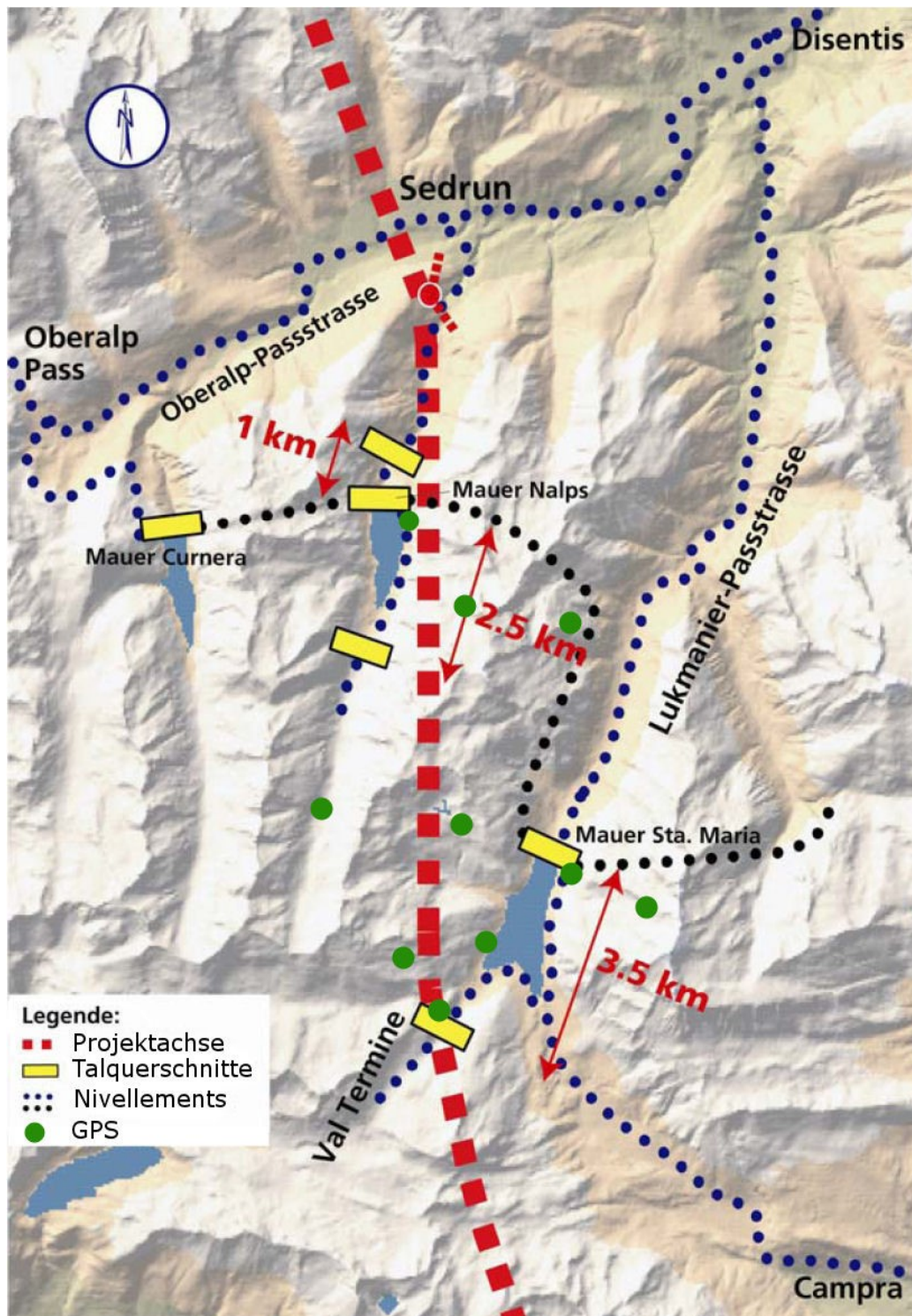


Abb. 77: Überwachungsperimeter und Messmethoden im «ATG Los 349» (© BSF Swissphoto)

Zahlreiche Publikationen und Berichte an Ingenieurvermessungskongressen und auch in der Fachzeitschrift «Geomatik Schweiz» diskutierten das Vorgehen und die Erkenntnisse, z.B. (Salvini; Studer 2010) oder (Studer et al. 2014). Unter Einbezug aller Messresultate wurden die Setzungen über dem GBT modelliert und eine Setzungsmulde mit einer Süd-Nord-Ausdehnung von ca. 15 km und einer West-Ost-Ausdehnung von ca. 7 km mit einer maximalen Setzung von ca. 10 cm am südlichen Ende des Stausees Nalps festgestellt. Das Tal verengte sich bei der Staumauer «Nalps» um 13 mm und die Staumauer ist mit ihrer gesamten Felsumgebung 4 cm abgesunken (Ryf 2020). Für weitere Details sei auch auf die (nicht öffentlichen) Jahresberichte der ATG-Arbeitsgemeinschaft Los 349 verwiesen.

Ende 2013 zeigte sich die interpolierte Setzungsmulde in Abb. 78:

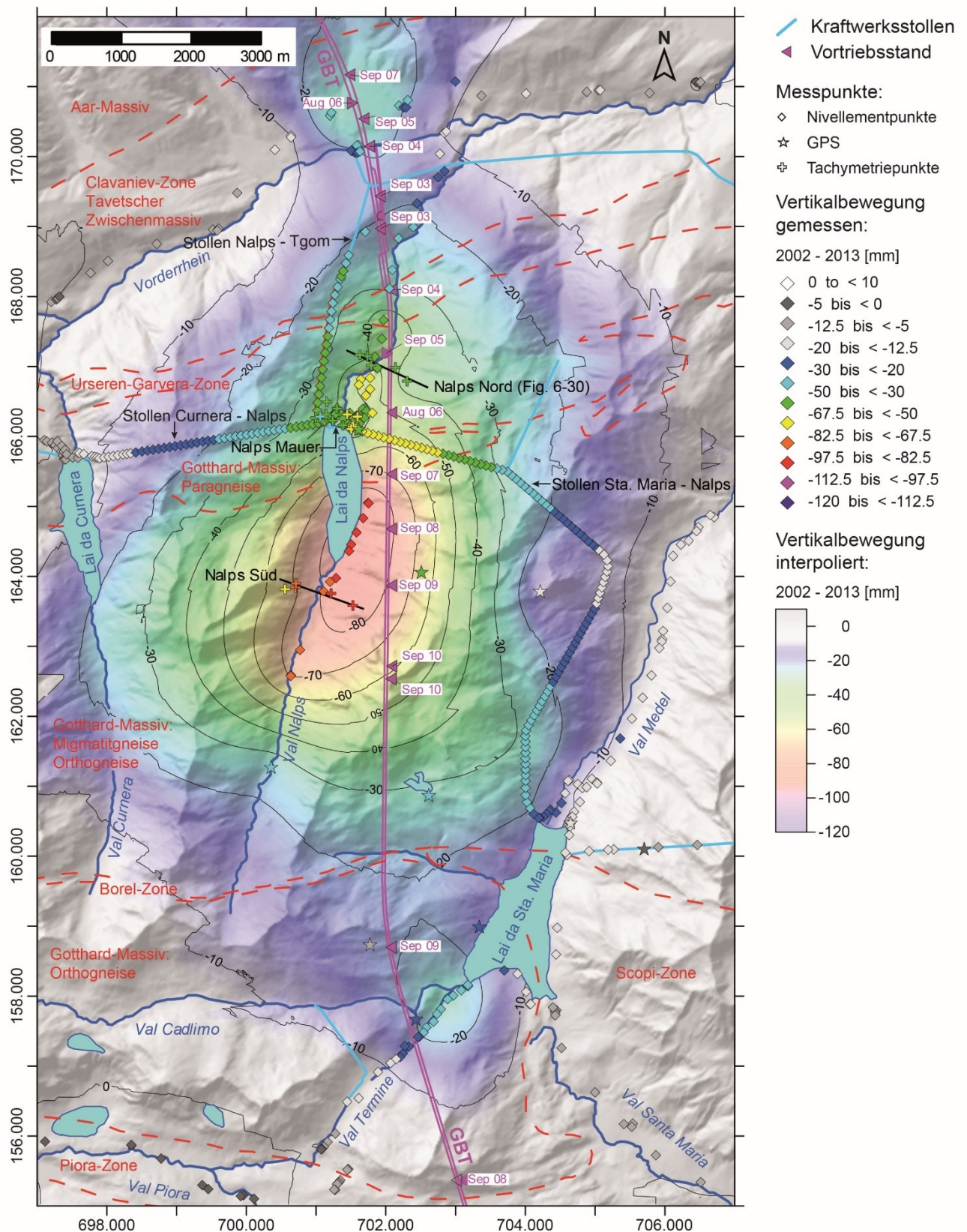


Abb. 78: Setzungen 2002–2013 gemessen mit Präzisionsnivellements, GPS und Tachymetrie gemäss Abb. 77 im Bereich der Stauanlagen der Kraftwerke Vorderrhein AG (KVR) während des Baus des Gotthard-Basistunnels (Bild aus internem Expertenbericht der ATG-Fachkommission «Vortriebe und Stauhaltungen»; publiziert in: Berichte der Landesgeologie, Nr. 7, 2016; © ATG, swisstopo)

(Lombardi et al. 2016) schreiben zur Genauigkeit des automatischen Messnetzes Los 349: «Mit den beliebig oft und automatisch gemessenen Vektoren konnten – mit einer Toleranz von  $\pm 4$  mm – mehrere Distanzänderungen quer und längs zum Tal, sowie, etwas weniger genau, verschiedene Höhenunterschiede bestimmt werden.»

Unabhängig von der ATG-Fachkommission «Vortriebe und Stauhaltungen» befasste sich 1992 bis 2016 eine Expertengruppe im Auftrag des Bundesamtes für Energie mit der Sicherheit der Talsperren «Curnera», «Nalps» und «Sta. Maria». Sie verfolgte unter anderem das Ziel: «Vor und während des Baus sollen die obengenannten Stauanlagen so überwacht werden, dass eine allfällige Auswirkung des Untertagebaus rasch erkannt werden kann. Mit dieser ausserordentlichen Überwachung ist so frühzeitig zu beginnen, dass alle notwendigen Daten für die Beurteilung und Beweissicherung zur Verfügung stehen.» Die bestehende Messanlage für die ordentliche Überwachung der Staumauern der KVR (Überwachungsstufe<sup>1</sup> 1) wurde als Grundlage für eine erweiterte Messanlage (Überwachungsstufe<sup>1</sup> 2) verwendet, bei der zusätzliche Pfeiler, Fest- und Kontrollpunkte installiert und die Nivellementszüge verlängert wurden. Um allfällige Änderungen im Verhalten der Staumauern festzustellen, die im Zusammenhang mit dem Bau des Gotthard-Basistunnels standen, wurden höchstpräzise Messungen von Distanz- und Höhenänderungen in ausgewählten Talquerschnitten an und um die Staumauern erhoben und das mögliche Verhalten der drei Staumauern statisch nachberechnet.

(Lombardi et al. 2016) berichten über Ablauf und Erkenntnisse der bautechnischen Untersuchungen und über die Messergebnisse der geodätisch erweiterten Messanlage (Überwachungsstufe<sup>1</sup> 2). Dieser Bericht stellt fest:

- «Eine direkte Koordination der Überwachungsstufe 3 mit den Überwachungsstufen 1 und 2 war zwar geplant, fand aber nicht statt. Dies erschwert den Vergleich der Messergebnisse. Es lässt sich aber festhalten, dass die Resultate der Überwachungsstufe 3 die Ergebnisse der Überwachungsstufen 1 und 2 bestätigen.»
- Die erreichte Genauigkeit (dreifache Standardabweichung) der Punkte betrug im frei gelagerten, Helmert-aufgefelderten (teilsurminimierten) Netz 1 mm (Lage) bzw. 3 mm (Höhe); bei Distanzänderungen zwischen zwei Epochen lag sie zwischen 0.6 mm und 2.5 mm. Für die individuellen Werte jeder Talsperre sei auf den (nicht öffentlich zugänglichen) Bericht verwiesen.

### Lagerung von Talsperrennetzen

Die Einbindung von geodätischen Talsperren Überwachungsnetzen in den dynamischen Referenzrahmen CHTRF der schweizerischen Landesvermessung ermöglicht eine sehr langfristige, überregionale Lagerung und Kontrolle, d.h. über mehrere Dekaden. Dazu müssen langstatische GNSS Sessions auf Fix- oder Lagerungspunkten der Talsperrennetze im Verbund mit den umliegenden Stationen des Automatischen GNSS Netzes der Schweiz AGNES gemessen und ausgewertet werden. Weitere Anforderungen nennt Kapitel 3.6.

### 3.8 Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Die Auswertung der Messdaten mit Hilfe von Rechenschiebern, Logarithmen-Tabellen und mechanischen Rechenmaschinen war sehr zeitaufwändig. Deshalb versuchte man in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Deformationsnetze noch möglichst einfach zu halten. Die Verschiebungen wurden durch Differenzenauswertung der Messungen errechnet oder auch halbgrafisch ermittelt. Musste der Netzplan der Messanlage geändert oder ergänzt werden (z.B. partielle Zerstörung von Beobachtungspfeilern oder Rückversicherungspunkten), ging meistens auch der Bezug zur Nullmessung verloren. Zuverlässige Aussagen zu Verschiebungen waren dann nicht mehr möglich.

Eine Deformationsmessung und die Auswertung sollten die folgenden Ziele erfüllen:

- Stabilitätskontrolle der Referenzpunkte in Lage und Höhe (stabiler Bezugsrahmen)
- Bestimmung der Lage und Höhe pro Epoche von dauerhaft markierten Kontrollpunkten und Objektpunkten am Bauwerk mit möglichst gleichen oder vergleichbaren Messmethoden und Instrumenten und mit gleichzeitiger Beobachtung weiterer Messeinrichtungen sowie der Umgebungsbedingungen
- Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen über lange Zeiträume: mehrere Jahrzehnte
- Berechnung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Resultate

- Verständliche Darstellung der Resultate
- Für vertiefte Angaben und Empfehlungen siehe (Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 2013).

Die Informatik hielt ab den 1960er Jahren im Vermessungswesen Einzug und übernahm den grossen Rechenaufwand (Aeschlimann 1971). Die Entwicklung der Methoden und Modelle sowie die Herleitung der Genauigkeitsmasse sind von Carosio und Dupraz in (STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung 1993, S. 216–225) detailliert beschrieben; weitere Herausforderungen dokumentiert (Carosio 1990). Die Messwerte werden nach der Methode der kleinsten Quadrate (Carl Friedrich Gauss 1795) ausgeglichen und die Punktkoordinaten berechnet. Aus der grossen Überbestimmung der Messwerte im Überwachungsnetz werden signifikante Messfehler detektiert. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Koordinaten wird gesteigert und kann dank verfeinerter statistischer Modelle nachgewiesen werden.

In der Schweiz verwendete Netzausgleichsprogramme waren bzw. sind (in alphabetischer Reihenfolge):

- GEOTRI (G. Appius)
- Helmert/77 bzw. Helmert/99 (Keller 1979 bzw. Schneider Ingenieure AG)
- LTOP/GeoSuite (swisstopo) (Kistler; Ray; Marti 2014)
- Neptan (C-Plan AG)
- RAUMTRI (ETHZ/swisstopo)
- rmNETZ (rmDATA)
- Trinet / Trinet+ (FHNW / HEIG-VD).

### 3.9 Dokumentation und Darstellung der Deformationen

Zu jeder geodätischen Messkampagne wird jeweils rechtzeitig vor der sog. Fünfjahreskontrolle ein technischer Bericht (Geodäsie-Bericht) zuhanden des Betreibers der Stauanlage erstellt, der von den Experten (Bauingenieur und Geologe) zur vertieften Sicherheitsüberprüfung (Expertise) und zur Erstellung des Fünfjahresberichtes benötigt wird (Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen, Teil D: Inbetriebnahme und Betrieb, Kapitel 4.4.4.). Dieser Bericht gibt Auskunft über die geodätische Messanlage und deren Zustand, die durchgeführten Messungen und deren Genauigkeiten sowie die Resultate, insbesondere die berechneten Deformationen bzw. Verschiebungen.

Die Geodäsie-Berichte sind in der Regel nicht öffentlich. Im Literaturverzeichnis zu diesem Bericht (Kapitel 6) und in der umfassenden Bibliographie sind diese Berichte daher nicht aufgeführt.

Die Verformungen der Kontrollpunkte der Mauer wurden einerseits als Verformungsprofile oder als Deformationsbilder über die Zeit von Hand aufgezeichnet (Abb. 79). Die (kleinen) Verschiebungen der Beobachtungspfeiler von Epoche zu Epoche wurden, falls relevant, als Linienzüge dokumentiert (vgl. Abb. 5).



### Pfaffensprung Deformationen quer zur Mauer

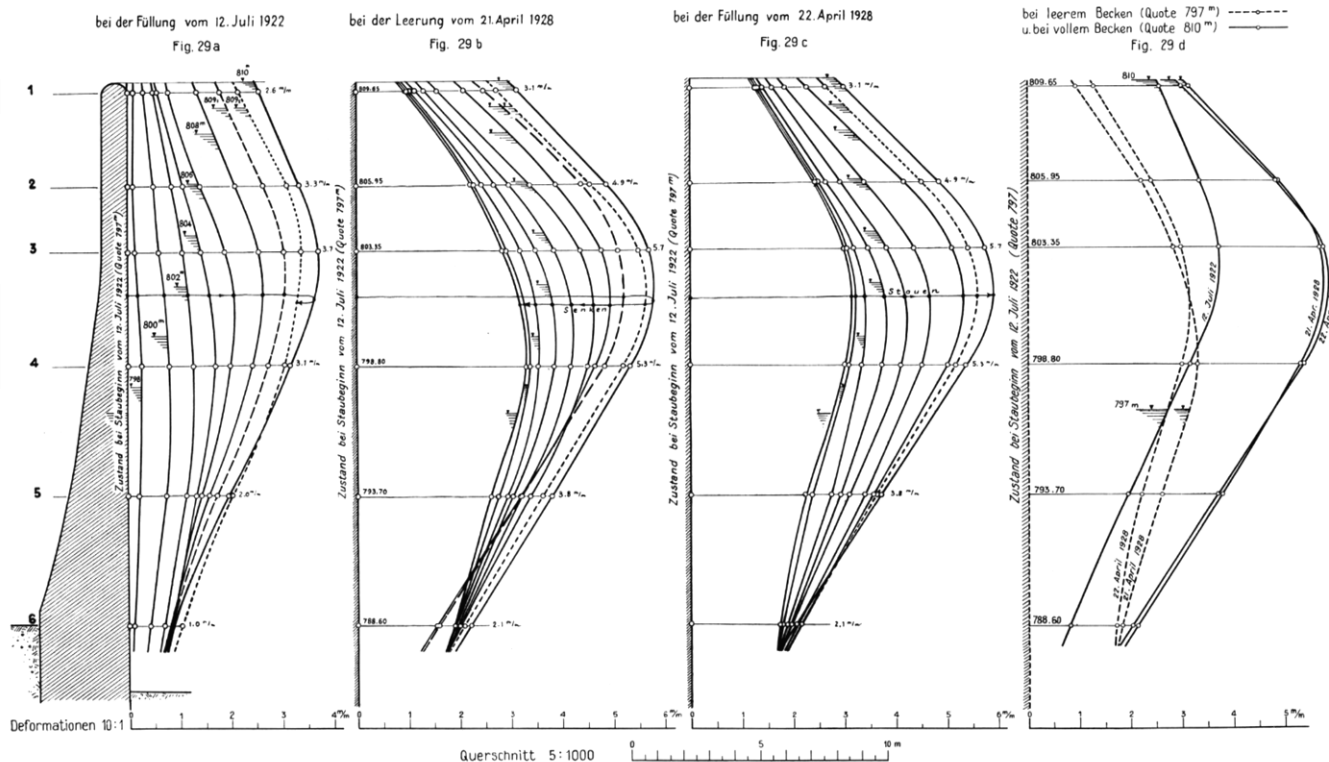


Abb. 79: Deformationslinien quer zur Mauer der Staumauer «Pfaffensprung» (Lang 1929)

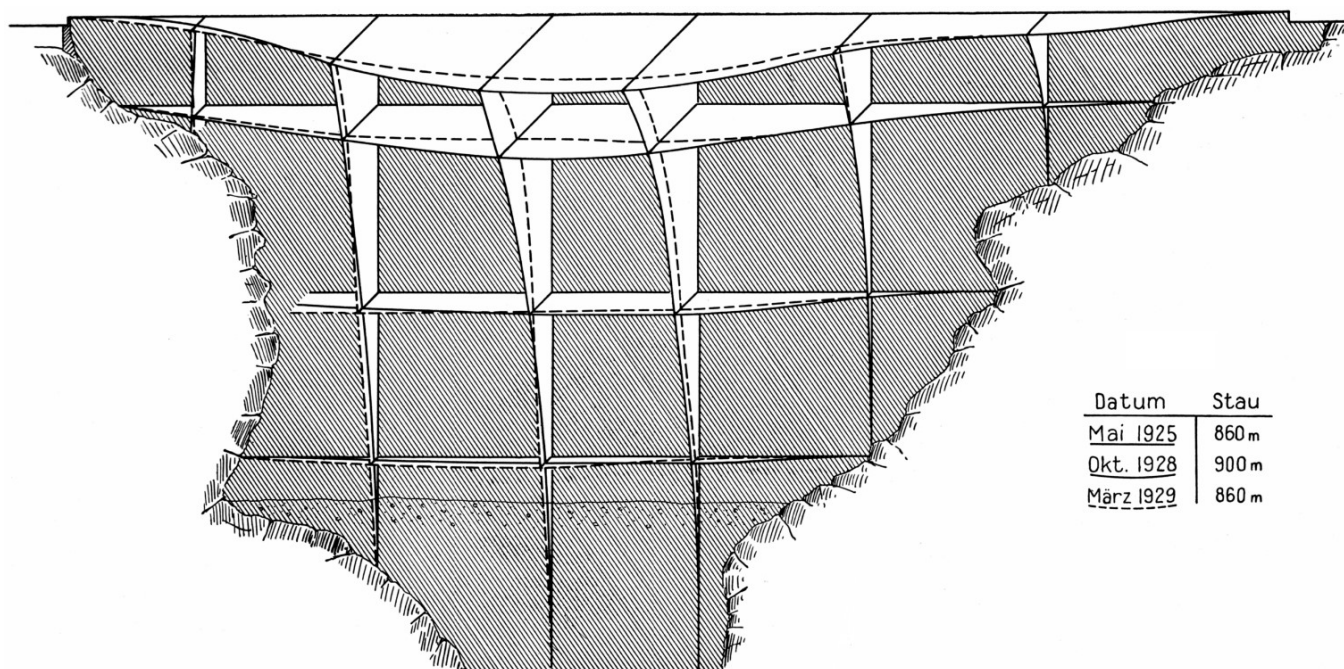


Abb. 80: Axonometrisches Verformungsbild der Staumauer «Schräh» durch den ersten Aufstau; Annahme einer vertikalen Mauerebene beim Staubeginn Mai 1925 (Lang 1929)

Die heutigen Auswertungsprogramme erstellen direkt aus den Koordinaten der verschiedenen Mess-epochen die Verschiebungspläne mit den Lage- und Höhenänderungen (2D+H oder 3D) der Mess-anlagen.

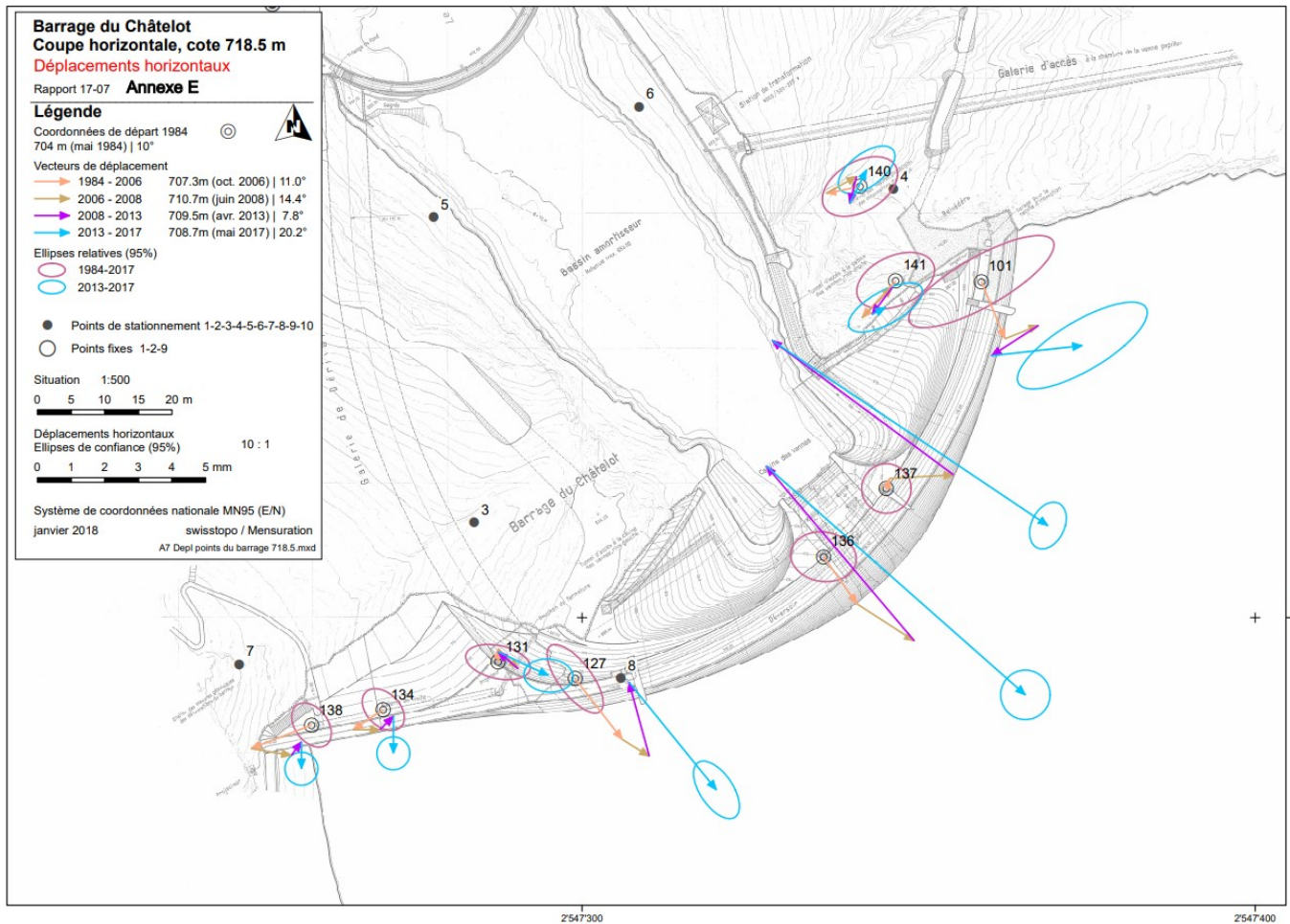


Abb. 81: Lageverschiebungen (horizontale Koordinatendifferenzen) mit relativen Fehlerellipsen (95%) aus einer Multi-Epochen-Ausgleichung der Staumauer «Châtelot» (Grafik swisstopo 2018)

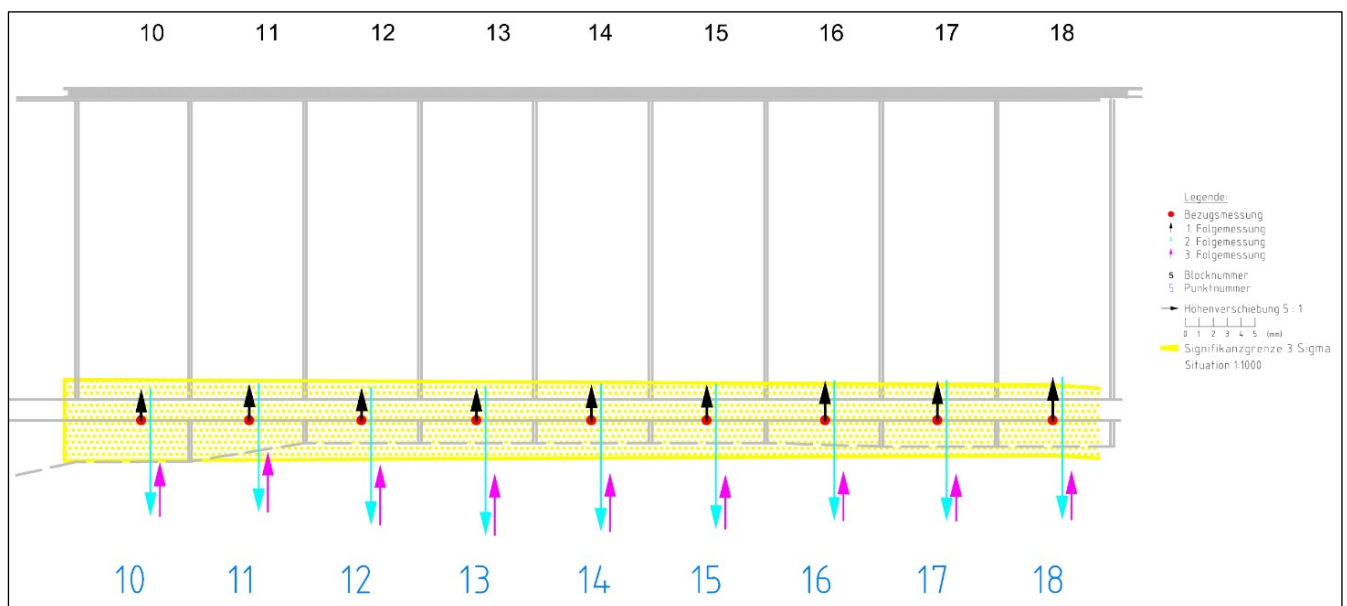


Abb. 82: Darstellung der Höhenänderungen in einem Kontrollgang, automatisch generiert aus der Datenbank der Auswertesoftware (Grafik Axpo Power AG)

## 4 Moderne Methoden und Ausblick

Die bisher beschriebenen, klassischen Methoden erhoben diskrete Einzelpunkte periodisch und verglichen sie jeweils mit den früheren Punktbestimmungen. Differenzielle und unregelmässige Bewegungen im Raum zwischen den vermessenen Punkten konnten nicht ermittelt werden, sie wurden wo nötig interpoliert.

Beim Messinstrumentarium ergeben sich heute und künftig neue Möglichkeiten, auch flächenhafte Deformationen praktisch zeitkontinuierlich zu erfassen. Punktberechnungen werden zunehmend als Multi-Epochen-Ausgleichungen angesetzt. Moderne Auswerteprogramme prüfen auch die Kongruenz der Messepochen und ihrer Lagerung; sie weisen relative Genauigkeiten und signifikante Verschiebungen zwischen den Epochen aus.

Die folgenden Methoden aus jüngster Zeit werden heute und in naher Zukunft weiter intensiv erforscht und weiterentwickelt. Sie werden bei der Überwachung von Talsperren und ihrer Umgebung zunehmend angewandt werden.

An internationalen Symposien wird jeweils über neuste Entwicklungen und Versuche berichtet oder gar eine spezielle Session zu «Dam Monitoring» veranstaltet: Ingenieurvermessungskurse IVK, FIG Workshops und weitere (Milev et al. 2016; Gikas 2019).

### 4.1 Geomonitoring

Bei dauerhaften Überwachungen mit hohen Präzisionsanforderungen und zeitlich dichteren Abtastraten werden zunehmend geodätische Monitoringsysteme eingesetzt, wie in Kapitel 3.7 am Beispiel ATG beschrieben. Sie können objektgerecht und fallweise aus mehreren, verschiedenartigen Sensoren und künftig auch aus mehreren Sensor-Clustern zusammengesetzt sein. Die Sensoren sind Totalstationen, GNSS-Empfänger, Temperatur- und Druckfühler, Neigungsmesser, CCD-Sensoren, inertielle Messeinheiten (IMU), Extensometer usw. Steuerungs-, Auswerte-, Analyse- und Alarmierungssoftwares sind im Monitoringsystem integriert. Resultate werden zeitnah digital versandt oder zur Einsicht mittels Web Browser bereitgestellt; in kritischen Momenten werden Alarme und Fehlermeldungen übermittelt. Solche Systeme werden bei erhöhter Gefährdung auch bei Talsperren oder in ihrem Umfeld vermehrt eingerichtet werden.

### 4.2 Faseroptische Messsysteme FOS

Bei Bauwerken werden heute oft optische Fasern eingebaut, in denen eine regelmässige Struktur brechzahlveränderter Bereiche (Gitterebenen) eingebracht sind. Sie werden *Faser-Bragg-Gitter* (FBG)-Sensoren genannt. Diese Sensoren sind mit dem Bauwerk fest verbunden. Die Verformungen der Bauwerke werden dann aus den Längenänderungen der Fasern zwischen den FBG-Sensoren ermittelt. (Habel; Brunner 2011) geben einen Überblick über die FOS im Monitoring und (Lienhart; Woschitz; Klug 2014) erläutern eine Anwendung in der Staumauer «Kops» der Vorarlberger Illwerke AG. Die Präzision der Deformationsbestimmungen liegt im Bereich von 0.001 mm.

In der Schweiz baute Smartec SA bei der Erhöhung der Staumauer «Luzzone» 1997 erstmals FOS ein. Ein weiterer Versuch erfolgte 1997-2000 in der Staumauer «Emosson».

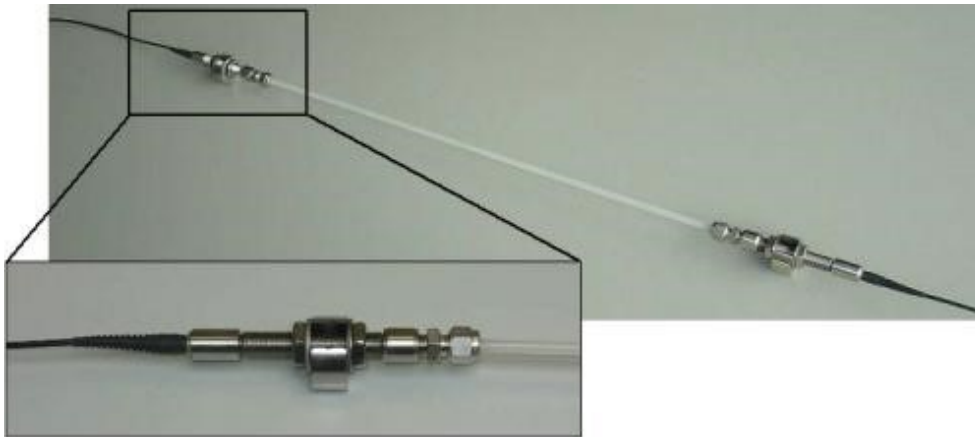


Abb. 83: Glasfaser mit FBG-Sensoren (ZSE Electronic GmbH, Zugriff 15.7.2020)

### 4.3 Terrestrisches Laserscanning TLS

Seit der Jahrtausendwende wird TLS operationell zunehmend eingesetzt. Die Punkte einer Oberfläche werden in einem frei definierbaren geometrischen Raster dreidimensional und berührungslos gemessen (Horizontal- und Vertikalrichtung, Schrägdistanz, Intensität, evtl. RGB-Farbwert). Die rasche Messung hoher Punktmengen (bis zu 1 Mio. Punkte/s) ist in der Präzision (Leica P50: 1.2 – 3.0 mm + 10 ppm, je nach Messdistanz) tiefer als die herkömmliche, hoch redundante aber zeitaufwändige Mehrpunktbestimmung. Systematische Abweichungen und Fehlmessungen müssen unter Kontrolle gehalten werden (Zogg 2007). Eine Herausforderung ist die Registrierung (d.h. Georeferenzierung) und Modellbildung der gemessenen Punktwolken von Talsperren. (Eling 2009) versteht unter Modellbildung das Extrahieren der Talsperrenpunkte aus der gemessenen Punktwolke, die Ermittlung und Schätzung ihrer einzelnen Oberflächenformen als mathematisch beschreibbare Fläche und die Blockbildung dieser Flächen. Bei zeitlich unabhängigen Modellen zweier Messepochen ist die Berechnung diskreter Verschiebungsvektoren ebenfalls nicht trivial: (Holst et al. 2017) und (Wieser et al. 2020) beschreiben, wie ein Modell-zu-Modell Vergleich («*Mesh-to-Mesh*») heute mit Standardsoftware ausgeführt werden kann. (Barras; Delley; Chapotte 2014) untersuchten die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Scannertechnologien und gerätespezifischer Georeferenzierungsmethoden.

Die TLS Methode ist seit 2000 Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. (Wunderlich 2020) und die darin zitierten Quellen berichten darüber. TLS wird künftig vermehrt, aber wohl noch für längere Zeit ergänzend zu den klassischen Methoden (Triangulation, Trilateration, GNSS, Präzisionsnivellement, Lotung, Extensometer usw.) eingesetzt werden.

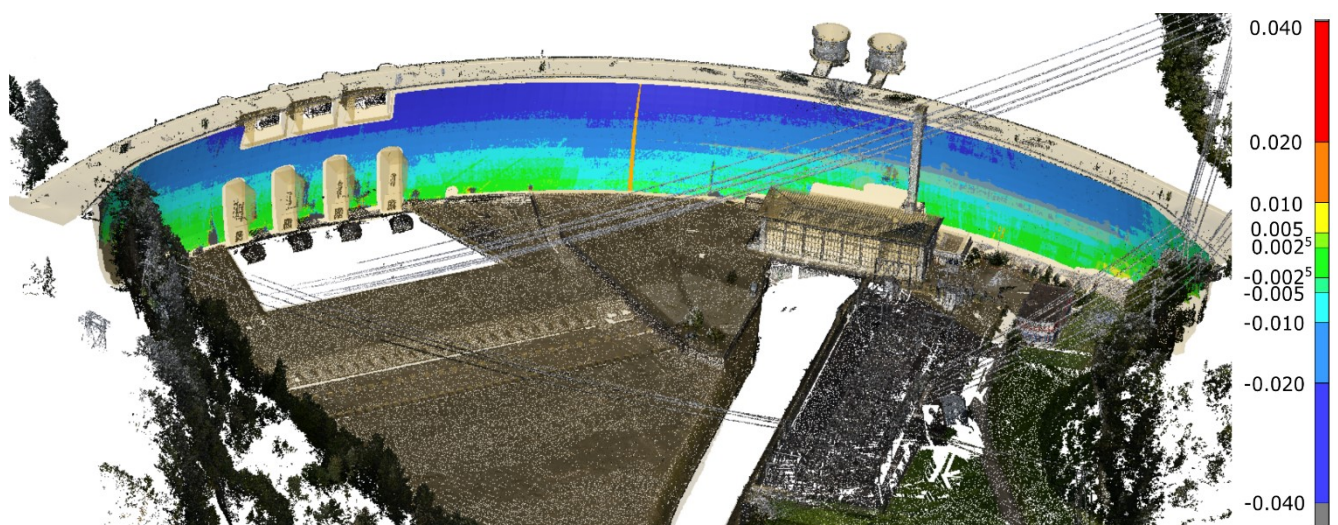


Abb. 84: *Mesh-to-Mesh* Vergleich zweier Scan Modelle in [m] der Staumauer «Schiffenen» (© Vincent Barras, vgl. auch Wieser et al. 2020)

#### 4.4 Terrestrische Radarinterferometrie

Die Methode wird auch *Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar (GB-InSAR)* genannt. Sie kann bei sehr hohem Gefährdungspotenzial zur dauernden, flächenhaften Überwachung insbesondere der Umgebung von Talsperren eingesetzt werden. Die Reichweite beträgt bis zu 4 km, die überstrichene Fläche über 5 km<sup>2</sup> und Bewegungen können im Submillimeterbereich detektiert werden, allerdings nur in Richtung der Achse des Radarstrahls (*Line-of-Sight* LOS). Werden mehrere GB-InSAR Sensoren auf unterschiedlichen Stationen eingesetzt, können 3D-Verschiebungen ermittelt werden. (Jacquemart; Meier 2014) beschreiben die Methode sowie Versuche detailliert, u.a. an der Staumauer «Santa Maria» und (Caduff 2011) im Gebiet des Stausees «Zervreila».

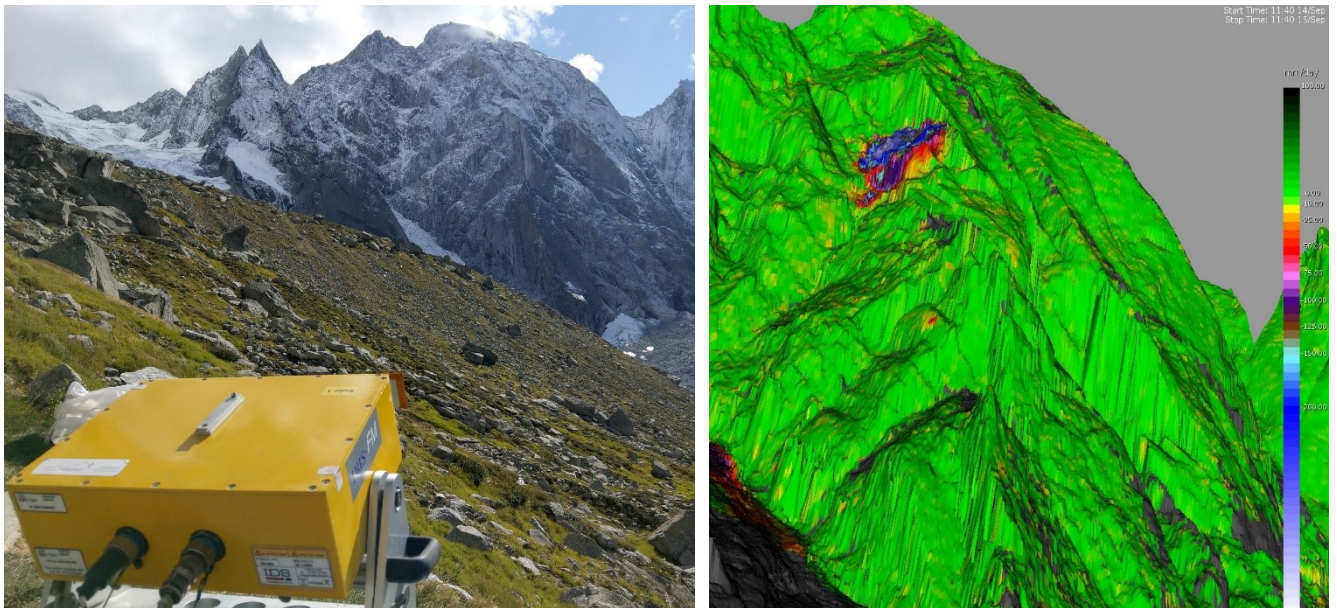


Abb. 85/86: Radargerät und Bewegungsauswertung am Piz Cengalo, Bondo (GR), Aufnahmen vom 14.9.2017; Deformationskala (rechts) in mm/Tag (© Geopraevent AG)

(Wieser et al. 2020) beschreiben einen Versuch im Jahr 2019 an der Staumauer «Schiffenen», bewerten die Methode und erkennen noch deutlichen Forschungsbedarf bis zu einem verbreiteten Einsatz.

#### 4.5 Satellitengestützte Radarinterferometrie InSAR

Diese Methode wird zur quasi-kontinuierlichen Überwachung von ausgedehnten Geländeoberflächen eingesetzt, u.a. im Rahmen des EU/ESA Erdbeobachtungsprogramms *Copernicus*. Ganze Täler oder Länder können überwacht werden. Die Periodizität ergibt sich aus den Ausleuchtungs-zonen (*Footprints*) der Satellitendurchgänge. Die Auswertung der InSAR Daten mittels *Persistent-Scatterer-Interferometrie (PSI)* kann kleinste Oberflächenbewegungen detektieren. So wurden in der Schweiz beispielsweise die Setzungen des Salzabbaugebiets Schweizerhalle BL, von Permafrostgebieten, Blockgletschern oder die Gelände-erutschungen Schluechtrisi im Muotathal (SZ) (Bollinger 2013) und Kleine Windgällen (UR) (Wegmüller et al. 2013), (Kistler et al. 2016) und viele andere mehr untersucht (Wegmüller et al. 2012). (Strozzi et al. 2010), (Ferretti 2015), (Schneider; Sörgel 2020) und weitere nennen die nutzbaren InSAR-Satelliten, Stärken, Schwächen der Methode und konkrete Anwendungen. Die Präzision aus differenziellen Auswertungen (D-InSAR) sei für durchschnittliche Verschiebungsraten in LOS Richtung besser als 1 mm/Jahr, bei Einzelmessungen besser als 4 mm/Jahr.

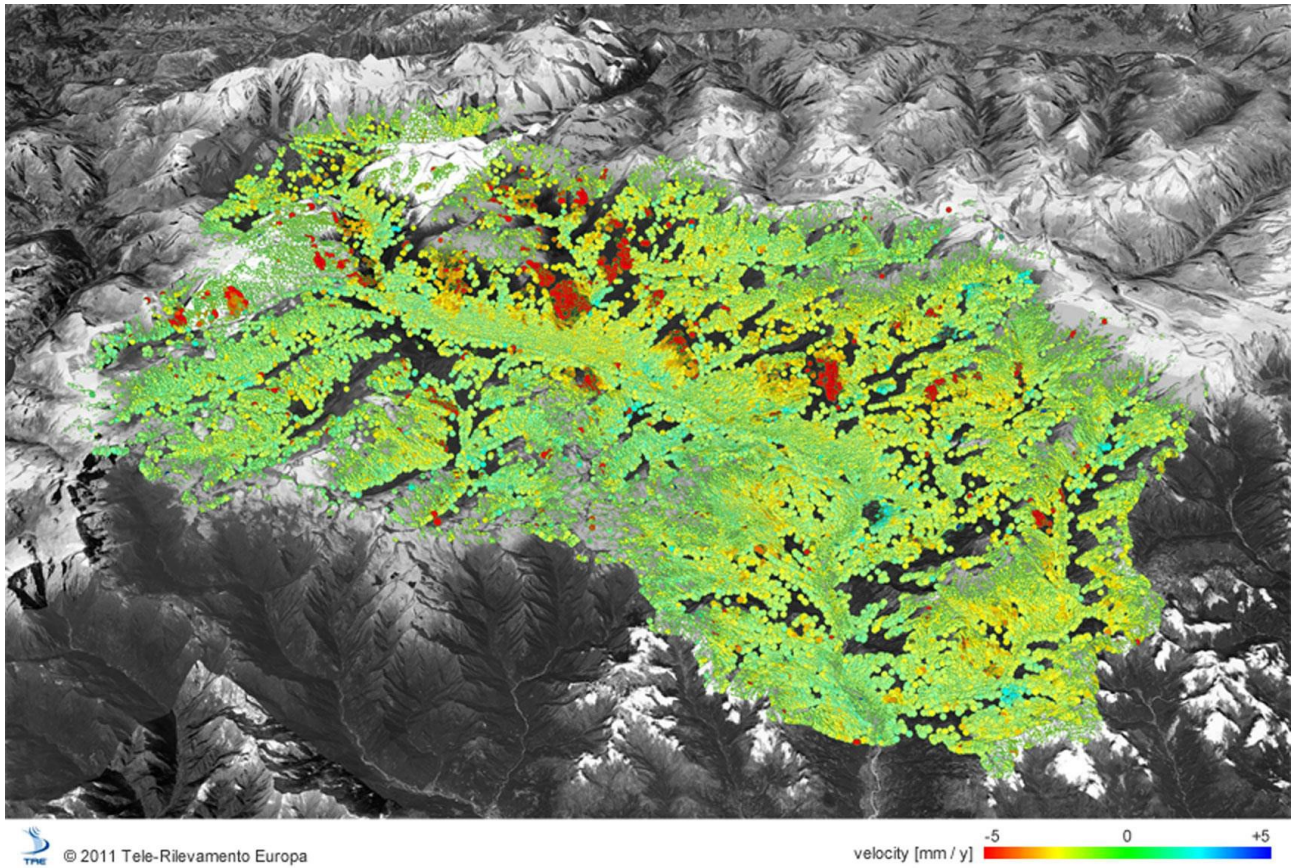


Abb. 87: Vertikale Deformationsgeschwindigkeit einer Region (Ferretti 2015; © 2011 Tele-Rilevamento Europa)

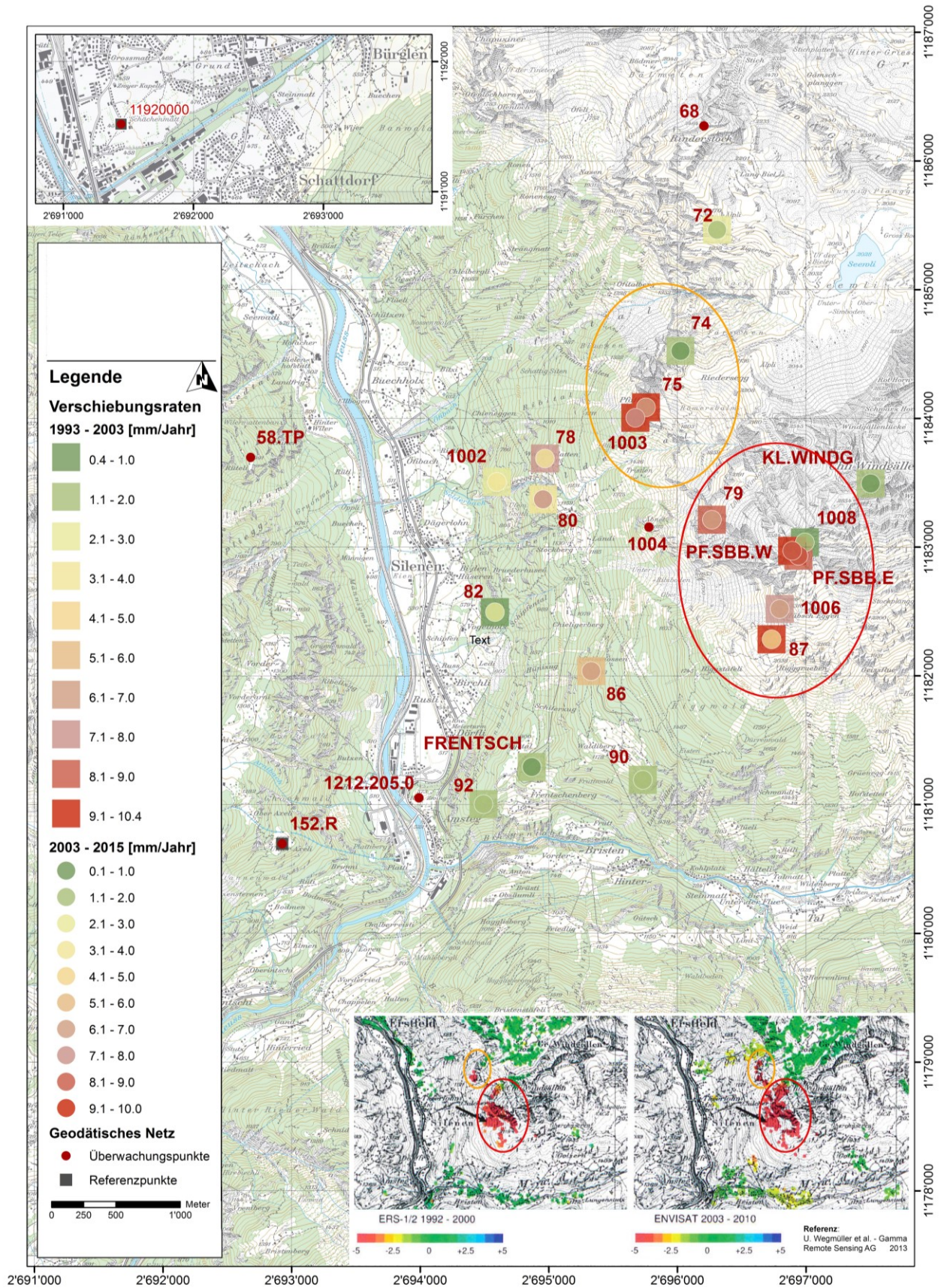


Abb. 88: Vergleich zwischen GNSS-Messungen (swisstopo) und SAR Interferometrie (GAMMA Remote Sensing AG) im Uner Reusstal an der Westflanke der «Kleinen Windgällen», über dem Gotthard-Basistunnel (Kistler et al. 2016)

#### 4.6 Weitere Methoden

- Elektronische Neigungsmesser und hydrostatische Nivellements zur permanenten Bauwerksüberwachung, siehe z.B. (Schwarz; Fedan 2020)
- 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
- Nahbereichsphotogrammetrie zur Dokumentation und Interpretation von Rissen und weiteren Oberflächenänderungen
- 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.

#### 4.7 Ausblick

Die Zukunft kann uns aus heutiger Sicht bringen:

- Eine zunehmende Vernetzung und Integration von geodätischen, geotechnischen und weiteren Sensoren (meteorologische, inertielle Messeinheiten, Wasserstandsmesser usw.)
- Ein Übergang von periodischen Messungen zu kontinuierlichen Zeitreihen auf ausgewählten, permanent und stabil installierten Messstationen; dank sinkenden Sensorpreisen in grosser Anzahl
- 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 *Indoor Navigation* Methoden
- Einbezug von *Augmented* und *Virtual Reality* zur Simulation und Prognose von zukünftigen Objektzuständen.

Hochgenaue, langjährig zuverlässige Deformationsmessungen sind ein spannendes, komplexes und höchst anforderungsreiches Anwendungsgebiet der Ingenieurgeodäsie. Die geodätische Überwachung von Stauanlagen wird vor allem dank ihren «absoluten» Ergebnissen ein wichtiger Pfeiler im Sicherheitskonzept der Talsperren bleiben.

## 5 Dank

Die GGGS-Arbeitsgruppe Talsperren dankt den folgenden Personen für ihre Offenheit und spontane Mitwirkung sowie die wertvollen Informationen zu den Aktivitäten im Ausland (Anhang 2): Louise Egger (Gattin von Kurt Egger †), Markus Gassmann, René Haag, Christian Hagin, Adrian Ryf, Ivo Schätti, Andreas Schlatter, Mario Studer, Felix Walser und Rocco Panduri (BFE, Sektion Aufsicht Talsperren). Zum Bericht trugen das Bundesamt für Landestopografie swisstopo sowie die Firmen Pöyry bzw. AFRY Schweiz AG, Axpo Power AG, Schneider Ingenieure AG, AlpTransit Gotthard AG sowie Geopraevent AG und 3sigmas SA mit Bildern und Plandarstellungen bei. Die Übersetzung ins Französische besorgte Olivier Reis (Lorraine F), ins Italienische Claudia Biberstein (swisstopo). Dem Vorstand der GGGS danken die Autoren für die finanzielle Unterstützung zur Publikation der zweisprachigen Kurzfassung in der Fachzeitschrift «Geomatik Schweiz» 7-8/2021.



## 6 Literaturverzeichnis

Hier folgen nur die im obigen Text referenzierten Quellen, erzeugt aus einem Literaturverwaltungsprogramm.

Eine umfassendere Bibliografie der einschlägigen schweizerischen Publikationen ist im Archiv der GGGS [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch) abrufbar. Sie erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

Aeschlimann, Heinz (1971): Zur Genauigkeit geodätischer Verschiebungsmessungen. Dissertation. ETH Zürich. Zürich. Online im Internet: URL: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-inte-rest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD\\_Theses/13.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-inte-rest/baug/igp/igp-dam/documents/PhD_Theses/13.pdf) (Zugriff am 16.07.2021)

Aeschlimann, Heinz (1981): «Einfache geodätische Methoden zur Bestimmung von Verschiebungen an Bauwerken». In: Tagung über geodätische Deformationsmessungen. 3.+4.9.1981. Sitten und Zeuzier: Wasser Energie Luft, Baden, S. 192–197.

Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung (2013): Geodäsie für die Überwachung von Stauanlagen. Empfehlungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei Stauanlagen. Online im Internet: URL: [http://www.swiss-dams.ch/de/publications/publications-csb/2013\\_Geodaesie\\_fuer\\_die\\_Ueberwachung.pdf](http://www.swiss-dams.ch/de/publications/publications-csb/2013_Geodaesie_fuer_die_Ueberwachung.pdf) (Zugriff am 18.02.2021).

Arioli, Richard; Egger, Kurt (1989): «Ingenieurvermessung: Genauigkeit im Dienste der Sicherheit». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 87 (1989), 6, S. 359–362. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-234051>

Auf der Mauer, Claudia; Erny, David; Maas, Hans-Gerd (1999): «Photogrammetrische Deformationsmessungen an der Staumauer Nalps : eine Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie auf grosse Bauwerke». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 93 (1999), 9, S. 479–482. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-235573>

Bachmann, W. K. (1956): «Nouvelles méthodes pour la détermination géodésique des déformations de barrages et autres ouvrages d'art». In: Wasser- und Energiewirtschaft / Cours d'eau et énergie, 47 (1956), 7–9.

Balissat, Marc (1998): «Le Comité National Suisse des Grands Barrages (CNSGB), Aperçu historique 1948-1998. Das Schweizerische Nationalkomitee für Grosse Talsperren (SNGT), Rückblick 1948-1998». In: Wasser Energie Luft, 90 (1998), 3/4, S. 86–99.

Barras, Vincent (2014): «Lasergrammétrie terrestre - une Solution pour l'Auscultation Surfaccique». In: Wasser Energie Luft, 106 (2014), 2, S. 112–115. Online im Internet: URL: [http://issuu.com/swv\\_wel/docs/wel\\_2\\_2014](http://issuu.com/swv_wel/docs/wel_2_2014) (Zugriff am 10.02.2016).

Barras, Vincent; Delley, Nicolas; Chapotte, Guillaume (2014): «Plusieurs scanners pour surveiller une rampe». In: Géomatique Suisse: Géoinformation et gestion du territoire, 112 (2014), 2, S. 63–67. Online im Internet: DOI: <http://dx.doi.org/10.5169/seals-358090>

Biedermann, Rudolf (1980): «Le comportement particulier du barrage de Zeuzier - Ausserordentliches Verhalten der Staumauer Zeuzier». In: Wasser Energie Luft, 72 (1980), 7/8, S. 181–184.

Bollinger, Daniel (2013): Bestimmung der Rutschungsbeträge Schluechtrisi Muotathal (SZ) mittels InSAR. E-Mail.

Bräker, Fritz (2006): «Anspruchsvolle Überwachungsaufgabe beim Projekt AlpTransit Gotthard». In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement, 104 (2006), 6, S. 314–320. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-236330>

- Bremen, Roger (2005): Oberflächensetzungen als Folge von Tunnelbauten in grosser Tiefe - Stand der heutigen Erkenntnisse. Fachgruppe für Untertagebau. Luzern am 20. Juni 2005. Online im Internet: URL: <https://www.lombardi.ch/fr-fr/SiteAssets/Publications/1227/Pubb-0407-L-Oberfl%C3%A4chensetzungen%20als%20Folge%20von%20Tunnelbauten%20in%20grosser%20Tiefe%20-%20Stand%20der%20heutigen%20Erkenntnisse.pdf> (Zugriff am 11.04.2021).
- Brunner, Fritz K.; Hartinger, H.; Wieser, Andreas (2000): «Zur kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken mit GPS». In: Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, (= Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, TU Graz) 34 (2000), S. 45–56. Online im Internet: URL: [https://www.researchgate.net/publication/268419170\\_ZUR\\_KONTINUIERLICHEN\\_UBERWACHUNG\\_VON\\_BAUWERKEN\\_MIT\\_GPS](https://www.researchgate.net/publication/268419170_ZUR_KONTINUIERLICHEN_UBERWACHUNG_VON_BAUWERKEN_MIT_GPS) (Zugriff am 11.04.2021).
- Caduff, Rafael (2011): Felsinstabilität Arnist (Zervreila) - Kombinierte Deformationsmessung mittels terrestrischer und satellitengestützter differenzieller Radar-Interferometrie sowie mittels klassischer Geodäsie. Bern: Universität Bern, Institut für Geologie, Gruppe exogene Geologie, 17 Seiten.
- Carosio, Alessandro (1990): «Das Vermessungswesen und die Herausforderung der Informatik». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 88 (1990), 1, S. 5–10. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-234298>
- Caspary, Wilhelm; Heister, Hansbert (Hrsg.) (1984): «Elektrooptische Präzisionsstreckenmessung». In: Schriftenreihe HSBw, Heft 11. München, Neubiberg: Hochschule der Bundeswehr München, Studiengang Vermessungswesen (= Schriftenreihe der HSBw), 268 Seiten. Online im Internet: URL: <https://www.unibw.de/geodaesie/bau-9-1-ingenieurgeodaesie/downloads/sonstige/heft-11.pdf/download> (Zugriff am 08.02.2021).
- CERN (1984): Distinvar. Eigenverlag. Online im Internet: URL: <http://cds.cern.ch/record/42405/?ln=de> (Zugriff am 18.02.2021).
- Conzett, Rudolf (1970): «Moderne Methoden der Vermessung». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 68 (1970), 5, S. 101–109. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-223665>
- Conzett, Rudolf (1977): «Bericht über den VII. Internationalen Kurs für Ingenieurmessungen hoher Präzision; 29. September bis 8. Oktober 1976 in Darmstadt». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 75 (1977), 2, S. 84–87. Online im Internet: URL: <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=geo-006:1977:75::526> (Zugriff am 9.9.2020).
- Conzett, Rudolf (1985): «Zum Hinschied von Prof. Dr. h. c. Fritz Kobold». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 83 (1985), 8, S. 245–250. Online im Internet: URL: <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=geo-006:1985:83::981> (Zugriff am 30.10.2019).
- Egger, Kurt (1976): «Neue Instrumente und deren Anwendung bei der geodätischen Deformationsmessung an Staumauern». In: VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung hoher Präzision; Darmstadt. Darmstadt:
- Egger, Kurt (1980): «Staumauer Zeuzier - Geodätische Deformationsmessungen». In: Wasser Energie Luft, 72 (1980), 7/8, S. 189–192.
- Egger, Kurt; Keller, Werner (1976): «New Instruments, Methods and their Application for Geodetic Deformations Measurements of Dams». In: 12. Congrès International des Grands Barrages; Mexico. Mexico, S. 993–1017.
- Ehrbar, Heinz; Bremen, Roger; Otto, Bastian (2010): «Gotthard Basistunnel – Tunnelbau im Einflussbereich von zwei Bogenmauern». In: Geomechanics and Tunnelling, 3 (2010), 5, S. 428–441. Online im Internet: DOI: <https://doi.org/10.1002/geot.201000035>

- Eling, Dirk (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Leibniz Universität. Hannover. Online im Internet: URL: [https://www.dgk.badw.de/fileadmin/user\\_upload/Files/DGK/docs/c-641.pdf](https://www.dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-641.pdf) (Zugriff am 02.07.2019).
- Ferretti, Alessandro (2015): Satellite InSAR Data: Why We Should Care. Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF). Leipzig: Online im Internet: URL: <http://www.euref.eu/symposia/2015Leipzig/04-01-Ferretti.pdf> (Zugriff am 01.07.2015).
- Fritzensmeier, Klaus; Niemeier, Wolfgang; Kaspelherr, R.; Hellriegel, F.; Tengen, D. (1988): Aufbau und Leistungsfähigkeit eines hybriden Überwachungsnetzes aus terrestrischen und GPS-Beobachtungen – aufgezeigt am Pumpspeicherwerk Vianden. X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München, 12.-17. September. München: Dümmler.
- Froome, K. D.; Bradsell, R. H. (1965): «Distance Measurement by Means of Modulated Light Beam yet Independent of the Speed of Light». In: IAG SSG No. 19 Symposium. Oxford: University of Toronto Press, S. 263–277. Online im Internet: DOI: <https://doi.org/10.3138/9781442631823-024> (Zugriff am 03.11.2020).
- Ganzoni, R.; Köchle, Richard (1991): Das Mekometer ME5000 von Kern als hochpräziser Kurz-distanzmesser. Zürich: Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 35 Seiten. Online im Internet: URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/igp-dam/documents/Reports/186.pdf> (Zugriff am 15.12.2020).
- Gikas, Vassilis (2019): FIG Conference Proceedings. 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring. Online im Internet: URL: [https://fig.net/resources/proceedings/2019/JISDM\\_2019.asp](https://fig.net/resources/proceedings/2019/JISDM_2019.asp) (Zugriff am 24.01.2021).
- Gottwald, Reinhard (1998): «Prüfung und Kalibrierung von Vermessungsinstrumenten: grundsätzliche Überlegungen und Konzepte». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 96 (1998), 8, S. 409–413. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-235472>
- Guillaume, Sebastien; Bürki, Beat; Griffet, Sylvain; Mainaud Durand, Héléne (2012): QDaedalus : Augmentation of Total Stations by CCD Sensor for Automated Contactless High-Precision Metrology. FIG Working Week 2012. Rom: FIG, S. 1–15. Online im Internet: URL: [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2012/papers/ts09i/TS09i\\_guillaume\\_buerki\\_et\\_al\\_6002.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts09i/TS09i_guillaume_buerki_et_al_6002.pdf) (Zugriff am 11.04.2021).
- Guillaume, Sebastien; Clerc, Jonas; Leyder, C.; Ray, Jérôme; Kistler, Matthias (2016): Contribution of the Image-Assisted Theodolite System QDaedalus to Geodetic Static and Dynamic Deformation Monitoring. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Wien: FIG, S. 1–9. Online im Internet: URL: [https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016\\_03\\_jisdmsubmission\\_66.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdmsubmission_66.pdf) (Zugriff am 11.04.2021).
- Guntli, Peter; Keller, Franz; Lucchini, Raffaele; Rust, Susanne (2016): Gotthard-Basistunnel: Geologie, Geotechnik, Hydrogeologie – zusammenfassender Schlussbericht. Wabern: Bundesamt für Landestopografie swisstopo (= Berichte der Landesgeologie Nr. 7), 180 Seiten plus Planbeilagen. Online im Internet: URL: <https://shop.swisstopo.admin.ch/de/products/publications/geology/reports/BLGD> (Zugriff am: 06.07.2021).
- Habel, Wolfgang R.; Brunner, Fritz K. (2011): «Faseroptische Sensoren für den Einsatz im Monitoring: ein Überblick». In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 118 (2011), 6, S. 204–211.
- Haefeli, R.; von Moos, A. (1938): «Drei Lockergesteine und ihre techn. Probleme: Hydraul. Grundbruch, Strukturstörung, Plastizität». In: Schweizerische Bauzeitung, 112 (1938), 11, S. 133–138. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-49912>

- Hellstrom, Bo (1933a): «Influences causing Distortions in Gravity Dams. Rapport Général Question 1b». In: Civil Engineering. Srockholm: Online im Internet: URL: [https://www.icold-cigb.org/GB/publications/congresses\\_proceedings.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/publications/congresses_proceedings.asp) (Zugriff am 09.09.2020).
- Hellstrom, Bo (1933b): «Two Technical Problems studied at the First Congress of the International Commission on Large Dams». In: Civil Engineering. London: Online im Internet: URL: [https://www.icold-cigb.org/GB/publications/congresses\\_proceedings.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/publications/congresses_proceedings.asp) (Zugriff am 09.09.2020).
- Holst, Christoph; Schmitz, Berit; Schraven, Achim; Kuhlmann, Heiner (2017): «Eignen sich in Standardsoftware implementierte Punktwolkenvergleiche zur flächenhaften Deformationsanalyse von Bauwerken? - Eine Fallstudie anhand von Laserscans einer Holzplatte und einer Stau-mauer». In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), 142 (2017), 2, S. 98–110. Online im Internet: DOI: [10.12902/zfv-0158-2017](https://doi.org/10.12902/zfv-0158-2017)
- Howald, Pierre (1953): F. M. Gougra S.A. Val d'Anniviers 1952-1953. Comptes-rendus des campagnes photogrammétriques de l'institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT). Lausanne: Institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT).
- Howald, Pierre (1955): Barrage de Mauvoisin 1954-1955. Comptes-rendus des mesures de déformations de barrages par l'institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT). Lausanne: Institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT).
- Howald, Pierre (1956a): Barrage du Châtelot 1952-1956. Comptes-rendus des mesures de déformations de barrages par l'institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT). Lausanne: Institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT).
- Howald, Pierre (1956b): Zermatt 1954-1956. Comptes-rendus des campagnes photogrammétriques de l'institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT). Lausanne: Institut de photogrammétrie EPUL (IPHOT).
- Hülsemann, Heinrich Ernst (1920): «Die Bewegung der Sperrmauer der Gothaer Talsperre». In: Zeitschrift für Vermessungswesen, 49 (1920), 7, S. 209–222.
- Inaudi, Daniele (1997): Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures. EPFL. Lausanne. Online im Internet: URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/32089> (Zugriff am 18.02.2021).
- Jacquemart, Mylène; Meier, Lorenz (2014): «Deformationsmessungen an Talsperren und in deren alpiner Umgebung mittels Radarinterferometrie». In: Wasser Energie Luft, 106 (2014), 2, S. 105–111. Online im Internet: URL: [http://www.geopraevent.ch/wp-content/uploads/2014/06/WEL\\_2\\_2014\\_Deformationsmessungen\\_an\\_Talsperren.pdf](http://www.geopraevent.ch/wp-content/uploads/2014/06/WEL_2_2014_Deformationsmessungen_an_Talsperren.pdf) (Zugriff am 30.11.2015).
- Keller, Werner (1970): «Ein praktisches Beispiel für Deformationsmessungen an Staumauern und Kontrollen des umliegenden Geländes». In: Ingenieurvermessung 70 : Beiträge zum VI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung : Graz, April 1970. Graz:
- Keller, Werner (1977): Geodätische Deformationsmessungen an Staumauern. Herausgegeben von Ingenieurbüro Walter Schneider AG, Chur; Kern & Co AG, Aarau. Kern & Co. AG, Aarau.
- Keller, Werner (1979): «Das Programmsystem Helmert/77 zur Berechnung allgemeiner geodätischer Netze». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 77 (1979), 2, S. 216–220. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-229674>
- Kersten, Thomas; Maas, Hans-Gerd; Piezzi, K.; Schmassmann, E. (1995): «Photogrammetrische Punktbestimmung bei der Überwachung von Staumauern». In: Vermessung, Photogrammetrie,

- Kulturtechnik, 93 (1995), 4, S. 216–220. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-235149>
- Kistler, Matthias; Brockmann, Elmar; Condamin, Sebastian; Schlatter, Andreas; Wiget, Adrian; Eggimann, L. (2016): Displacement Measurements with GNSS and Radar Interferometry above the New Alp Traverse Tunnel Gotthard. Kurzfassung des swisstopo Report 15-24. Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) 30.3.-1.4. Wien. Online im Internet: URL: [https://fig.net/resources/proceedings/2016/2016\\_03\\_jisdms\\_pdf/nonreviewed/JISDM\\_2016\\_submission\\_75.pdf](https://fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms_pdf/nonreviewed/JISDM_2016_submission_75.pdf) (Zugriff am 11.04.2021).
- Kistler, Matthias; Guillaume, Sebastien; Marti, Urs; Ray, Jérôme; Wiget, Adrian (2010): «Vergleich und Evaluation von Ausgleichungsmodellen für die Deformationsanalyse an Talsperren oder die Bauwerksüberwachung». In: Ingenieurvermessung 10. Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 211–216.
- Kistler, Matthias; Ray, Jérôme; Marti, Urs (2014): «Der neue geodätische Software-Werkzeugkasten GeoSuite für Monitoringaufgaben in der Ingenieurvermessung». In: Ingenieurvermessung 2014. Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 295–300.
- Kobold, Fritz (1946): «Neuere schweizerische Vermessungsinstrumente». In: Schweizerische Bauzeitung, 128 (1946), 22/23, S. 277-287–291. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-83946> und <http://doi.org/10.5169/seals-83950>
- Kobold, Fritz (1958): «Geodätische Messungen zur Bestimmung von Geländebewegungen und von Deformationen an Bauwerken». In: Schweizerische Bauzeitung, 76 (1958), 12+13, S. 163–167, 182–187. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-63945> und <http://doi.org/10.5169/seals-63949> (Zugriff am 11.04.2021).
- Kobold, Fritz (1965): «Grundsätzliche Betrachtungen zu den Deformationsmessungen an Bauwerken». In: Ingenieurvermessung 1965. München: Deutsche Geodätische Kommission, 6 Seiten.
- Kobold, Fritz (1966): «Gedanken zur Bedeutung der Vermessungskunde für den Bauingenieur». In: Schweizerische Bauzeitung, 84 (1966), 1, S. 20–23. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-68802>
- Kovari, Kalman; Amstad, Ch.; Grob, Hans (1974): «Messung von Verschiebungen und Deformationen an Bauwerken mit dem Distometer-ISETH». In: Schweizerische Bauzeitung, 92 (1974), 36, S. 819–825. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-72443>
- Krötzel, Johann (1968): «Erste Messungen mit dem Mekometer III an Staumauern». In: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, 56 (1968), 4, S. 149–152.
- Krötzel, Johann (1983): «Geodätische Kontrollmessungen (an Talsperren)». In: Wasser Energie Luft, 75 (1983), 9, S. 227–232.
- Lang, W. (1929): Deformationsmessung an Staumauern nach den Methoden der Geodäsie. Abteilung für Landestopographie, Wabern.
- Lang, W. (1934): «Deformationsmessung an Staumauern». In: Schweizerische Bauzeitung, 103 (1934), 1, S. 11. Online im Internet: URL: <https://www.e-periodica.ch/cntnmg?pid=sbz-002:1934:103::14> (Zugriff am 11.04.2021).
- Lang, W. (1938): «Deformationsmessung an Staumauern». In: 100 Jahre Eidg. Landestopographie 1838-1938. Wabern, Bern: Abteilung für Landestopographie, Wabern, 8 Seiten.

- Lienhart, Werner; Woschitz, Helmut; Klug, Ferdinand (2014): «Faseroptische Überwachung von Blockfugenbewegungen einer Talsperre». In: Ingenieurvermessung 2014. Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 371–380.
- Lombardi, Giovanni; Schneider, Toni R.; Egger, Kurt; Amberg, Walter (2016): AlpTransit Gotthard und Sicherheit der Stauanlagen Curnera, Nalps und Sta. Maria. Schlussbericht der BFE-Experten. Bern: Bundesamt für Energie BFE, 159 Seiten. URL: [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch)
- Meier, D.; Aeschlimann, Heinz (1986): «Elektronische Distanzmessung: Rückblick und Ausblick». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 84 (1986), 8, S. 341–345. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-233056>
- Meier, D.; Loser, Raymond (1986): «Das Mekometer ME 5000 - Ein neuer Präzisionsdistanzmesser». In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 93 (1986), 5, S. 182–190.
- Milev, Ivo; Niemeier, Wolfgang; Grejner-Brzezinska, Dorota; Wang, Jinling; Doukas, Ioannis (2016): FIG Conference Proceedings. 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Online im Internet: URL: [https://fig.net/resources/proceedings/2016/2016\\_03\\_JISDM\\_programme.asp](https://fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_JISDM_programme.asp) (Zugriff am 23.01.2021).
- Noetzli, Fred A. (1923): «Deflection Measurements on Arch Dam in Switzerland. Swiss Tests on 75 Ft. High Variable Radius Type Diversion Dam on River Reuss». In: Water Works, (1923), 3, S. 530–534.
- Noetzli, Fred A. (1926): «Über die Versuchs-Gewölbe-Staumauer am Stevenson-Creek in Californien». In: Schweizerische Bauzeitung, 87 (1926), 2, S. 13–16. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-40821>
- Noetzli, Fred A. (1928a): «Der Bruch der St. Francis-Staumauern in Kalifornien». In: Schweizerische Bauzeitung, 91 (1928), 16, S. 193–196. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-42486>
- Noetzli, Fred A. (1928b): «Zum Bruch der St. Francis-Staumauer in Kalifornien». In: Schweizerische Bauzeitung, 91 (1928), 16, S. 295. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-42517>
- Noetzli, Fred A. (1930): «Deflection Measurements on Dams. Review – Buchbesprechung des Buches von W. Lang 1929». In: Engineering News, New York City, (1930), S. 817.
- Noetzli, Fred A. (1932a): «Die Hoover-Steinmauer am Colorado Riv. U.S.A.» In: Schweizerische Bauzeitung, 99 (1932), 7, S. 81–84. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-45454>
- Noetzli, Fred A. (1932b): «Deflection of Swiss dams measured; use of triangulation with precision theodolites». In: Civil Eng., 2 (1932), 8, S. 489–493.
- Richardus, Peter (Hrsg.) (1977): «Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric Refraction». In: Electromagnetic Distance Measurement and the Influence of Atmospheric Refraction. Wageningen NL: the Netherlands Geodetic Commission, 376 Seiten. Online im Internet: URL: <https://ncgeo.nl/downloads/21Richardus.pdf> (Zugriff am 04.11.2020).
- Rüeger, Jean-Marc (2006): Overview of Geodetic Deformation Measurements of Dams. ANCOLD 2006 Conference. Sydney: School of Surveying & SIS, University of New South Wales, 34 Seiten. Online im Internet: URL: <https://vdocuments.site/geodetic-deformation.html> (Zugriff am 11.04.2021).
- Ryf, Adrian (2020): Messdauer ATG Los 349. E-Mail.

- Salvini, Dante; Studer, Mario (2010): «Geodätisches Langzeit-Monitoring von Stauanlagen im Hochgebirge». In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement, 108 (2010), 12, S. 594–597. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-236730>
- Schlatter, Andreas (2007): Das neue Landeshöhennetz der Schweiz LHN95. Zürich: Schweizerische Geodätische Kommission, 397 Seiten. Online im Internet: URL: <https://www.sgc.ethz.ch/sgc-volumes/sgk-72.pdf> (Zugriff am 12.04.2021).
- Schlatter, Andreas; Gubler, Erich; Mattli, Bruno; Schneider, Dieter (1998): Neues Landeshöhennetz LHN95. Deformations-Analyse Gotthard – Untersuchung der Senkungserscheinungen im Bereich des Gotthard-Strassentunnels. Technischer Bericht. Wabern, Bern: Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- Schneider, Dieter (1991): «Archivierung des Datenmaterials aus den geodätischen Deformationsmessungen». In: Wasser Energie Luft, 83 (1991), 11,12, S. 355–358.
- Schneider, Dieter; Gubler, Erich; Wiget, Adrian (2015): «Meilensteine der Geschichte und Entwicklung der Schweizerischen Landesvermessung». In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement, 113 (2015), 11, S. 462–483. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-583600>
- Schneider, Philipp Jacob; Sörgel, Uwe (2020): «Monitoring einer Schleuse mittels Persistent-Scatterer-Interferometrie». In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 127 (2020), 3, S. 118–124. Online im Internet: URL: <https://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2020/avn-ausgabe-032020/6493.html> (Zugriff am 11.04.2021).
- Schneider, Toni R. (1980): «Staumauer Zeuzier - Geologisch-geotechnisch-hydrogeologische Aspekte der Mauerdeformationen». In: Wasser Energie Luft, 72 (1980), 7/8, S. 193–200.
- Schneider, Walter (1970): «Zum heutigen Stand der Deformationsmessungen an Staumauern in der Schweiz». In: Ingenieurvermessung 70 : Beiträge zum VI. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung : Graz, April 1970. Graz:
- Scholl, R. (1955): «Photogrammetrische Kartierungen für den Talsperrenbau». In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, 53 (1955), 5, S. 141–151. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-211776>
- Schwarz, Willfried; Fedan, Mehdi (2020): «Effiziente Neigungsmessungen – ein Verfahren der permanenten Bauwerks-über-wachung». In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 127 (2020), 3, S. 125–146. Online im Internet: URL: <https://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2020/avn-ausgabe-032020/6492.html> (Zugriff am 11.04.2021).
- Sektion Geodäsie der Eidg. Landestopographie, Bern (1923a): «Trigonometrische Beobachtung der elastischen Deformationen der Staumauer am Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg der S.B.B.» In: Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik, 21 (1923), 9, S. 209–220. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-188065>
- Sektion Geodäsie der Eidg. Landestopographie, Bern (1923b): «Trigonometrische Beobachtung der elastischen Deformationen der Staumauer am Pfaffensprung des Kraftwerkes Amsteg der S.B.B.» In: Schweizerische Bauzeitung, 81 (1923), 3, S. 21–24. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-38846>
- SNGT, Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren (Hrsg.) (1991): «Measuring Installations for Dam Monitoring: Concepts, Reliability, Redundancy» (1991): In: Wasser Energie Luft, 83 (1991), 5/6, S. 109–155.

- Solexperts AG (2008): Distometer ETH. Eigenverlag. Online im Internet: URL: [https://www.solexperts.com/images/PDF\\_DEUTSCH/02\\_geot\\_DE/de\\_08\\_geo\\_disto\\_v1.pdf](https://www.solexperts.com/images/PDF_DEUTSCH/02_geot_DE/de_08_geo_disto_v1.pdf) (Zugriff am 15.07.2020).
- STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung (1993): «Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue - Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessungen für die Überwachung der Stauanlagen». In: Wasser Energie Luft, 85 (1993), 9, S. 181–242.
- STK Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung (2005): Messanlagen zur Talsperrenüberwachung. Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz. Schweizerisches Talsperrenkomitee. Online im Internet: URL: <http://www.swissdams.ch/de/publications/publications-csb> (Zugriff am 06.04.2019).
- STK, Schweizerische Talsperrenkommission (1946): Messungen Beobachtungen und Versuche an Schweizerischen Talsperren 1919 – 1945; Mesures Observations et Essais sur les Grands Barrages Suisses 1919 – 1945. Bern: Eidgenössisches Oberbauinspektorat.
- Strozzi, Tazio; Delaloye, Reynald; Raetzo, Hugo; Wegmüller, Urs (2010): Radar Interferometric Observations of destabilized Rockgraciers. ESA Fringe 2009 Workshop. Frascati. Online im Internet: URL: [https://earth.esa.int/workshops/fringe09/proceedings/papers/s12\\_4stroz.pdf](https://earth.esa.int/workshops/fringe09/proceedings/papers/s12_4stroz.pdf) (Zugriff am 22.10.2013).
- Stucky, Alfred (1924): «Der Talsperrenbruch im Val Gleno». In: Schweizerische Bauzeitung, 83 (1924), 6, 7, S. 63–67, 74–76. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-82737> und <http://doi.org/10.5169/seals-82741>
- Studer, Mario; Ryf, Adrian; Löw, Simon; Lützenkirchen, Volker; Jesel, Thomas (2014): «Erkenntnisse aus einem Langzeitmonitoring an der Geländeoberfläche beim Bau des Gotthard-Basistunnels». In: Ingenieurvermessung 2014. Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 207–219.
- Ulbrich, Karl (1956): «Geodätische Deformationsmessungen an österreichischen Staumauern und Großbauwerken». In: Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, (= Veröffentlichung des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen) Sonderheft 17 (1956), 73 Seiten. Online im Internet: URL: [https://www.ovg.at/static/vqi-sonderhefte/sonderheft1956\\_17\\_final\\_OCR.pdf](https://www.ovg.at/static/vqi-sonderhefte/sonderheft1956_17_final_OCR.pdf) (Zugriff am 11.04.2021).
- Untersee, V. (1951): Die geodätische Methode zur Ermittlung der räumlichen Deformationen von Staumauern. Wabern: Eidgenössische Landestopographie, Sektion für Geodäsie, 15 Seiten.
- Walser, Felix (2014): «Geodäsie für die Talsperrenüberwachung». In: Wasser Energie Luft, 106 (2014), 2, S. 101–104. Online im Internet: URL: [https://issuu.com/swv\\_wel/docs/wel\\_2\\_2014/2](https://issuu.com/swv_wel/docs/wel_2_2014/2) (Zugriff am 03.07.2019).
- Wegmüller, Urs; Strozzi, Tazio; Gruner, Ueli; Gisler, Christian; Hauser, Marc (2013): «Verschiebungsmessungen mittels Satellitenradar im Urner Reusstal oberhalb der Nord-Süd-Verkehrsachse im Zeitraum 1992 – 2010». In: Swiss Bulletin für angewandte Geologie, 18 (2013), 2, S. 139–153. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-391153>
- Wegmüller, Urs; Strozzi, Tazio; Wiesmann, Andreas; Werner, Charles; Frey, Othmar; Caduff, Rafael (2012): «Hangrutschungskartierung mittels Radar Interferometrie». In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement, 110 (2012), 9/2012, S. 434–427. Online im Internet: DOI: <http://doi.org/10.5169/seals-309305>
- Welsch, Walter (Hrsg.) (1983): «Deformationsanalysen '83. Geometrische Analyse und Interpretation von Deformationen Geodätischer Netze». In: Schriftenreihe HSBW, Heft 9. München, Neubiberg: Hochschule der Bundeswehr, 346 Seiten. Online im Internet: URL:



<https://www.unibw.de/geodaesie/bau-9-1-ingenieurgeodaesie/downloads/sonstige/heft-09.pdf/@@download/file/Heft-09.pdf> (Zugriff am 08.02.2021).

- Welsch, Walter; Baumann, E.; Kuntz, E.; Schmitt, Günter; Dupraz, Hubert; Niemeier, Wolfgang; Pelzer, Hans; Caspary, Wilhelm (1979): «Seminar über Deformationsanalysen, gehalten an der Hochschule der Bundeswehr München». In: Schriftenreihe HSBw, Heft 4. München, Neubiberg: Hochschule der Bundeswehr München, Studiengang Vermessungswesen (= Schriftenreihe der HSBw), 106 Seiten. Online im Internet: URL: <https://www.unibw.de/geodaesie/bau-9-1-ingenieurgeodaesie/downloads/sonstige/heft-04.pdf/download> (Zugriff am 08.02.2021).
- Wieser, Andreas; Schmid, Lorenz; Butt, Jemil; Barras, Vincent; Condamin, Sebastian (2020): «Staumauerüberwachung - Vergleich dreier Technologien für epochenweise Deformationsmessungen». In: Ingenieurvermessung 2020. Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 437–449. Online im Internet: DOI: [10.3929/ethz-b-000404562](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000404562) (Zugriff am 18.02.2021).
- Wiget, Adrian; Schneider, Dieter (1992): «Erfahrungen mit GPS in Staumauer-Überwachungsnetzen». In: Ingenieurvermessung 1992. Zürich, S. 12/1-12/13.
- Wiget, Adrian; Schneider, Dieter; Gubler, Erich; Wild, Urs; Scherrer, Markus; Schlatter, Andreas (2020): «25 Jahre neue Landesvermessung LV95». In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement, 118 (2020), 11, S. 316–324.
- Willi, Daniel (2020): «swisstopo zieht sich aus der Stauanlagenvermessung zurück». In: cadastre Fachzeitschrift für das schweizerische Katasterwesen, (2020), 33, S. 16.
- Wunderlich, Thomas A. (Hrsg.) (2020): Ingenieurvermessung 20 - Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieursvermessungskurs München. Berlin und Offenbach: Wichmann.
- Zaki, Mohamed (1963): Untersuchungen über die systematischen Fehler an der Schachtlotung bei Staumauern. Diss. Nr. 3435. ETH Zürich. Zürich. Online im Internet: URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/135175> (Zugriff am 22.02.2021).
- Zogg, Hans-Martin (2007): Terrestrisches Laserscanning – Ein allgemeiner Überblick über Messmethoden und Einsatzmöglichkeiten in der Geomatik. Leica Geomatik News. Zürich am 11. August 2007. Online im Internet: URL: [http://www.leica-geosystems.ch/de/GeomatikNews\\_Zogg\\_neu.pdf](http://www.leica-geosystems.ch/de/GeomatikNews_Zogg_neu.pdf) (Zugriff am 23.02.2016).
- Zölly, Hans (1948): Geschichte der geodätischen Grundlagen für Karten und Vermessungen in der Schweiz. Wabern: Abteilung für Landestopographie des Eidgenössischen Militärdepartements, Wabern. Online im Internet: URL: <https://www.history-of-geodesy.ch/services/fachliteratur/digitale-buecher/h-zoelly-geschichte-geod-grundlagen-karten-vermessungen.html> (Zugriff am 27.07.2019).

### **Anschrift der Autoren:**

Beat Sievers, Bahnhofstrasse 11, 3454 Sumiswald; [sievers-frey@bluewin.ch](mailto:sievers-frey@bluewin.ch)  
Adrian Wiget, Sonnenweg 6, 5507 Melligen; [adrian.wiget@bluewin.ch](mailto:adrian.wiget@bluewin.ch)  
Urs Federer, Oelbergweg 5, 5234 Villigen; [urs.federer-kehl@greenmail.ch](mailto:urs.federer-kehl@greenmail.ch)  
René Huser, Meisenweg 9, 8600 Dübendorf; [rene.huser@glattnet.ch](mailto:rene.huser@glattnet.ch)

## Anhänge

Schweizer Talsperren unterliegen entweder der eidgenössischen oder der kantonalen Aufsicht.

Die **eidgenössische Aufsicht** liegt beim Bundesamt für Energie (BFE), Sektion Aufsicht Talsperren. Die Webseite «Talsperren» (**Link**) enthält die geltenden gesetzlichen Grundlagen und Richtlinien für die Talsperrenüberwachung (**Link**).

Subsidiäre **kantonale Vorgaben** für kleine Absperrbauwerke dürften in den Bau- und Wasserbaugesetzen und -verordnungen der Kantone zu finden sein.

Eine Tabelle der aktuell 222 **Stauanlagen unter Bundesaufsicht** mit ihren Merkmalen lässt sich aus **Link** herunterladen (Stand 23.03.2018). Alle diese Stauanlagen sind auf dem Geoportal des Bundes in einer **Karte** dargestellt. Auf dem Geoportal des Bundes findet man unter Information / Detailbeschreibung auch die Dokumentation des **«minimalen Geodatenmodells»** mit den Modellbeschreibungs- und Datenaustauschregeln für ein modellbasiertes konzeptionelles Datenmodell:

- für die Stauanlagen unter Bundesaufsicht: **Link**
- für die Stauanlagen unter kantonaler Aufsicht: **Link**

Zusätzliche Informationen enthält die **Webseite** des **Schweizerischen Talsperrenkomitees STK** in d, f, i, e.

### Richtlinien zur geodätischen Überwachung der Talsperren

Eine interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung des STK hat Richtlinien für die geodätische Überwachung erarbeitet. Sie liegen entweder als selbstständige Dokumente oder als Fachtagungsberichte vor (siehe Kapitel 2). Besonders erwähnt seien:

- «Geodätische Deformationsmessungen für die Überwachung der Stauanlagen» (1993 und 1997) in d, f, e
- «Messanlagen zur Talsperrenüberwachung. Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz» und «Aktensammlung über die Stauanlage [ehemals "Talsperrenbuch"]» (2005) in d, f, e
- «Geodäsie für die Überwachung von Stauanlagen. Empfehlungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei Stauanlagen» (2013) in d, f
- «Messgeräte kontrollieren und kalibrieren. Empfehlung des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK für die Kontrolle der Funktionstüchtigkeit von Messgeräten für Stauanlagen» (2013) in d, f, i

Weitere «Regeln der Ingenieurskunst» werden an periodischen Kongressen vermittelt wie den Symposien der ICOLD, Tagungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees, den Mittweidaer Talsperrentagen (mit Unterstützung des Deutschen Talsperrenkomitees), den Internationalen Ingenieurvermessungskursen deutschsprachiger Technischer Hochschulen, den Joint International Symposien on Deformation Monitoring (JISDM) von FIG und IAG oder Tagungen weiterer ausländischer Interessenverbände.

Die Bibliografie vieler einschlägiger Publikationen ist im Archiv der GGGS [www.gggs.ch](http://www.gggs.ch) abrufbar.

### Ausführende der geodätischen Überwachung

Die ausführenden Ingenieurgeodäten werden von den jeweiligen Talsperrenbetreibern ausgewählt und mandatiert. Aus Datenschutzgründen wird hier darauf verzichtet, welche Firma die Messungen für welche Stauanlagen in der Schweiz ausführt.

Diese Ingenieurgeodäten bestimmen die Deformationen periodisch (meist im Fünfjahresturnus) und rapportieren ihre Ergebnisse dem Betreiber der Stauanlage, welcher diese zusammen mit den Auswertungen der übrigen Beobachtungen an das BFE und an die unabhängigen Experten für Bau und Geologie weiterleitet.

*alle Zugriffe auf die obigen Links am 12.2.2021*

Anhang 1 Schweizer Talsperren und ihre geodätische Überwachung

Vom **Bundesamt für Landestopographie** wurden in **Spanien** an folgenden Staumauern Beratungen und geodätische Deformationsmessungen ausgeführt:

**1929 - 1933 Staumauer El Burguillo**, (*Presa de El Burguillo*) am Fluss Alberche in der Provinz Avila (bei Madrid), zwischen den Gemeinden El Tiemblo und El Barraco.

Einweihung: 1913

Typ: Gewichtsmauer (Pfeilerstaumauer)

Höhe/Länge: 91 m; Mauerkrone 300 m

Zweck: Landwirtschaftliche Bewässerungen; Erzeugung von elektrischer Energie

Info: <https://www.iaqua.es/data/infraestructuras/presas/burguillo>

**1929 - 1930 Staumauer Alloz**, (*Presa de Alloz*) am Fluss Salado in der Provinz Navarra

Auftraggeber: Fuerzas Eléctricas de Navarra, Pamplona

Einweihung: 1930

Typ: Bogenmauer

Höhe/Länge: 67 m; Mauerkrone 74 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie

Info: <https://www.iaqua.es/data/infraestructuras/presas/alloz>

**1930 - 1937 Staumauer Cala**, am Fluss Rivera de Cala in der Provinz Sevilla (Andalusien) in der Gemeinde El Ronquillo

Auftraggeber: Elektrobank Zürich (Banque pour Entreprises électriques à Zurich)  
bzw. die Compañía Sevillana de Electricidad, Sevilla

Einweihung: 1927

Typ: Gewichtsmauer

Höhe/Länge: 53 m; Kronenlänge 346 m.

Zweck: Reservoir der Cuenca Hidrografica del Guadalquivir (Fläche 525 km<sup>2</sup>)

Info: <https://www.iaqua.es/data/infraestructuras/presas/cala>

*Zusammengestellt von Adrian Wiget, swisstopo*

Anhang 2.1 Staumauern in Spanien, an denen die Eidg. Landestopographie 1929-1937 tätig war

Durch das **Ingenieurbüro Walter Schneider AG**, später **Schneider Ingenieure AG, Chur** wurden weltweit an folgende Stauanlagen Beratungen und geodätische Deformationsmessungen ausgeführt:

**1963 - 1986 Staumauer Dez, (*Pahlavi Dam*)** am Fluss Dez in der Provinz Khuzestan in **Iran**

Auftraggeber: Khuzestan Water and Power Authority

Einweihung: 1963

Typ: doppelt gekrümmte Bogenmauer

Höhe/Länge: 203 m; Mauerkrone 380 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie, landwirtschaftliche Bewässerungen

Leistungen: Geodätische Deformationsmessungen:  
Pfeilernetz mit 16 Vermessungspfeilern und 20 Mauerbolzen

**1974 - 1986 Staumauer Abbaspour, (*Great Rezy Shah Dam*)** am Fluss Karun in der Provinz Khuzestan in **Iran**

Auftraggeber: Khuzestan Water and Power Authority

Einweihung: 1976

Typ: doppelt gekrümmte Bogenmauer

Höhe/Länge: 134 m; Mauerkrone 277 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie

Leistungen: Geodätische Deformationsmessungen:  
Pfeilernetz mit 14 Vermessungspfeilern und 6 Mauerbolzen sowie  
Polygonzug in einem Kontrollgang mit 12 Konsolen

**seit 1982 Staumauer Kariba**, am Fluss Zambezi in **Zimbabwe** und **Sambia**

Auftraggeber: Zambezi River Authority

Einweihung: 1959

Typ: doppelt gekrümmte Bogenmauer

Höhe/Länge: 128 m; Mauerkrone 579 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie

Leistungen: Geodätische Deformationsmessungen:  
Pfeilernetz mit 9 Vermessungspfeilern und Polygonzüge in zwei Kontrollgängen mit 38 resp. 28 Konsolen; Beratung für die geodätischen Überwachungsmessungen (Beobachtung derselben sowie deren Auswertung)

**seit 1982 div. Staumauern in Südafrika**

Auftraggeber: Department of Water Affairs (heute Department of Water and Sanitation)

Leistungen: Beratung für die geodätischen Überwachungsmessungen der Staumauern in Südafrika (Einrichtung geodätischer Messanlagen; Beobachtung derselben sowie deren Auswertung) u.a. bei den folgenden Stauanlagen:

- Pongolapoort Dam, KwaZulu\_Natal
- Paul Sauer Dam (Kouga Dam), Eastern Cape
- H.F. Verwoerd Dam (Gariiep Dam), Eastern Cape
- Roode Elsberg Dam, Western Cape
- Rhenosterkop Dam, Mpumalanga
- P.K. Le Roux Dam (Vanderkloof Dam), Northern Cape / Free State
- Katse Dam, Kingdom of Lesotho

**1990 - 1993 Staumauer Jiroft**, am Fluss Halil in der Provinz Kerman in [Iran](#)

Auftraggeber: Ministry of Energy

Einweihung: 1993

Typ: doppelt gekrümmte Bogenmauer

Höhe/Länge: 200 m; Mauerkrone 380 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie, landwirtschaftliche Bewässerungen

Leistungen: Geodätische Deformationsmessungen:  
Pfeilernetz mit 7 Vermessungspfeilern und Polygonzüge in zwei Kontrollgängen mit 26  
resp. 23 Konsolen*Zusammengestellt von Felix Walser, Schneider Ingenieure AG*Anhang 2.2 Stauanlagen im Iran und im südlichen Afrika, an denen die Schneider Ingenieure AG  
(vormals Ingenieurbüro Walter Schneider AG) seit 1963 tätig ist

Durch die **Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG**, später **Pöyry Schweiz AG** bzw. **AFRY Schweiz AG** wurden weltweit an folgenden Stauanlagen Beratungen und geodätische Deformationsmessungen ausgeführt:

**1970 - 1980 Polyphython Staudamm**, am Fluss Aliakmos bei Kozani gelegen, **Nordgriechenland** (Westmazedonien)

Auftraggeber: Public Power Corporation (PPC), Athen

Einweihung: 1975

Typ: Erdschüttdamm

Höhe/Länge: 105 m; Mauerkrone 297 m; Dammvolumen 3.5 Mio. m<sup>3</sup>

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie

Leistung: Geodätisches Grundlagennetz für den Bau und die Überwachung der Deformationen am Dammbau und Umgebung;  
Pfeilernetz mit 12 Vermessungspfeilern und ca. 60 Objektpunkten

Instrumente: Wild Theodolit T2 mit Distomat DI10 oder AGA Geodimeter 700;  
Ab 1985 automatisches Monitoringsystem

Info: <https://www.s.raftopoulos@dei.com.gr>

**1976 - 1980 Shendam-, Shemankar und Baushe Staudämme**, **Nigeria**, Westafrika, Bundesstaat Plateau; Machbarkeit von 3 Staudämmen für Bewässerungsprojekte

Auftraggeber: Weltbank für technische Zusammenarbeit und Nigerianischer Staat für Entwicklung

Bauzeit: 1976 bis 1980; Vermessung 1977 / 1978, 4 Einsätze (6 Monate)

Typ: 3 Erdschüttdämme mit Bewässerungskanälen

Höhe/Länge: bis 52 m; Kronenlängen unterschiedlich bis 3.8 km

Zweck: Bewässerung, ohne Energieerzeugung

Leistungen: Projektierung der Vermessungsnetze für 3 Dämme und Hauptkanäle, Grundlagenvermessung (Polygonzüge mit Höhennetz), Aufnahme der Topographie für Projektierung der Bauten und Kanäle, Absteckung der Sperrstellen und teilweise Bewässerungskanäle

Instrumente: Wild T2 / T16 und Distomat DI5

Zusatzleistungen: Schulung und Training lokaler Vermessungsleute (Feldarbeiten und Auswertung).

**1981 - 1998 Arakthos River Projekt**, **Nordgriechenland** zwischen Ioanina und Arta; Kaskadenprojekt über 50 km Länge mit drei Staumauern und Dämmen; Upper Course (Driskos und Staumauer Stenon), Middle Course und Lower Course (Staudamm Arta)

Infolge der teilweise gemessenen grossen Deformationen und der ungünstigen geologischen Verhältnisse wurde das Projekt nur teilweise realisiert.

Auftraggeber: Public Power Corporation (PPC), Athen

Bauzeit: 1981 – 1998, Vermessung 1982 – 1986 (8 Vermessungseinsätze)

Typ: Erdschüttdämme Pournari I und II (Arta);  
Die Bogenstaumauer Stenon wurde aus geologischen Gründen nicht gebaut (Sicherheitsbedenken).

Höhe/Länge: 185 m; Kronenlänge 238 m; Bauwerksvolumen 1.5 Mio. m<sup>3</sup>

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie (339 MW) und Bewässerung

Leistungen: Pfeilernetz mit 18 Vermessungspfeilern und 80 Objektpunkten für die Überwachung der Deformationen (Verwerfungslinien)

Instrumente: KERN Mekometer ME 3000 und DKM3, 25 ME-Reflektoren

<b>1984 - 1987</b>	<b>Neuer Staudamm von Ma'rib, Jemen</b> , 100 km von Sanaa entfernt, Bewässerungsprojekt mit Damm
Auftraggeber:	Abu Dhabi Fund for Development (ADFD): Dubai (UAE)
Typ:	Staudamm (Steinschüttdamm)
Höhe/Länge:	40 m; Dammkrone 760 m; Bewässerung 10'000 ha Land
Zweck:	Bewässerungsprojekt in der Wüste mit ca. 45 km langen Kanälen
Leistungen:	Grundlagennetz (Poygonzüge) für die Absteckung der Kanalbauten, Absteckungsarbeiten für den Damm
Besonderes:	Der antike Ma'rib Damm (4. Jh. vor Chr.) gilt als ältester Staudamm.
<b>1986 - 2001</b>	<b>Staumauer Karakaya, Türkei</b> , am Euphrat, Bezirk Diyarbakır
Auftraggeber:	DSI Devlet Su İşleri General Müdürlüğü, Ankara
Bauzeit:	1976 bis 1987; Vermessung 1986 – 2001 (18 Einsätze)
Typ:	Doppelgekrümmte Bogenstaumauer
Höhe/Länge:	173 m; Mauerkrone 462 m; Bauwerksvolumen 2 Mio. m <sup>3</sup>
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie (1'800 MW)
Leistungen:	Vermessungsnetz mit 14 Vermessungspfeilern, Instrumentierung von 4 Kontrollgängen mit 80 Konsolen; 50 Geländepunkte
Instrumente:	Kern Mekometer ME3000 und DKM3
Zusatzleistungen:	Teil-Überwachung des grösstes Deformationsgebietes der Türkei, bei der Stauwurzel des Atatürk Sees Geländeverschiebungen von $\geq 1.8$ Meter /Jahr, entstanden durch einen abflusslosen See an der Oberfläche (Tilmo Area, Bezirk Elaziğ). Grossräumige Überwachung der Verwerfung von Hindibaba / Cüngüs (25 km x 20 km) an 18 Vermessungspfeilern mit GPS-Messungen
Info:	<a href="https://www.Devlet Su İşleri.gov.tr">https://www.Devlet Su İşleri.gov.tr</a>
<b>1987 - 1990</b>	<b>Trente-cinq Barrages de Burkina Faso</b> , Regenrückhaltebecken, Ouagadougou (Westafrika), Machbarkeitsstudien und Detailprojekte der 35 Staumauern / Staudämme für Bewässerungsprojekte
Auftraggeber:	Afrikanische Entwicklungsbank (AfDB) mit Sitz in Abidjan (Côte d'Ivoire)
Bauzeit:	1987 bis 1990; Vermessung 1989
Typ:	Betonmauern und Erdschüttdämme, Bewässerungskanäle
Höhe/Länge:	5 m bis 9 m; Mauerkronen von unterschiedlichen Längen 500 m bis 1.8 km
Zweck:	Bewässerung, ohne Energieerzeugung
Leistungen:	Projektierung der Vermessungsnetze für ca. 25 gebaute Dämme, Grundlagenvermessung (Polygonzüge mit Höhennetzen), Aufnahme der Topographie für Projektierung der Bauten und Kanäle, Absteckung der Sperrstellen sowie teilweise der Bewässerungskanäle. Besonderheit: durch das sehr flache Gelände war eine hohe Genauigkeit der Höhen gefordert, die Bewässerungskanäle wurden mit einem minimalen Gefälle gebaut.
Instrumente:	Wild T2 / T16 und Distomat DI4S / DI5
Zusatzleistungen:	Zusammenarbeit Electrowatt Ingénieurs Conseils SA und Sogreah SA in Grenoble (Frankreich); Projektorganisation mit den lokalen Vermessern sowie Schulung und Training (Feldarbeiten und Auswertung)

<b>1990 - 2007</b>	<b>Staudamm Atatürk, Türkei</b> am Euphrat in Südost-Anatolien (GAP)
Auftraggeber:	DSI Devlet Su İşleri General Müdürlüğü, Ankara
Bauzeit:	1983 bis 1992, Vermessung 1986 bis 2007
Typ:	Bogengewichtsmauer (Erdschüttdamm), Spillway und Penstock je 250 m breit und 1'100 m lang
Höhe/Länge:	169 m; Kronenlänge Damm 1'614 m mit Spillway und Penstock; Breite Dammfuss 1'100 m; Bauvolumen 84.5 Mio. m <sup>3</sup>
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie (2'400 MW) und landwirtschaftliche Bewässerung von 1.7 Mio. ha Land, erschlossen mit zwei je 25 km langen Wassertunnels Ø 11.5 m in die Harran Ebene
Leistungen:	Vermessungsnetz mit 25 Vermessungspfeilern, 211 Kontrollpunkten auf der Dammoberfläche, 56 Punkten an den Betonstrukturen, 25 GPS-Kontrollpunkten (Umgebung), 43 Höhenpunkten. Instrumentierung von 2 Kontrollgängen mit ca. 120 Konsolen, Länge ca. 7 km (Netzmessung) Total wurden 45 Einsätze (inkl. Zwischenmessungen) durchgeführt. Durch die grossen Deformationen wurde der Atatürk Damm während dem Einstau zweimal pro Jahr gemessen (1991 bis 2007).
Instrumente:	Leica T3000, DI3000, Leica DNA03, 30 Leica Präzisionsreflektoren; 4 Ausrüstungen Leica GPS System 200 Messung der Anlage zusammen mit DSI Team in nur 17 Tagen; Registrierung: Winkelmessungen/Distanzen auf Notebook Panasonic CF-18; Auswertung der Messung und Berichterstattung mit Verformungsdiagrammen und Tabellen
Info:	<a href="https://www.Devlet Su İşleri.gov.tr">https://www.Devlet Su İşleri.gov.tr</a>
<b>1998 - 2006</b>	<b>Bogenstaumauer Enguri, West-Georgien</b> nahe der Grenze zu Abchasien, am Enguri Fluss
Auftraggeber:	Europäische Bank für Wiederaufbau- und Entwicklungshilfe EBRD und DEZA Schweiz Die Vermessungsarbeiten wurden neu an Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG vergeben.
Bauzeit:	1968 – 1988, Erneuerung 1998 – 2006 (mit Vermessung); Wegen der mangelhaften Instandhaltung gingen jährlich 500 Mio. Kilowattstunden verloren. Das KW kann nur 40% der Leistung produzieren. Nach dem Bürgerkrieg 1998 bis 2006 wurde das Kraftwerk für über 196 Mio. US-Dollar repariert und gleichzeitig eine Leistungserhöhung erreicht.
Typ:	Doppelt gekrümmte Bogenstaumauer, 9 Kontrollgänge
Höhe/Länge:	271.5 m; Kronenlänge 750 m; Bauwerksvolumen: 4 Mio. m <sup>3</sup>
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie 1'300 MW
Leistungen:	Installation des geodätischen Überwachungsnetzes mit ca. 16 Vermessungspfeilern; Instrumentierung von 5 Kontrollgängen mit Konsolen und Lotungen für die Anschlüsse an die Vermessungspfeiler
Instrumente:	Leica TC2002, Leica DNA03, ca. 30 Leica Präzisions-Reflektoren
<b>2004 - 2015</b>	<b>Bogenstaumauer Deriner, Nordosten der Türkei</b> , nahe der Grenze zu Georgien, Kaskadenstauwerke am Çoruh Fluss
Auftraggeber:	DSI Devlet Su İşleri General Müdürlüğü, Ankara
Bauzeit:	1998 – 2012, Vermessung: 2002 bis 2015
Typ:	Doppelt gekrümmte Bogenstaumauer; ist die höchste Talsperre der Türkei und eine der zehn höchsten der Welt (2020)



Höhe/Länge:	249 m; Kronenlänge 720 m; Kronenbreite 12 m – 18 m; Bauwerksvolumen 3.5 Mio. m <sup>3</sup>
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie 670 MW
Leistungen:	Pfeilernetz mit 22 Vermessungspfeilern, 15 Pfeilern auf den Balkonen für die Anschlüsse in die Galerien an das Aussennetz und Mauerkrone, 85 Konsolen in den 4 Kontrollgängen, 66 Kontrollpunkten in den Widerlagern und für die Hangstabilität (L/R Bermen) und 22 Kontrollpunkten für die Überwachung der Betonstrukturen. 96 Höhenkontrollbolzen (Präzisionsnivellement) 6.9 km über 15 Balkonpfeiler ans Aussennetz; Die Deformationsmessungen wurden zweimal pro Jahr mit Zwischenmessungen durchgeführt.
Instrumente:	Leica TDM5005, Leica DNA03, 30 Leica Präzisions-Reflektoren
Info:	<a href="https://www.deriner dam">https://www.deriner dam</a>
<b>2005 - 2011</b>	<b>Wasserkraftwerkanlage Nam Ngum 2, Laos</b> PDR, am Mekong zur Grenze nach Thailand
Auftraggeber:	Ch. Karnchang Public Company Ltd. / South-East Asia Energy, Laos; bis 2009 durch Electrowatt-Energy Management
Typ:	Betonstaumauer; Concrete face rockfill dam (CFRD)
Höhe/Länge:	185 m; Kronenlänge 470 m; Bauwerksvolumen 9 Mio. m <sup>3</sup>
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie 615 MW
Leistungen:	Pfeilernetz mit 12 Vermessungspfeilern und 60 Objektpunkten für die Überwachung der Deformationen; Präzisionsnivellements, Absteckungen und Bauvermessung
<b>2007 - 2010</b>	<b>Erneuerungsprojekte, Sicherheitsstudie Drin und Mat Fluss-Kaskaden, Albanien</b>
	In den Jahren 1952 – 1988 wurden in Albanien an den Flüssen Drin und Mat Kaskaden-Kraftwerke gebaut. Die 6 Kraftwerkanlagen wurden sehr mangelhaft unterhalten und Sanierungsarbeiten für die Sicherheit waren dringend notwendig. Durch das SECO Schweiz (Staatssekretariat für Wirtschaft) wurde eine Ausschreibung für die Ertüchtigung der alten Kraftwerke erstellt. Die Elektrowatt Ingenieurunternehmung Schweiz wurde mit den Projektarbeiten für die Abklärung der Machbarkeit beauftragt. Die Vermessungsabteilung erstellte nach der Besichtigung der Kraftwerksanlagen die Ausschreibungsdokumente inkl. Budget für die Erneuerung der Kraftwerke zum sicheren Betrieb.
	Vgl. auch Anhang 2.5: Ausführungen BSF Swissphoto AG 2012 - 2018
Auftraggeber:	SECO Schweiz und KESH Albanien
Leistungen:	Kraftwerke am Drin River: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betonstaumauer <b>Fierze</b>: 177 m hoch; Kronenlänge 380 m; Dammvolumen 8 Mio. m<sup>3</sup>; 9 Pfeiler, 18 Messpunkte auf dem Damm, 10 Nivellierpunkte</li> <li>- Betonstaumauer <b>Koman</b>: 100 hoch; Kronenlänge 250 m; Dammvolumen 5 Mio. m<sup>3</sup>; 9 Pfeiler, 16 Messpunkte, 11 Nivellierpunkte</li> <li>- <b>Vau I Dejes</b>: 4 Dämme bis 46 m hoch; Kronenlängen bis 79 m</li> </ul>

Leistungen:	Kraftwerke am Mat River: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betonstaumauer <b>Ulza</b>: 65 m hoch; Kronenlänge 260 m; 7 Pfeiler, 20 Messpunkte auf der Staumauer, 13 Nivellierpunkte</li> <li>- Betonstaumauer <b>Shkopeti</b>; 52 m hoch; Kronenlänge 88 m; 9 Pfeiler, 19 Messpunkte auf der Staumauer, 10 Nivellierpunkte</li> </ul>
<b>2015 - 2021</b>	<b>Wasserkraftwerkanlage Nam Theum 1, Laos</b> PDR, am Nam Kading River, ca. 33 km vom Mekong entfernt
Auftraggeber:	Ch Karnchang Public Company Ltd. / South-East Asia Energy Ltd. und Nam Theum Power Co. Ltd in Laos
Typ:	Gekrümmte Gewichtsstaumauer (RCC) in einer Schlucht
Höhe/Länge:	177 m; Wasserzufuhr durch 610 m langen Druckstollen
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie 650 MW
Leistungen:	Grundlagenvermessungsnetz mit 10 Vermessungspfeilern; Überwachung der Deformationen, Präzisionsnivellements, Absteckungen und Bauvermessung
<b>2016 - 2021</b>	<b>Wasserkraftwerkanlage Xayaburi Damm, Laos</b> PDR, am Mekong zur Grenze nach Thailand
Auftraggeber:	Ch Karnchang Public Company Ltd. / South-East Asia Energy, Ltd. Laos; Services durch AFRY Energy-Management
Typ:	Betonstaumauer (Wehr)
Höhe/Länge:	46 m (der Wasserspiegel wird um 32 m angehoben); Kronenlänge 820 m; Bauwerksvolumen 2.5 Mio. m <sup>3</sup> ; Baukosten 2.7 Mia. Euro
Zweck:	Erzeugung von elektrischer Energie 1'260 MW. 95% nach Thailand
Leistungen:	Pfeilernetz mit 15 Vermessungspfeilern und 80 Objektpunkten für die Überwachung der Deformationen; Präzisionsnivellements, Absteckungen und Bauvermessung
<i>Zusammengestellt von René Huser, EWI bzw. Pöyry Schweiz AG</i>	

Anhang 2.3 Stauanlagen im Ausland, an denen die Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG (später Pöyry Schweiz AG bzw. AFRY Schweiz AG) seit 1970 tätig ist

Die **Straub AG** war im Ausland bei den nachfolgenden Stauanlagen mit Vermessungsaufgaben (Bauherrenunterstützung und Kontrollen) beteiligt:

**1976 - 1983 Pueblo Viejo-Damm, Guatemala**

Der Pueblo Viejo-Damm ist der grösste Damm des Wasserkraftwerkes Rio Chixoy Medio des Instituto De Electrificación (INDE). Dieses liegt rund 200 Strassenkilometer nördlich der Hauptstadt auf der Grenze der drei Provinzen Alta Verapaz, Baja Verapaz und Quiché. Der Damm staut das Wasser der Flüsse Chixoy, Salamä und Carchelä und bildet einen See von 40 km Länge.

Auftraggeber: Consorcio LAMI (Lahmeyer International/D, Motor-Columbus/CH, IEC0/USA)

Einweihung: 1983

Typ: Steinschüttdamm, Schüttvolumen von 3.2 Mio. m<sup>3</sup>

Höhe/Länge: 110m hoch;

Zweck: Energieproduktion

Leistungen: Gesamte Grundlagen- und Bauvermessung, inkl. Triangulationsnetz für alle Stollen; Überwachungs- und Deformationsmessungen.  
Schulung des einheimischen Personals

Instrumente: Wild T2, Wild DI3S, Wild NA2

Info: Artikel von René Bélat, Straub AG in «Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik» 12/83, S. 437-441

**1980 - 1982 Staumauer Derbendi-Khan, Irak**

Nachrüstung des russischen Schwergewichts-Schüttdammes während des Krieges Iran/Irak im Grenzgebiet, Auftrag des irakischen Energieministeriums

Leistungen: Bauwerksüberwachung, Triangulation, terrestrische Präzisions-Photogrammetrie plus Unterwasservermessung (Not-Grundablass)

Instrumente: Wild P31/Filmglasplatten, Wild T2, Wild DI3S

**1980 - 1984 Staumauer El Cajon, Honduras**

Die El-Cajon-Talsperre ist die grösste Talsperre in Honduras. Sie ist auch unter dem Namen «Represa Hidroeléctrica Francisco Morazán» bekannt.

Die Talsperre staut den Rio Comayagua im Nordwesten von Honduras.

Einweihung: 1985

Typ: Bogenstaumauer

Höhe/Länge: 234 m

Zweck: Energieproduktion

Leistungen: Grundlagen- und Bauvermessung; weiträumiges Triangulationsnetz inkl. alle Stollen im Karstgebiet; Überwachungs- und Deformationsvermessung.  
Schulung des einheimischen Personals.

Instrumente: Wild T2, Wild DI3S, Wild NA2

**1980 - 1986 Mosul Staudamm, Irak**

Der 1986 fertiggestellte Staudamm ist ein Erddamm mit eingebautem Ton-Kern. Seine Länge beträgt 3'600 m, die Breite des Dammfusses beträgt 700 m und seine Höhe 135 m. Der Tigris wird über fast 100 km gestaut. Der Stausee hat einen Stauinhalt von mehr als 12 Milliarden m<sup>3</sup> und erzeugt Energie für 1.7 Millionen Einwohner.

Einweihung: 1986

Typ: Erddamm

Höhe/Länge: 135 m; Länge 3'600 m

Zweck: Energieproduktion

Leistungen: Grundlagen- und Bauvermessung; weiträumiges Triangulationsnetz

Instrumente: Wild-Instrumente

**1996 - 2000 Staumauer Casecanan, Philippinen**

Die Anlage Casecanan nutzt das Wasser der ca. 250 km nördlich der Hauptstadt Manila gelegenen Flüsse Taan und Casecanan.

Die Ausbauwassermenge der Anlage beträgt 80 m<sup>3</sup>/s für eine maximale Generatorenleistung von 160 MW. Das Wasser wird dem bestehenden Speicherbecken Pantabangan zugeführt, welches zur Energieproduktion und zu Bewässerungszwecken dient.

Einweihung: 2001

Typ: Gewichtstaumauer

Höhe/Länge: 2 Mauern mit einer Höhe von 30 m resp. 12 m; Kronenlänge 90 m resp. 120 m

Zweck: Energieproduktion und Bewässerung

**seit 2009 Rio Taquesi, Bolivien**

Das Taquesi Flussprojekt wurde in den Jahren 2000-2002 gebaut. Seitdem sind die beiden Stufen Chojlla und Yanachi in Betrieb.

Aufgrund von Schäden an der Kraftwerksanlage wurde ein Vermessungsnetz realisiert, mit welchem sämtliche oberirdischen – sowie zum Teil auch die unterirdischen – Bauten auf Deformationen hin überwacht werden. Unter spezieller Überwachung steht die Druckleitung im Gefälle von 2'500 m auf 1'970 m.ü.M.

Mit Hilfe von lokalen Mitarbeitern wird seit 2009 jährlich eine Folgemessung durchgeführt.

Einweihung: 2002

Typ: Wehre, Druckleitung, Kraftwerke

Zweck: Energieproduktion

*Zusammengestellt von Markus Gassmann, Straub AG;  
ergänzt durch René Haag, von 1976 bis 1990 Straub AG Chur, Ilanz, Baden*

Anhang 2.4 Stauanlagen im Ausland, an denen die Straub AG seit 1976 tätig ist

Die **BSF Swissphoto AG** war in Albanien bei den nachfolgenden Stauanlagen mit Vermessungsaufgaben engagiert:

### 2012 - 2018 Geodätische Überwachung von Staumauern und -dämmen an den Flüssen Drin und Mat, Albanien

In den 1950er und 1960er Jahren wurden in Albanien an den Flüssen Drin und Mat mit Unterstützung Chinas Kaskaden-Kraftwerke gebaut. Die zugehörigen Staumauern und Dämme wurden sehr mangelhaft unterhalten und es waren keine geodätischen Deformationsüberwachungen eingerichtet worden. Durch das SECO Schweiz (Staatssekretariat für Wirtschaft) wurde im 2012 eine Ausschreibung für die Einrichtung von geodätischen Deformationsüberwachungen veröffentlicht.

Vgl. auch Anhang 2.3: (Vorprojekte für die spätere Ausführung) Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG bzw. Pöyry Schweiz AG, 2007 - 2010

Auftraggeber: SECO Schweiz und KESH Albanien

Leistungen: Kraftwerke am **Drin River**:

Einrichten Deformationsmessung und Nullmessung: Oktober 2012

1. Folgemessung: April 2013

2. Folgemessung: April 2018

- Betonstaumauer **Fierze**: 177 m hoch; Kronenlänge 380 m; Dammvolumen 8 Mio. m<sup>3</sup>; 10 Pfeiler, 18 Messpunkte auf Betonfundamenten, 10 Nivellierpunkte und 17 Reflektorbolzen
- Betonstaumauer **Koman**: 100 hoch; Kronenlänge 250 m; Dammvolumen 5 Mio. m<sup>3</sup>; 9 Pfeiler, 18 Messpunkte auf Betonfundamenten, 14 Nivellierpunkte und 13 Reflektorbolzen, 4 Permanentreflektoren, 8 Zieltafeln
- **Vau I Dejes**: 4 Dämme bis 46 m hoch; Kronenlängen bis 79 m; 14 Pfeiler, 33 Messpunkte auf Betonfundamenten, 28 Nivellierpunkte und 13 Reflektorbolzen, 1 Zieltafel

Leistungen: Kraftwerke am **Mat River**:

Einrichten Deformationsmessung und Nullmessung: Oktober 2012

1. Folgemessung: April 2013

- Betonstaumauer **Ulza**: 65 m hoch; Kronenlänge 260 m; 6 Pfeiler, 1 Messpunkt auf Betonfundament, 17 Nivellierpunkte, 4 Reflektorbolzen, 18 Zieltafeln
- Betonstaumauer **Shkopeti**; 52 m hoch; Kronenlänge 88 m; 6 Pfeiler, 17 Nivellierpunkte, 14 Reflektorbolzen, 1 360°-Prisma

*Zusammengestellt von Mario Studer, BSF Swissphoto AG*

Anhang 2.5 Stauanlagen in Albanien, an denen die BSF Swissphoto AG von 2012 bis 2018 beteiligt war

Die **Geosat SA** hat im Ausland an folgenden Stauanlagen Beratungen und geodätische Deformationsmessungen ausgeführt:

**2013 - 2017 Inga-Staudamm I, Demokratische Republik Kongo /  
Barrage de INGA 1, République démocratique du Congo**

Laufwasserkraftwerk an den Inga-Fällen des Kongo-Flusses

Einweihung: Inga I wurde 1972 in Betrieb genommen.  
Ab 2005 erfolgte eine Instandsetzung der Wasserkraftwerke Inga 1 und 2.

Höhe/Länge: 45 m; Kronenlänge 320 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie (58.5 MW installierte Leistung)

Leistungen: Mise en place du réseau géodésique et choix de la matérialisation ;  
Définition du matériel de mesures ; Mesures de l'état 0, 1 et 2  
Formation du personnel local et transfert de connaissances.

**2013 - 2017 Inga-Staudamm II, Demokratische Republik Kongo /  
Barrage de INGA 2, République démocratique du Congo**

Laufwasserkraftwerk an den Inga-Fällen des Kongo-Flusses

Einweihung: Inga II wurde 1982 in Betrieb genommen.  
Ab 2005 erfolgte eine Instandsetzung der Wasserkraftwerke Inga I und II.

Höhe/Länge: 50 m; Kronenlänge 200 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie (178 MW installierte Leistung)

Leistungen: Mise en place du réseau géodésique et choix de la matérialisation ;  
Définition du matériel de mesures ; Mesures de l'état 0, 1 et 2  
Formation du personnel local et transfert de connaissances.

**2015 - 2016 Cambambe-Talsperre, Angola / Barrage de Cambambé, Angola**

Die Talsperre staut den Fluss Cuanza bei Dondo und versorgt die Hauptstadt Luanda mit Strom; gleichzeitig bewässert der Fluss das Tal des Cuanza.

Bauzeit: 1958 - 1962; Einweihung 1963; Ausbau und Instandsetzungen bis 2017

Typ: Gewichtsmauer

Höhe/Länge: 132 m; Kronenlänge 300 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie (960 MW) und Bewässerung

Leistungen: Mise en place du réseau géodésique et choix de la matérialisation ;  
Définition du matériel de mesures ; Mesures de l'état 0  
Formation du personnel local et transfert de connaissances.

**seit 2017 Nurek-Staudamm, Tadschikistan / Barrage de Nurek, Tadjikistan**

Der Staudamm am Stadtrand von Norak staut den Fluss Wachschi / Vakhch östlich der Hauptstadt Duschanbe; nach Jinping I (305 m) die 2021 zweithöchste künstliche Talsperre der Erde

Bauzeit: 1961 – 1980

Typ: Steinschüttdamm mit Kerndichtung aus Lehm/Ton;  
Bauwerksvolumen 54/58 Mio. m<sup>3</sup>

Höhe/Länge: 300 m; Kronenlänge 704 m

Zweck: Erzeugung von elektrischer Energie (2'700 bzw. 3'000 MW installierte Leistung) und  
Bewässerung von 650'000 ha landwirtschaftlicher Fläche

Leistungen: Mise en place du réseau géodésique et choix de la matérialisation ;  
Définition du matériel de mesures ; Mesures de l'état 0  
Formation du personnel local et transfert de connaissances.

*Zusammengestellt von Christian Hagin, Geosat SA (sowie Angaben aus Wikipedia)*

Anhang 2.6 Stauanlagen im Ausland, an denen die Geosat SA seit 2013 tätig ist