Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 3

Artikel: Beiträge der Geodäsie zur Sicherheit der Talsperren in der Schweiz
Autor: Wiget, Adrian / Sievers, Beat / Walser, Felix
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1050001

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.02.2026

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

Beiträge der Geodäsie zur Sicherheit der Talsperren in der Schweiz

Adrian Wiget, Beat Sievers, Felix Walser

Zusammenfassung

Geodätische Deformationsmessungen werden in der Schweiz seit über 100 Jahren zur Überwachung von Stauanlagen erfolgreich eingesetzt. Sie ermöglichen es, allfällige Verschiebungen und Verformungen der Talsperren sowie des Umgeländes mit hoher Präzision und Zuverlässigkeit gegenüber einem absoluten Referenzrahmen zu bestimmen. Verbunden mit anderen Einrichtungen zur Verformungsmessung tragen geodätische Methoden entscheidend zur Ermittlung des Talsperrenverhaltens und zur Beurteilung aussergewöhnlicher Situationen oder Verhaltensanomalien der Stauanlagen und damit zu deren Sicherheit bei.

Der Beitrag erläutert die Aufgaben und Anforderungen der Talsperrenvermessungen. Die bewährten Methoden der Geodäsie, deren Auswertung sowie neuere instrumentelle Entwicklungen werden beschrieben und mögliche methodische und technologische Entwicklungen aufgezeigt.

Résumé

Les mesures géodésiques de déformation sont utilisées avec succès en Suisse pour la surveillance des barrages depuis plus de 100 ans. Elles permettent de déterminer avec une grande précision et fiabilité, par rapport à un cadre de référence absolu, les éventuels déplacements et les déformations des barrages ainsi que du terrain environnant. Associées à d'autres dispositifs de mesure de déformations les méthodes géodésiques contribuent de manière décisive à la détermination du comportement des barrages et à l'évaluation des situations exceptionnelles ou des anomalies de comportement des ouvrages d'accumulation, et donc à leur sécurité.

L'article explique les tâches et les exigences des levés de barrages. Les méthodes éprouvées de la géodésie, leur évaluation ainsi que les développements instrumentaux récents sont décrits et les développements méthodologiques et technologiques possibles sont indiqués.

1. Aufgaben und Anforderungen der Talsperrenvermessung

Gemäss der vom Bundesamt für Energie herausgegebenen «Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen» sind die geodätischen Messungen integraler Bestandteil der Überwachung von Talsperren. Verbunden mit anderen Messeinrichtungen für Verformungsmessungen tragen sie bei zur:

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

Die geodätischen Messungen können als alleiniges Verfahren zur Bestimmung des Verformungs- und Verschiebungsverhaltens von Staumauern und Staudämmen sowie ihres Umgeländes eingesetzt werden. Meist gelangen sie jedoch komplementär zu anderen Messsystemen wie Loten zum Einsatz, um Lage- und Höhenänderungen von ausgewählten Punkten einer Stauanlage zu bestimmen und dadurch eine Redundanz im gesamten Überwachungskonzept zu erreichen. Die einbezogenen Kontrollpunkte können auf der Krone und auf verschiedenen Höhen an der luftseitigen Oberfläche der Talsperre, bei gegebener Zugänglichkeit auch im Innern der Anlage (z. B. Bezugspunkte von Loten oder Polygonzügen in Kontrollgängen), in den Widerlagern und im unmittelbaren Umgelände sowie in der weiteren Umgebung der Talsperre ausserhalb deren Druckzone liegen. Schliesslich können auch kritische Geländepartien wie Rutschhänge oder Gletscher im Gefährdungsgebiet der Stauanlage überwacht werden. Die Grössenordnung der Genauigkeitsansprüche ist in der *Tabelle 1* zusammengefasst.

Die Untergruppe Geodäsie der Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK hat für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessungen bei Stauanlagen detaillierte Empfehlungen erarbeitet *(STK/CSB, 2013)*. Langjährig zuverlässige Deformationsmessungen mit Millimetergenauigkeit sind ein komplexes und anspruchsvolles Anwendungsgebiet der Ingenieurgeodäsie; die Beobachtungen sind zudem zeitaufwändig. Sie müssen von Fachpersonen durchgeführt und ausgewertet werden, welche die erforderlichen Kompetenzen und Erfahrungen haben und über das notwendige, qualitativ hochwertige und geprüfte Instrumentarium verfügen *(Walser, 2014)*. Zudem sind neben bautechnischem Wissen über ein mögliches Verhalten von Stauanlagen auch das Verständnis für geologische und geotechnische Aspekte notwendig. Im Verbund mit den Kontrollver-

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	5 – 10 mm

Tabelle 1: Grössenordnung der erforderlichen Genauigkeiten (empirische Standardabweichung).

fahren und Messmethoden der Werksbetreiber wie den visuellen Kontrollen, Klinometer-, Extensometer- und Lotmessungen des mit der Überwachung der Staumauer betrauten Personals, welche das geometrische Verhalten des Bauwerkes in sich überwachen, liefert die Geodäsie Grundlagen zur Bestimmung der Verformungen und Bewegungen der Talsperre. Diese dienen der Beurteilung der Gleitsicherheit sowie dem Nachweis der Standfestigkeit der Talsperre durch die zuständigen Experten für Bau und Geologie. Als Komponente der Sicherheitsüberprüfung der Stauanlagen erfolgen die geodätischen Messungen in der Regel mindestens alle fünf Jahre. Die Berichte über die geodätischen Deformationsmessungen werden deshalb als Teil der Aktensammlung über die Stauanlage geführt.

2. Bewährte Methoden und Instrumente der Geodäsie

Geodätische Deformationsmessungen an Stauanlagen haben in der Schweiz eine mehr als 100-jährige Geschichte *(Wiget et al., 2021; Wiget, 2022)*. Das älteste Überwachungsverfahren an Talsperren ist das **geometrische Alignement**. Ab einem als fix angenommenen Messpfeiler wird durch Zielung mit dem Alignierinstrument auf eine Referenzmarke (Mire) eine vertikale Ebene aufgespannt. Durchs Fernrohr des Instruments werden die horizontalen Abstände der Alignementspunkte auf der Mauerkrone (signalisiert durch Alignierzielzeichen oder mittels eines Messstabes) von dieser vertikalen Ebene gemessen.

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von Alignementsbeobachtungen waren infolge von Refraktionserscheinungen und unkontrollierten Beobachtungspfeilern eingeschränkt. Anlässlich des Baus der Staumauer Montsalvens (FR), der ersten doppelt (horizontal und vertikal) gekrümmten Bogenstaumauer Europas, schlugen Ingenieure der Eidg. Landestopographie (L+T, heute swisstopo) 1921 die Anwendung von **trigonometrischen Methoden** der Landesvermessung vor: Richtungs- und Winkelmessungen (Triangulation) sowie Präzisionsnivellements. Dabei wurden an der luftseitigen Mauerfläche eingelassene Zielbolzen durch wiederholtes «Vorwärtseinschneiden» mit Theodoliten von (mindestens) zwei ausserhalb des Bauwerkes gelegenen Beobachtungspfeilern aus eingemessen, gemeinsam mit weiter entfernt liegenden Referenzpunkten («Fixpunkten»). Zur Festlegung des Netzmassstabes musste zudem die Distanz zwischen den Messpfeilern bestimmt werden. Nebst horizontalen Lagebeobachtungen konnten die Zielbolzen mittels Höhenwinkelmessungen auch vertikal überwacht werden. Die ersten Messungen fanden in Montsalvens im Januar 1921 vor dem Einstau und im November 1921 bei vollem See statt.

Bereits 1922 wurden geodätische Deformationsmessungen auch an der Staumauer Pfaffensprung (UR) eingesetzt. 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. Wie praktisch alle Beobachtungsanlagen der Pionierzeit wurde auch das Überwachungsnetz Pfaffensprung im Laufe der Jahre erweitert. Den Stand des Netzes 1932 zeigt *Bild 1*. Das Bild stammt aus dem Bericht der Schweizerischen Talsperrenkommission *(STK, 1946)*, in dem die «Messungen, Beobachtungen und Versuche an Schweizerischen Talsperren 1919–1945» äusserst umfangreich und in vorbildlicher Weise dokumentiert sind.

In der ersten Epoche des Schweizer Talsperrenbaus bis Mitte des 20. Jahrhunderts hat die Eidg. Landestopographie in der Schweiz als einzige Institution geodätische Deformationsmessungen an Stauanlagen durchgeführt. Mit dem Aufschwung im Schweizer Talsperrenbau ab 1950 wurden die geodätischen Methoden der Talsperrenüberwachung auch an den Technischen Hochschulen in Zürich und Lausanne gelehrt und weiterentwickelt. Dementsprechend wurden zunehmend auch Ingenieure privater Ingenieurbüros mit diesen Arbeiten beauftragt, was schliesslich wegen der grossen Anzahl der zu überwachenden Objekte unerlässlich wurde.

Die Geodäsie wird seit den Anfängen bei allen grossen Staumauern der Schweiz eingesetzt. Die Methoden wurden stetig weiterentwickelt und der technologischen Entwicklung angepasst, wobei immer der Kontinuität der langjährigen Messreihen Rechnung getragen wurde. Einerseits erforderten die immer grösseren Talsperren auch grössere Messnetze. Andererseits wurden bestehende Netze erweitert und die Anzahl der gut fundierten Beobachtungspfeiler erhöht; beispielsweise um die Stabilität der Pfeiler besser überwachen zu können. Zumindest einige der Beobachtungspfeiler sind ausserhalb des Einflussbereichs der Staumauer und von deren Druckzone möglichst entfernt errichtet, mit Vorteil luft- und wasserseits der Talsperre. Die Messungen erfolgen somit vom «Festen» auf das «sich Verändernde» und ergeben «absolute» Verschiebungen bezüglich des gewählten Referenzrahmens. Während in den Anfängen noch kurzfristige, differen-

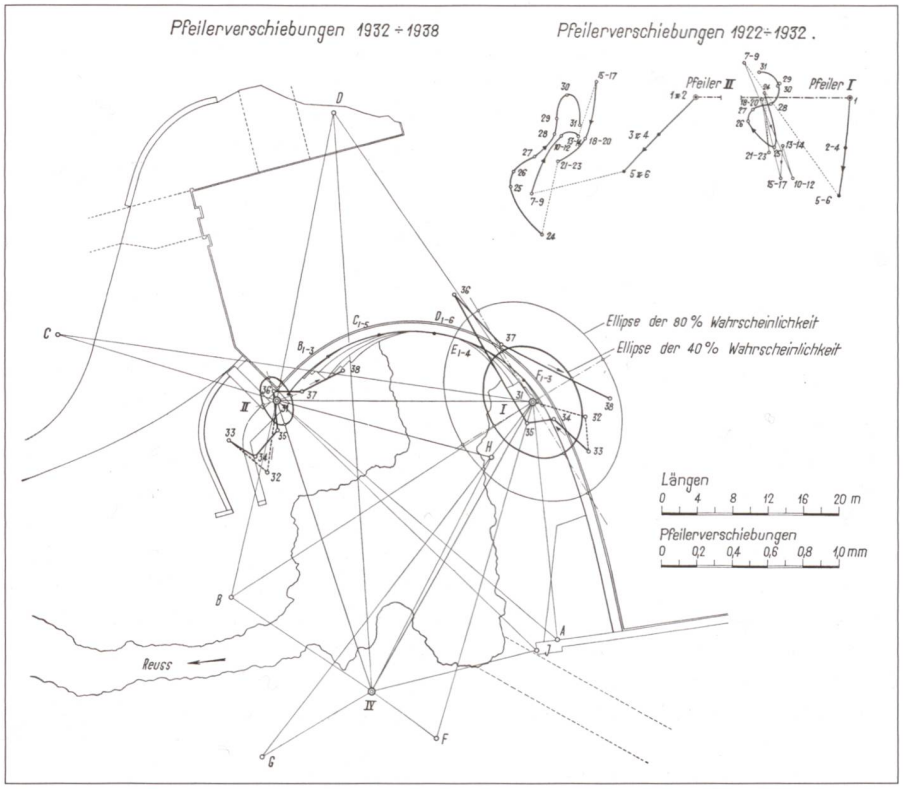

Bild 1: Netzplan der erweiterten Beobachtungsanlage Pfaffensprung und geodätisch bestimmte Pfeilerverschiebungen 1922–1932 bzw. 1932–1938 mit Konfidenzellipsen (Quelle: STK, 1946).

Bild 2: Präzisionsnivellement in der Nähe der Staumauer Contra (TI) (Bild: Schneider Ingenieure AG).

zielle Bewegungen zwischen zwei Epochen im Vordergrund standen, werden die heutigen Messungen für langfristige Untersuchungen ausgelegt.

Zur Überwachung der ebenfalls interessierenden Höhenänderungen (Setzungen, Hebungen) der Talsperren oder einzelner Mauerteile sowie der Felspartien in ihrem Bereich werden **Präzisionsnivellements** gemessen, in Ergänzung zu den bereits erwähnten trigonometrischen Höhenwinkelmessungen. Die Nivellements, welche eine höhere Genauigkeit als die trigonometrisch bestimmten Höhenänderungen aufweisen, führen meist von einer Talseite über die Krone auf die andere Seite, werden aber auch in Kontrollgängen innerhalb der Talsperre gemessen. Die Höhenreferenzpunkte liegen nach Möglichkeit in Felszonen ausserhalb der Druckeinflüsse durch die unterschiedlichen Wasservolumen des Stausees, bei Bedarf sogar in weiter entfernt liegenden geologisch stabilen Zonen *(Bild 2)*.

Noch heute bilden die «klassischen» Methoden (Trigonometrie und Nivellement) das Rückgrat der geodätischen Deformationsmessungen an Talsperren. Doch bezüglich der Messinstallationen (z. B. Pfeiler und Zielbolzen) und des Instrumentariums (Theodolite, Nivellierinstrumente, Zwangszentrierung usw.) wurde die geodätische Methode stetig weiterentwickelt. Ab den 1970er Jahren haben die Entwicklungen in der Elektronik und im Instrumentenbau zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeiten der geodätischen Deformationsmessungen beigetragen. Der grösste Schritt war die Entwicklung der **elektrooptischen Distanzmessung**. Zuvor wurden die Distanzen zwischen den Messpfeilern mit Hilfe von Invar-Basislatten bestimmt. In Polygonzügen über die Mauerkrone und in den Kontrollgängen werden zum Teil noch bis heute Invardrähte eingesetzt. Ab 1973 kamen elektrooptische Präzisionsdistanzmessgeräte der höchsten Genauigkeitsklasse (z. B. Kern Mekometer ME3000 und ME5000) auf den Markt. Sie ermöglichen das Messen von Distanzen im Nahbereich oder im Innern der Talsperren im Submillimeterbereich; bei sorgfältiger Erhebung repräsentativer Meteo-Parameter auch über einige Kilometer im äusseren, erweiterten Netz im Millimeterbereich. Diese Instrumente überzeugten nicht nur dank der hohen Messgenauigkeit, sondern auch dank der relativ kurzen Messzeit von wenigen Minuten. Heute ermöglichen moderne elektronische Tachymeter oder Totalstationen, also Theodolite mit eingebautem Distanzmesser, ähnliche Genauigkeiten mit noch kürzeren Messzeiten.

Der Einzug der **Elektronik** brachte weitere wichtige Neuerungen bei den geodätischen Instrumenten: Automatische Horizontierung und Berücksichtigung der Stehachsschiefe sowie elektronische Teilkreisablesung bei Tachymetern; automatisierte Lattenablesungen bei Digitalnivellieren; Unterstützung der Erfassung der Messwerte mittels externer Software; Registrierung der Messdaten auf internen oder externen Datenträgern usw. Die Instrumente neuster Generation ermöglichen dank Entwicklungen wie der Motorisierung und dem automatischen Anzielen von Reflektoren raschere und bequemere Messungen, was sich wiederum positiv auf die Genauigkeit auswirken kann. Zudem ermöglichen sie automatisierte Messanlagen zur kontinuierlichen Überwachung der Stauanlagen und ihrer Umgebung, sog. geodätische Monitoringsysteme oder Geomonitoring (siehe *Kapitel 4*).

Seit Ende der 1980er Jahre werden die terrestrischen Messungen durch GPS-Messungen ergänzt, welche heute unter Einbezug aller verfügbaren globalen Navigationssatellitensysteme als **GNSS-Messungen** bezeichnet werden. Da diese keine Sichtverbindung zwischen den zu vermessenden Punkten erfordern, können die äusseren Messnetze auf weiter entfernte Referenzpunkte in geologisch stabilen, von der Stauanlage unbeeinflussten Zonen erweitert und die Langzeitverschiebungen im Gebiet der Talsperren im dreidimensionalen, kontrollierten Referenzrahmen im Bereich weniger Millimeter überwacht werden.

Vorteile und Qualitäten der Geodäsie

- Die Messmethoden sind von der Netzanlage über die Instrumentierung, Signalisierung und Durchführung der Messungen bis hin zur Auswertung sehr flexibel und können situativ an die verschiedenen Talsperrentypen und die lokalen Verhältnisse angepasst werden.
- Die Geodäsie ermöglicht die Bestimmung absoluter Bewegungen der Talsperren und ihres Umgeländes in Bezug zur näheren und weiteren Umgebung und bei entsprechender Ausweitung der Messnetze auch zu regionalen oder nationalen Referenzrahmen in geologisch stabilen bzw. gut untersuchten Zonen.
- Bewegungen der Talsperren können selbst dann erfasst werden, wenn sie nicht mit Neigungs- oder Spannungsänderungen verbunden sind.
- Die Messungen sind ein-, zwei- oder dreidimensional und die Deformationen können entsprechend analysiert werden.
- Kurzfristige (elastische) Veränderungen, beispielsweise anlässlich des Ersteinstaus, können ebenso bestimmt werden wie langfristige Phänomene (z. B. Setzungen, Hebungen infolge Betonveränderungen) oder bleibende Deformationen und Trends in Messreihen über Jahrzehnte, auch bei veränderter Methodik und erneuertem Instrumentarium.

Insbesondere bei grossen Stauanlagen werden die geodätischen Messungen in **Kombination mit anderen Messsystemen** wie Loten, Extensometern, Rissmessungen usw. eingesetzt. Diese liefern in der Regel relative Verschiebungen und Verformungen, während mit der Geodäsie absolute Verschiebungen bezüglich den erwähnten Referenzrahmen in Lage und Höhe gemessen werden. Für die Interpretation des Verhaltens der Stauanlage und ihres Untergrunds ist daher eine optimale Verknüpfung der sog. «inneren» und «äusseren» Messsysteme unerlässlich, unter Beachtung der örtlichen Lage sowie der zeitlichen Durchführung der Messungen (Zeitpunkt, Häufigkeit), bei sorgfältiger Registrierung der jeweiligen Umgebungsbedingungen wie Wasserstand oder Luft- und Betontemperaturen. So sollen beispielsweise Lotbezugspunkte (Setzplatten und Aufhängepunkte) direkt oder indirekt ins geodätische Messnetz einbezogen werden. Schliesslich können auch geophysikalische und geotechnische Messinstallationen wie Gleitmikrometer oder -deformeter, Bohrlochextensometer usw. an die geodätischen Netze angeschlossen werden.

3. Auswertung und Deformationsanalyse

Die geodätischen Deformationsmessungen haben üblicherweise zum Ziel, das kinematische Verhalten eines Bauwerks oder einer Geländepartie mittels Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitepochen zu erfassen, daraus allfällige Lage- und Höhenänderungen mit den dazugehörigen Genauigkeitsangaben zu berechnen und die Differenzen oder Bewegungen in geeigneter Art zu beschreiben. Dabei kann die Fragestellung bezüglich der zu untersuchenden Kinematik unterschiedlich sein. Beispielsweise können die relativ kurzfristigen Bewegungen oder reversiblen Verformungen der Stauanlage im Rahmen eines Aufstaus oder einer Absenkung des Stausees von Interesse sein, oder es ist die langfristige Stabilität der Stauanlage über Jahrzehnte zu prüfen. Die Fragestellung beeinflusst auch die zu beachtenden Rahmenbedingungen, unter denen die Messungen durchgeführt und wie sie ausgewertet werden.

Die ersten trigonometrischen Messungen mussten noch «von Hand» ausgewertet werden, mit relativ einfachen funktionalen Modellen oder mit grafischen Methoden. Die digitale Registrierung (bei automatischen Messeinrichtungen sogar die Online-Übertragung in die Auswertesoftware) und die elektronische Datenverarbeitung ermöglichen heute eine raschere und weniger fehleranfällige Auswertung der geodätischen Messungen sowie die Ausgleichung umfangreicher Messnetze. Diese sowie die anschliessende Deformationsanalyse lassen sich grob in folgende Phasen gliedern:

1. Prüfung der ausgeführten Messungen durch die spezifische **Aufbereitung der Rohmessungen** entsprechend den Messverfahren (Richtungen, Höhenwinkel, Distanzen, Nivellement, GNSS), unter Berücksichtigung von Kalibrierwerten, meteorologischen Bedingungen sowie geometrischen Korrekturen wie Instrumentenhöhen usw.; Modellierung und Korrektion systematischer Fehlereinflüsse; Bestimmen von stochastischen Kennzahlen für die Parameterschätzung.
2. **Netzausgleichung aller Messungen einer Epoche** zur Berechnung der epochenspezifischen Geometrie (Koordinaten, Höhen) der dauerhaft markierten Kontrollpunkte am Bauwerk und im Gelände.
3. **Festpunktanalyse**: Prüfung der Festpunkthypothesen und sinnvolle Wahl der Festpunkte im gewählten Bezugsrahmen. Ziel ist eine langfristig möglichst einheitliche Lagerung. Die berechneten Koordinaten und Höhen der Kontrollpunkte sowie deren Genauigkeit beziehen sich auf die gewählten Festpunkte.
4. **Ausgleichung aller bisherigen Messepochen** unter Berücksichtigung der Festpunktanalyse (Ziel ist eine langfristig möglichst einheitliche Lagerung); Berechnung der epochenspezifischen Koordinaten und Höhen in allen Epochen gegenüber den gewählten Referenzpunkten, unter Berücksichtigung von deren Genauigkeiten bzw. der Lagerung der Messnetze.
   Die Ausgleichungen liefern neben den gesuchten Punktkoordinaten und -höhen eine Vielzahl von Zusatzinformationen, die für die Beurteilung der Qualität der Messungen sowie für die Analyse der Verschiebungen und Verformungen von grosser Bedeutung sind:
   - Die Genauigkeit in Form von empirischen Standardabweichungen und Konfidenzellipsen: Die Werte sind «absolut» bezüglich der Festpunkte, aber «relativ» zwischen neu bestimmten Punkten in derselben Epoche oder in unterschiedlichen Messepochen;
   - Angaben zur geometrischen Zuverlässigkeit der Koordinaten und Höhen;
   - die Schätzung der erreichten Genauigkeit der verschiedenen Beobachtungstypen (sog. Varianzkomponentenschätzung).
5. **Deformationsanalyse:** Berechnung der Lage- und Höhendifferenzen der Kontrollpunkte über eine oder mehrere Perioden (Differenz zweier Epochen) hinweg, inkl. deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit, also Berechnung kurzfristiger Differenzen, Verschiebungen oder Verformungen, beispielsweise zwischen den letzten zwei Messepochen sowie Vergleiche und Bestimmung von Langzeittrends über alle Epochen; Ausweisen der relativen Genauigkeiten gegenüber den gewählten Referenzpunkten sowie zwischen den Messepochen; Klären der Signifikanz der Veränderungen für das gewählte Vertrauensniveau (z. B. 95 oder 99 Prozent) zur Erkennung reeller Verschiebungen.
6. Die durchgeführten Messungen (inkl. Messprogramm, Personal, Instrumente und Messbedingungen), das Auswerteverfahren, die Festpunktanalyse und die Ergebnisse der Deformations-

Qualitätsmerkmale der Auswertung geodätischer Deformationsmessungen und ihrer Resultate

- Sorgfältige Ausgleichung der Messungen unter Berücksichtigung hochwertiger funktionaler (physikalischer) Modelle und überprüfter stochastischer Kennzahlen der eingesetzten präzisen Messverfahren.
- Bestimmung der Koordinaten und Höhen der stabil materialisierten Kontrollpunkte auf und an den Talsperren sowie im Innern der Bauten und im zu untersuchenden Umgelände mit hoher ausgewiesener Präzision (relative Genauigkeit) sowie absoluter Genauigkeit bezüglich der Referenzpunkte, welche fast beliebig weit entfernt von der Anlage liegen können und den Referenzrahmen bestimmen.
- Optimale Verknüpfung mit weiteren Messverfahren zur Bestimmung der Verschiebungen und Verformungen der Talsperre und des Umgeländes bezüglich des Referenzrahmens.
- Kontrollierte hohe Zuverlässigkeit aller Ergebnisse.

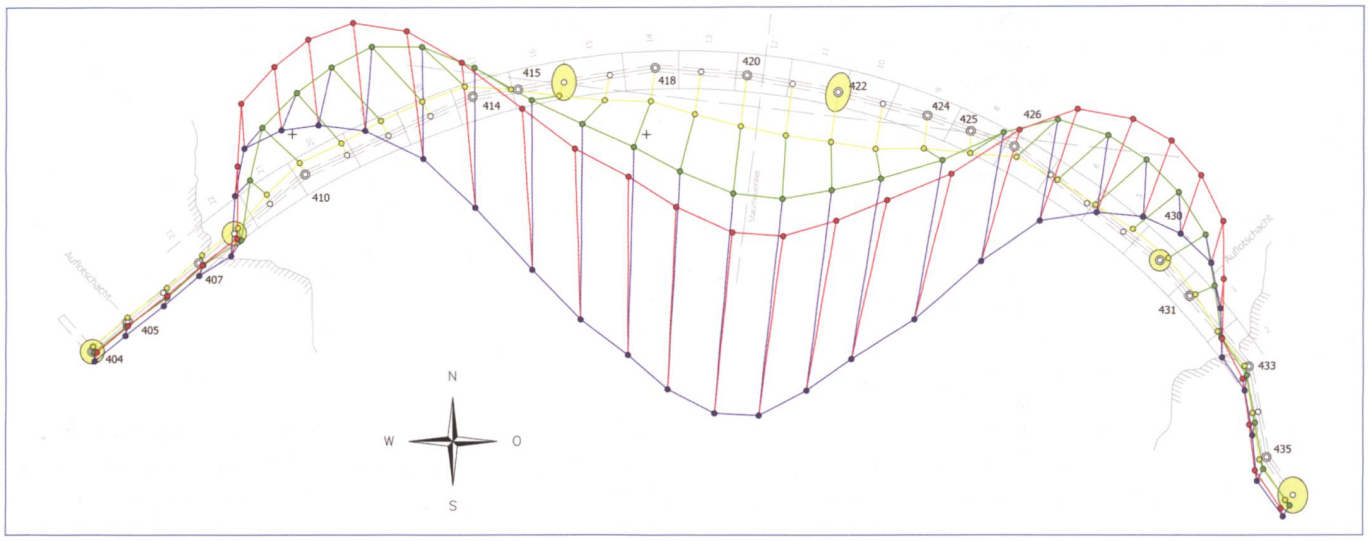

Bild 3: Ausschnitt aus der Darstellung der Lageänderungen einer Staumauer über vier Messepochen (Quelle: Schneider Ingenieure AG).

analyse werden als Teil der langfristigen Überwachung der Talsperren in einem **technischen Bericht** dokumentiert. Die Resultate werden mit übersichtlichen Tabellen und anschaulichen Grafiken dargestellt *(Bild 3)* und aus geodätischer Sicht beurteilt (u. a. Festpunktwahl, Signifikanz, besondere Bedingungen vor und während der Messungen), als Grundlage für die fachliche Beurteilung durch die Experten.

4. Moderne Methoden und Ausblick auf mögliche künftige technologische Entwicklungen

Die bisher beschriebenen Methoden bestimmen diskrete Einzelpunkte (Kontrollpunkte) epochenspezifisch, periodisch und vergleichen sie jeweils mit den früheren Punktbestimmungen. Differenzielle, unregelmässige Bewegungen in Raum und Zeit zwischen den vermessenen Punkten werden üblicherweise nicht ermittelt; sie können wo nötig interpoliert werden.

Mit den heutigen Instrumenten und Softwarewerkzeugen sind jedoch automatisierte, kontinuierliche Überwachungen der Talsperren und des Umgeländes in Lage und Höhe möglich. Bei dauerhaften Überwachungen mit hohen Präzisionsanforderungen und zeitlich dichteren Abtastraten werden zunehmend **geodätische Monitoringsysteme** eingesetzt (sog. Geomonitoring), wie beispielsweise zur Überwachung der Stauanlagen über dem Gotthard-Basistunnel während dessen Bauzeit. Denkbar sind solche Geomonitoring-Anwendungen beispielsweise zur Überwachung kritischer Geländepartien, welche die Stauanlagen direkt oder indirekt durch Abstürze in den Stausee gefährden könnten. Auch Talsperren von Pumpspeicherkraftwerken, welche durch häufigere und rasche Seespiegeländerungen zusätzlich oder vermehrt belastet werden, können durch Monitoringsysteme automatisiert und dauerhaft überwacht werden. Temporär werden Monitoringsysteme besonders dann installiert, wenn Arbeiten oder Bauten an bzw. unter oder in der Nähe der Talsperre vorgenommen werden müssen, welche deren Sicherheit gefährden könnten.

Die Monitoringsysteme können objektgerecht und fallweise aus mehreren verschiedenartigen Sensoren zusammengesetzt werden, wie Tachymetern/Totalstationen, Digitalnivellieren, GNSS-Empfängern, elektronischen Neigungsmessern und hydrostatischen Nivellements, CCD-Sensoren, inertialen Messeinheiten (IMU), Extensometern, Temperatur- und Druckfühlern oder weiteren modernen Messverfahren, welche unten noch erwähnt werden (TLS, InSAR, FOS usw.). Die Software-Systeme zur Steuerung, Auswertung, Analyse und Alarmierung sind im Monitoringsystem integriert. Die Resultate werden zeitnah digital bestimmt und versandt oder zur Einsicht mittels Webbrowser bereitgestellt; in kritischen Momenten werden Alarme und Fehlermeldungen übermittelt.

Beim Messinstrumentarium ergeben sich heute und künftig neue Möglichkeiten, auch flächenhafte Deformationen praktisch zeitkontinuierlich zu erfassen. Die entsprechenden Messmethoden wie Laserscanning und Radarinterferometrie sollen kurz beschrieben werden.

Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Der Scanner vermisst die Talsperrenoberfläche in einem frei definierbaren geometrischen Punktraster dreidimensional und berührungslos (in Horizontal- und Vertikalrichtung und mit Schrägdistanzen, Intensitäts- und evtl. RGB-Farbwerten) *(Barras, 2014)*. Die rasche Messung hoher Punktmengen (bis zu 1 Mio. Punkte/s) ist in der Richtigkeit und Präzision (einige mm bis cm) tiefer als die herkömmliche, hoch redundante, aber zeitaufwändige Mehrpunktbestimmung (meist Submillimeter bis mm). Allerdings können die erwähnten Genauigkeiten der Verschiebungen praktisch nur eindimensional in Richtung des Laserstrahls bestimmt werden. Zudem sind die Georeferenzierung und Modellbildung der Punktwolken herausfordernd. TLS wird künftig vermehrt, aber wohl noch für längere Zeit in Kombination mit den klassischen Methoden der Geodäsie eingesetzt werden.

Terrestrische und satellitengestützte Radarinterferometrie

Bei sehr hohem Gefährdungspotenzial kann terrestrische Radarinterferometrie (Ground-based Interferometic Synthetic Aperture Radar GB-InSAR) Oberflächendeformationen an Talsperren, insbesondere aber in deren Umgebung flächenhaft rasch oder bei Bedarf auch dauernd millimetergenau überwachen *(Jacquemart & Meier, 2014)*. Die Reichweite beträgt ab Sensor bis zu 4 km, die überstrichene Fläche über 5 km^2 und Bewegungen können im Millimeterbereich, unter günstigen Voraussetzungen gar 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, lassen sich 3D-Verschiebungen ermitteln. Im Umfeld von Schweizer Talsperren wurde die Methode bisher erst versuchsweise eingesetzt.

Die Oberflächen ganzer Täler oder Länder lassen sich mit Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) aus Satelliten quasikontinuierlich überwachen. Die messbaren Gebiete und die Periodizität ergeben sich aus den Ausleuchtungszonen der Satellitendurchgänge. In der Schweiz werden beispielsweise Setzungen von Salzabbaugebieten, Geländerutschungen, Blockgletscher und Permafrostgebiete untersucht. swisstopo beabsichtigt, einen landesweiten Geobasisdatensatz «Oberflächenbewegungen» aus satellitengestützten InSAR-Daten aufzubauen. Die Präzision der durchschnittlichen Verschiebungsraten ist in LOS-Richtung ca. 1 mm/Jahr, bei Einzelmessungen besser als 4 mm/Jahr.

Bild 4: Drohneneinsatz für Nahbereichsphotogrammetrie einer Staumaueroberfläche (Bild: Schneider Ingenieure AG).

Weitere Methoden, welche mit der Geodäsie in Zusammenhang stehen oder mit ihr kombiniert werden können

- Nahbereichsphotogrammetrie: Qualitativ hochwertige Fotoaufnahmen, allenfalls mit Überlappungen für stereografische Auswertungen zur Dokumentation und Interpretation von Rissen und weiteren Oberflächenänderungen. Als Sensorträger kommen heute auch Drohnen zur Anwendung *(Bild 4)*. Die Genauigkeit der Methode liegt im cm-Bereich. Dieses Anwendungsgebiet entwickelt sich zurzeit rasch weiter und es ist absehbar, dass der Einsatz von Künstlicher Intelligenz grosse Produktivitätssteigerungen bringen wird.
- Deformationskamera: Analysiert automatisch sequenzielle, hochaufgelöste Bildaufnahmen und ermittelt dabei mit raffinierten Bildverarbeitungsverfahren flächige Deformationen von instabilen Hängen, Felswänden oder Blockgletschern auf wenige Zentimeter genau.
- Überwachung von Formänderungen der Talsperren mittels eingebauter faseroptischer Messsysteme FOS (Glasfasern mit integrierten Messsensoren) zur Bestimmung von Längenänderungen z. B. in Blockfugen mit einer Präzision von wenigen Mikrometern.
- Steinschlagradar: Detektiert Steinschlagereignisse bei allen Wetterbedingungen, auch bei Dunkelheit, und alarmiert innerhalb von wenigen Sekunden.
- Digitale geotechnische Sensoren für Kluftmessungen im Submillimeterbereich (Extensometer, Telejointmeter usw.).
- Bewegungssensoren, piezoelektrische Sensoren oder MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems).
- Digitale Pegelmessungen.

Mögliche künftige Entwicklungen

- Messsysteme mit zunehmender Vernetzung und Integration von geodätischen, geotechnischen und weiteren, allenfalls neuen Sensoren (meteorologische, inertiale 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», gut überwachten und langfristig stabilen Referenzrahmen der Landesvermessung für überregionale Vergleiche, beispielsweise im Fall von Erdbeben.
- 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 («Pseudo-Satelliten», d. h. lokal montierte Mikrowellen-Sender), analog zu Ground Based Augmentation Systems (GBAS) in der Luftfahrt.
- Technologien aus Indoor-Navigations-Methoden.
- Neuzeitliche Darstellungsmethoden und -mittel wie beispielsweise Augmented und Virtual Reality zur Simulation von Verformungsverläufen oder zur Prognose zukünftiger Objektzustände.

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.

Quellen:

Barras, V. (2014): Lasergrammétrie terrestre – une Solution pour l'Auscultation Surfacique. Wasser Energie Luft 106(2): 112–115.

GGGS Gesellschaft für die Geschichte der Geodäsie in der Schweiz, Arbeitsgruppe Talsperrenvermessung (2023): E-Expo inkl. Hauptbericht, umfangreiche Bibliografie und Bildsammlung (emuseum.gggs.ch/eexpo-talsperren/index.html).

Jacquemart, M. und Meier, L. (2014): Deformationsmessungen an Talsperren und in deren alpiner Umgebung mittels Radarinterferometrie. Wasser Energie Luft 106(2): 105–111.

Schweizerische Talsperrenkommission STK (1946): Messungen Beobachtungen und Versuche an schweizerischen Talsperren 1919–1945; Mesures Observations et Essais sur les Grands Barrages Suisses 1919–1945. Bern: Eidgenössisches Oberbauinspektorat.

Schweizerisches Talsperrenkomitee STK/CSB, Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung (2013): Geodäsie für die Überwachung von Stauanlagen. Weitere Publikationen und Beiträge zu STK/BFE Fachtagungen, insbesondere der Jahre 2014 und 2022, siehe unter www.swissdams.ch.

Walser, F. (2014): Geodäsie für die Talsperrenüberwachung. Wasser Energie Luft 106(2): 101-104.

Wiget, A., Sievers, B., Huser, R. und Federer, U. (2021): Beiträge der Geodäsie zur Talsperrensicherheit – Zum 100-jährigen Jubiläum der Talsperrenvermessungen in der Schweiz. Geomatik-Schweiz 119(7/8): 170–177 in Deutsch, 178–185 in Französisch.

Wiget, A. (2022): Hundert Jahre Talsperrenvermessungen in der Schweiz. Wasser Energie Luft 114(1): 39-42.

Adressen der Autoren:

Adrian Wiget, ehemals Leiter Geodäsie swisstopo; adrian.wiget@bluewin.ch

Beat Sievers, Prof. em. FHNW; sievers-frey@bluewin.ch

Felix Walser, Schneider Ingenieure AG, Chur; f.walser@siag-chur.ch