

Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams



GEODÄSIE FÜR DIE ÜBERWACHUNG VON STAUANLAGEN

Empfehlungen des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK
für den Einsatz der geodätischen Deformationsmessung bei
Stauanlagen





Inhalt	Seite
Vorwort.....	1
1. Einleitung	3
1.1 Sicherheitskonzept und Überwachung	3
1.2 Die geodätischen Messungen als Bestandteil der Überwachung	4
1.2.1 Beurteilung der Einwirkungen, des Zustandes und des Verhaltens der Anlage	4
1.2.2 Rasche Zustands- und Verhaltensbeurteilung bei ausserordentlichen Ereignissen ..	5
1.2.3 Unterstützung der Ursachenabklärungen bei auftretenden Anomalien	6
1.3 Weitere Einsätze der Geodäsie	6
1.4 Zusammenarbeit zwischen Geodäsie und Bautechnik	6
1.5 Reguläre und erweiterte Messnetze	7
2. Anforderungen an die Messkonzepte und die geodätischen Messungen	11
2.1 Allgemeines	11
2.2 Messgenauigkeit und Messhäufigkeit	14
2.3 Verbindungen mit anderen Messsystemen.....	15
2.4 Verformungs- und Verschiebungsverhalten von Dämmen und ihres Untergrundes.....	17
2.5 Verformungs- und Verschiebungsverhalten von Staumauern und ihres Untergrundes ..	18
2.6 Überwachung von kritischen Geländepartien	18
3. Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen.....	21
3.1 Messanlage und Durchführung der Messungen	21
3.1.1 Das Projekt	21
3.1.2 Präanalyse zur Planung und Optimierung der Messanordnung.....	22
3.1.3 Bau und Installation der Messanlage.....	22
3.1.4 Vorbereitung und Durchführung der Messungen	23
3.2 Auswertung der Messungen durch den Geodäten.....	23
3.2.1 Freie Ausgleichung der Messungen einer Epoche	24
3.2.2 Vergleich über mehrere Epochen und Deformationsanalyse	24
3.3 Dokumentation und Archivierung (Technischer Bericht)	25
3.3.1 Inhalt und Form der technischen Berichte (inkl. Beilagen und Dokumentationen) ..	25
3.3.2 Darstellung der Messresultate.....	25
4. Rolle des Betreibers	27
4.1 Wartung der geodätischen Messanlage	28
4.2 Ausschreiben von geodätischen Messungen	29
5. Anforderungen an den Geodäten und das Ingenieurvermessungsbüro	31
5.1 Allgemeines	31
5.2 Ausbildung und Erfahrung	31
5.3 Anforderungen an das Ingenieurvermessungsbüro	32
5.3.1 Fähigkeit eines langjährigen Engagements für eine bestimmte Anlage	32
5.3.2 Erfahrung zum Einrichten von geod. Messanlagen bei Stauanlagen.....	33
5.3.3 Vorhandenes Messinstrumentarium	33
5.3.4 Vorhandene spezielle Berechnungsprogramme	34
5.3.5 Zertifizierung des Büros und der ausführenden Personen.....	34
5.3.6 Gewährleistung genügender Fachkräfte und Instrumente in Krisenfällen	34



Anhang.....	37
A1. Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen.....	37
A1.1. Messanlage und Durchführung der Messungen	37
A1.1.1. Das Projekt	37
A1.1.2. Präanalyse zur Planung und Optimierung der Messanordnung.....	39
A1.1.3. Bau und Installation der Messanlage.....	39
A1.1.4. Vorbereitung und Durchführung der Messungen	41
A1.2. Auswertung der Messungen durch den Geodäten.....	42
A1.2.1. Feldkontrollen, Datenaufbereitung und Vorverarbeitung.....	42
A1.2.2. Freie Ausgleichung der Messungen einer Epoche	43
A1.2.3. Vergleich über mehrere Epochen und Deformationsanalyse	44
A1.3. Dokumentation und Archivierung (Technischer Bericht)	46
A1.3.1. Aufgabe des Technischen Berichtes	46
A1.3.2. Inhalt und Form der technischen Berichte (inkl. Beilagen und Dokumentationen) .	46
A1.3.3. Darstellung der Messresultate.....	48
A2. Muster-Pflichtenheft	51
A3. Begriffe.....	67
A4. Beispiele	73

Titelbild: Stauanlage Albigna (Foto: Schneider Ingenieure AG, Chur)



Vorwort

Die Geodäsie ist längst zu einem integralen Bestandteil der Stauanlagenüberwachung geworden, bei kleineren Anlagen kann sie sogar das einzige vorhandene Messsystem zur Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen sein. Die Geodäsie stellt insofern eine Besonderheit in der regulären Überwachung dar, als sie in den meisten Fällen weder vom Werkpersonal noch von den für die Stauanlagen verantwortlichen Bauingenieuren, sondern von Fachpersonen (Geodäten) wahrgenommen wird; dies gilt auch insbesondere für die Planung bzw. für die Umsetzung des geodätischen Messnetzes. Die enge Zusammenarbeit zwischen Geodäten und Bauingenieuren ist sehr wichtig, da es die Aufgabe der letzteren ist, anzugeben, über welche Messgrössen sie verfügen müssen. Die Messresultate müssen auch im Hinblick auf die Beurteilung des Verhaltens einer Anlage durch die Bauingenieure analysiert werden. Grundsätzlich ermittelt der Geodät die Lage und Höhe bestimmter Punkte. Ob es sich bei Änderungen dieser Grössen um eine Verschiebung oder eine Verformung handelt und welche Bedeutung diese für die Stauanlage hat, ist dann Aufgabe der Analyse des Bauingenieurs. Deshalb wird im Folgenden im Zusammenhang mit der Geodäsie nur von Lage- und Höhenänderungen gesprochen.

Heute steht dem Geodäten eine grössere Auswahl an Instrumenten zur Verfügung, Damit wird es anspruchsvoller, das bestgeeignete Instrumentarium einzusetzen. Der Bauingenieur ist sich nicht immer bewusst, welche die Möglichkeiten und Grenzen der Geodäsie sind.

Dazu bedarf es der Erstellung von entsprechenden Pflichtenheften, was ein klares Verständnis sowohl des Geodäten von den Erwartungen des Bauingenieurs wie auch des Bauingenieurs von den Anforderungen an die Geodäsie voraussetzt.

Es wurde eine Untergruppe Geodäsie der Arbeitsgruppe Stauanlagenüberwachung des STK gebildet, um sich dieser Problematik anzunehmen. Ihr wurde folgender Auftrag erteilt:

Ziel:	Erarbeitung eines Dokuments "Geodäsie für die Überwachung von Stauanlagen"
Dieses Dokument soll:	<ul style="list-style-type: none">• die Anlagebetreibern bei der Auswahl ihres Geodäten unterstützen, indem es die Anforderungen im gesamten Umfeld der geodätischen Messungen in Form von Beschreibungen und Pflichtenheften formuliert• den Geodäten bei der Wahl von Messinstrumentarium und Verfahren helfen, indem es die Ziele und die Anforderungen an die geodätischen Messungen aufzeigt• die Anforderungen an das Messnetz, an die technische Ausrüstung, an die Auswertung, an die Berichterstattung und an die Geodäten selbst festhalten

Die Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK empfiehlt, dass die Präzisionsgeodäsie ein integrierter Bestandteil der 5-Jahresexpertisen sein sollte und dass diese geodätischen Messungen nur von ausgewiesenen Fachpersonen mit der entsprechenden Ausbildung und Erfahrung sowie dem dazu notwendigen Instrumentarium durchgeführt werden sollten.



Mitglieder der Untergruppe Geodäsie waren:

Hr. Paul-Henri Cattin	Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), Yverdon
Dr. Georges Darbre (Vorsitz)	Bundesamt für Energie, Ittigen
Hr. Carl-Arthur Eder (bis 2008; Sekretär)	Bundesamt für Energie, Ittigen
Hr. Jean-Claude Kolly*	Groupe E SA, Fribourg
Hr. Marcel Lutz*	AXPO, Baden
Hr. Felix Walser*	Schneider Ingenieure AG, Chur
Hr. Adrian Wiget*	Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern

Die mit * identifizierten Personen sind die Hauptautoren des Dokumentes. Wir danken Hr. Kurt Egger, Chur, für die kritische Lesung einer frühen Version dieses Dokumentes, und die wertvollen Hinweise zu dessen Struktur.

Hinweis

Das STK hat bereits in früheren Jahren zwei Berichte publiziert, die weiterhin ihre volle Gültigkeit behalten und nach Bedarf beigezogen werden sollten:

"Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen - Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des barrages – The Geodetic and Photogrammetric Deformation Measurements of Dams", Schweizerisches Stauanlagenkomitee, 1993/1997

"Messanlagen zur Stauanlagenüberwachung: Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz", Schweizerisches Talsperrenkomitee, 2007

Die Inhalte dieser beiden Berichte sind hier nicht wiederholt. Sie enthalten zusätzliche Hinweise auf weitergehende Literatur.

Im Weiteren werden im vorliegenden Bericht keine Präzisions- oder sonstige quantitative Anforderungen gestellt. Diese sind gemeinsam durch die Fachleute anlagespezifisch und unter Beachtung des einschlägigen Standes von Wissenschaft und Technik festzulegen.



1. Einleitung

Ziel:	Positionierung der geodätischen Lage- und Höhenmessungen in der Sicherheitsüberwachung von Stauanlagen
Stichworte:	<ul style="list-style-type: none">• Geodätische Messungen als Bestandteil der Überwachung von Stauanlagen• Festlegung der zu bestimmenden Verschiebungs- bzw. Verformungsvektoren wie auch Genauigkeitsanforderungen und Messhäufigkeiten durch den Ingenieur• Projektierung eines geodätischen Netzes durch den Geodäten• Abgleich zwischen Ingenieur und Geodät• Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen durch den Geodäten• Einbezug der geodätischen Verschiebungs- und Verformungsmessungen in den gesamten Beurteilungsprozess des Anlagenverhaltens durch den Ingenieur

1.1 Sicherheitskonzept und Überwachung

Das Schweizer Konzept für die Sicherheit der Stauanlagen stützt sich auf die drei Pfeiler der konstruktiven Sicherheit, der Überwachung und des Unterhalts sowie des Notfallkonzepts ab (Abbildung 1). Überwachung und Unterhalt sind im Zusammenhang mit dem Einbezug der Geodäsie von besonderem Interesse. Sie sollen gewährleisten, dass der Zustand und das Verhalten einer Stauanlage und ihres Untergrundes jederzeit zufrieden stellend sind.

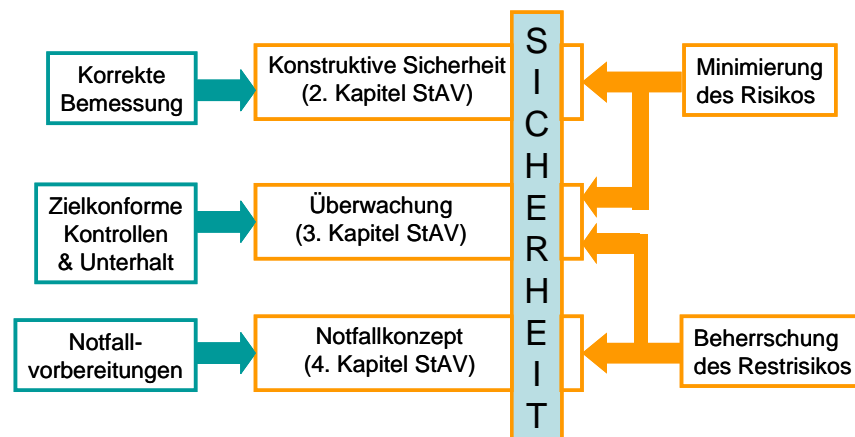


Abbildung 1: **Schweizer Sicherheitskonzept für Stauanlagen**

Mit der Überwachung sollen Verhaltensanomalien, Schäden oder ausserordentliche Zustände rasch und eindeutig festgestellt werden. Dadurch können rechtzeitig die erforderlichen Massnahmen ergriffen werden, um eine allenfalls drohende Gefahr abwenden zu können. Mit dem Unterhalt wird Betriebsmängeln vorgebeugt und festgestellte Schäden werden durch Instandstellungs-, Erneuerungs- und Umbauarbeiten behoben. Die Ziele der Überwachung können wie folgt formulierte werden:

- Laufende Beurteilung der Einwirkungen, des Zustandes und des Verhaltens der Anlage;
- Rasche Zustands- und Verhaltensbeurteilung bei ausserordentlichen Ereignissen;
- Unterstützung der Ursachenabklärungen bei auftretenden Anomalien.

1.2 Die geodätischen Messungen als Bestandteil der Überwachung

Die geodätischen Messungen sind ein integraler Bestandteil der Überwachung. Sie werden einzeln oder in Verbindung mit anderen Messtechniken für die Erfüllung von allen drei Zielen der Überwachung eingesetzt, nämlich:

- Laufende Beurteilung der Einwirkungen, des Zustandes und des Verhaltens der Anlage
- Rasche Beurteilung bei ausserordentlichen Ereignissen
- Abklärung der Ursachen bei Anomalien

1.2.1 Beurteilung der Einwirkungen, des Zustandes und des Verhaltens der Anlage

Unter dem Begriff "Stauanlage" werden sowohl die Sperre samt ihres Untergrundes wie auch der See mit seinen Ufern und alle Geländepartien, die einen Einfluss auf die Sperre oder den See haben können, verstanden. Beurteilt werden das Ausmass und die Änderungen der Einwirkungen (Sediment- und Geschiebeablagerungen, Temperatureinwirkungen, chemische Prozesse, Wasserhöhe, Niederschläge, Beschleunigungen bei Erdbeben, etc.), der Zustand (Auftreten von Rutschzonen, Quellen, Abplatzungen, aussickerndes Wasser, Risse, etc.), das Verhalten (Verschiebungen und Verformungen der Sperre, des Felsuntergrundes, von Geländepartien, Auftriebsdrücke, Porenwasserdrücke, Sickerwasser, etc.) und die Funktionstüchtigkeit der Sicherheitsorgane (Funktionsprobe der beweglichen Teile der Entlastungsorgane). Die Beurteilung erfolgt generell durch eine Auswertung und Analyse der Messergebnisse, der visuellen Kontrollen und der Funktionsproben. Die entsprechenden Ausführungsfrequenzen sind unterschiedlich und hängen von den konkreten Zielen und von den lokalen Gegebenheiten ab. Sie können von täglich (Erfassung der wichtigsten Verhaltensindikatoren) bis zu einer Kadenz von mehreren Jahren reichen.

Die Geodäsie kann als alleiniges Instrument zur Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen von ausgewählten Punkten einer Stauanlage eingesetzt werden, was bei kleineren Anlagen typisch ist. In diesen Fällen sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit und -zuverlässigkeit sowie an die Messhäufigkeit besonders hoch. Die Geodäsie kann auch als komplementäres Verschiebungs- und Verformungsmesssystem zum Einsatz gelangen, um eine teilweise Redundanz zu einem anderen Messsystem (zum Beispiel Lote) zu erstellen, um gegenseitige Widerlagerbewegungen zu verfolgen oder um auch vertikale Bewegungen einer Talsperre zu erfassen. Die Anforderungen an die Genauigkeit richten sich bei solchen Anwendungen nach den Grössen der Lage- und Höhenänderungen und den Gegebenheiten der weiteren, bestehenden Messsysteme. Die Messhäufigkeit ist an die Geschwindigkeit der beobachteten Prozesse anzupassen. Sinngemäss ist bei der grossräumigen Verankerung der geodätischen Messungen in geologisch unbeeinflusste, stabile Zonen beziehungsweise in der weiteren Umgebung einer Sperre vorzugehen (vgl. Kapitel 1.4).

Ein wesentlicher Vorteil der Geodäsie gegenüber Messungen mit Instrumenten im Talsperrenkörper (Lote, Inklinometer, Fugenmesser, etc.) ist das Erlangen von absoluten Verschiebungen. Somit können Verschiebungen der Talsperre im Vergleich zu ihrer Umgebung festgestellt werden. Dies ist besonders wichtig, wenn Bewegungen in der Foundation auftreten, die sonst unbemerkt bleiben würden.

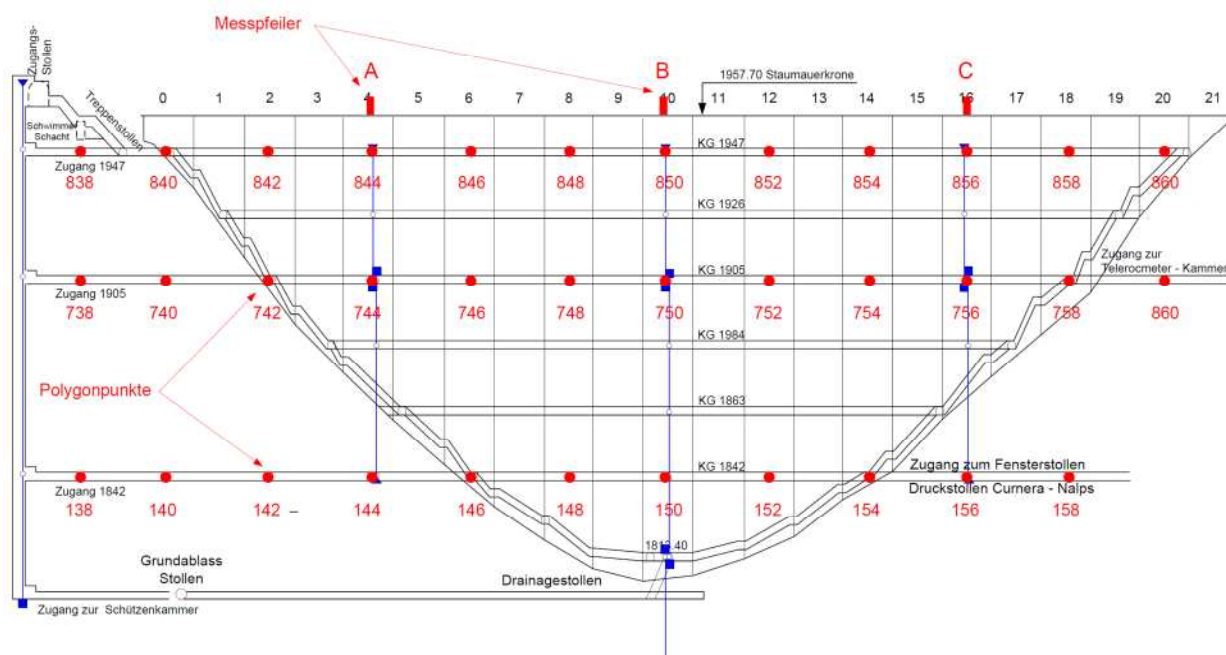


Abbildung 2: Triangulations- und Polygonpunkte in Verbindung mit Loten

1.2.2 Rasche Zustands- und Verhaltensbeurteilung bei ausserordentlichen Ereignissen

Bei ausserordentlichen Ereignissen sowie in Notfällen ist es wichtig, rasch zuverlässige Aussagen über den Zustand und das Verhalten der Anlage zu bekommen. In einem solchen Fall kann die Genauigkeit geringer gewichtet werden. Dabei soll nicht vergessen werden, dass die Zugänglichkeit zu den Messpunkten in Notfallsituationen oft eingeschränkt oder zum Teil verunmöglicht ist (schlechte Witterung, Steinschlag, Lawinen, Schnee, Bergsturzgefahr, etc.). Der entsprechende Teil der Messanlage (auch das Messnetz der Geodäsie) soll daher so ausgelegt werden, dass die erforderlichen Messungen mit einem minimalen Aufwand jederzeit durchgeführt werden können.



Abbildung 3: Wintermessung Stauanlage Nalps

1.2.3 Unterstützung der Ursachenabklärungen bei auftretenden Anomalien

Wurde eine Verhaltensanomalie festgestellt, werden sowohl für die Ursachenabklärung als auch für die laufende Lagebeurteilung Messdaten benötigt, und zwar in einem erheblich grösseren Umfang als für das Erkennen der Anomalie. Die Messkonzepte müssen dieser Sachlage Rechnung tragen.

1.3 Weitere Einsätze der Geodäsie

Weitere Einsätze der Geodäsie sind je nach Gegebenheiten möglich bzw. notwendig. Als Beispiel können speziellen die geodätischen Messungen erwähnt werden, welche in Verbindung mit dem Vortrieb des Gotthard Basistunnels durchgeführt werden. Deren Ziel ist es, mögliche Einflüsse auf die drei über der Tunnelachse liegenden Stauanlagen Nalps, Curnera und Sta. Maria zu erkennen. Das Messkonzept und dessen Umsetzung sind entsprechend der - auch politischen - Bedeutung der möglichen Auswirkungen zum Teil komplex. Sie umfassen eine abgestimmte Mischung von Präzisionsnivelements, automatisierten tachymetrischen Richtungs- und Distanzmessungen, Präzisionsdistanzmessungen und satellitengestützten GNSS-Messungen.

Auf solche speziellen Einsätze wird hier nicht weiter eingegangen.

1.4 Zusammenarbeit zwischen Geodäsie und Bautechnik

Beim Einsatz der Geodäsie sind immer die Gesichtspunkte des für die Talsperre zuständigen Bauingenieurs und des Geodäten sinnvoll zu kombinieren.

Aus Sicht des Bauingenieurs stehen folgende Ziele im Vordergrund:

- über welche Informationen muss man verfügen;
- mit welcher Genauigkeit;



- in welcher Form und Darstellung;
- in welcher Häufigkeit.

Aus Sicht des Geodäten liegt der Schwerpunkt bei der zielentsprechenden Umsetzung:

- Wie soll das Messnetz aussehen und welche Ausdehnung soll es haben;
- Welche Instrumentarien sind geeignet und welche sollen eingesetzt werden;
- Mit welcher Präzision soll gemessen werden;
- Welche Auswertungen sind durchzuführen;
- Wie sind die Resultate zu dokumentieren und zu interpretieren.

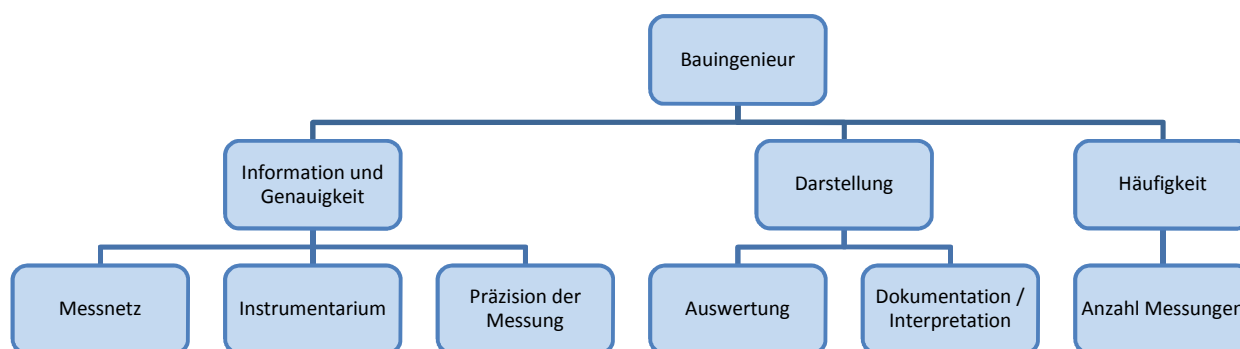


Abbildung 4: **Gesichtspunkte des Bauingenieurs**

Die jeweiligen Gesichtspunkte sind miteinander gekoppelt und ein frühzeitiger Austausch zwischen dem Bauingenieur und dem Geodäten soll erfolgen, ebenso wie eine kontinuierliche Feinabstimmung auf Grund der Erkenntnisse, beispielsweise im Rahmen der Jahres- oder Fünfjahreskontrollen.

In den entsprechenden Kapiteln werden diese verschiedenen Aspekte eingehend behandelt. Im Kapitel 2 sind die Aufgaben des Bauingenieurs näher beschrieben und im Kapitel 3 diejenigen des Geodäten. Die Rolle des Betreibers ist im Kapitel 4 aufgelistet. Im Kapitel 5 sind die Anforderungen an den Geodäten respektive an das beauftragte Ingenieurvermessungsbüro zusammengestellt, die sich aus den vorgenannten Kapiteln ergeben. Im Anhang wird ein Musterpflichtenheft zu geodätischen Messungen vorgestellt, wobei die dort enthaltenen Angaben (z.B. betreffend Instrumentarium oder Genauigkeiten) den jeweiligen Erfordernissen anzupassen sind.

1.5 Reguläre und erweiterte Messnetze

Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Messnetze unterscheiden sich in "reguläre Netze" und in "erweiterte Netze". Die regulären Netze decken die unmittelbare Umgebung der Stauanlage ab und dienen allen Aufgaben der lokalen Überwachung. Erweiterte Netze decken eine grössere Umgebung ab. Sie dienen der "Verankerung" des regulären Netzes in seiner weiteren Umgebung.



Abbildung 5: **Messpfiler vom erweiterten Netz der Staumauer Sta. Maria**

Es ist in der Regel ausreichend, ein reguläres Netz aufzubauen, ausser wenn

- eine Bewegung der Festpunkte des regulären Netzes eingetreten ist bzw. mit erhöhter Wahrscheinlichkeit eintreten könnte (z.B. in Verbindung mit Untertagebauten);
- Unstimmigkeiten bei den Messungen oder unerklärbare Resultate aufgetreten sind (z.B. bei der Verbindung zwischen geodätischen Messungen und Lotmessungen oder wenn es nicht möglich ist, zu unterscheiden, ob ein Festpunkt sich hebt oder ein anderer sich setzt);
- eine Risikokonzentration vorliegt bzw. mehrere Speicher dicht nebeneinander liegen und es möglich ist, mit vertretbarem Aufwand die einzelnen regulären Netze zu verbinden.

Die Anforderungen an die Genauigkeit eines erweiterten Netzes sind u.U. anders als bei einem regulären Netz. Auch ein erweitertes Netz ist aber regelmässig durch Messungen zu kontrollieren und die Datenauswertung zu überprüfen (mindestens alle 10 Jahre).



Abbildung 6: **Erweitertes Netz; permanente geodätische Messanlage (Überwachungsstufe 3 Staumauer Nalps)**





2. Anforderungen an die Messkonzepte und die geodätischen Messungen

Ziel:	Messanlage, welche den Bedürfnissen des Bauingenieurs in Bezug auf die zu überwachten Anlageteile optimal entspricht
Stichworte:	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung der zu überwachenden Anlageteile (Sperrre, Untergrund, Talhänge oder kritische Geländepartien) • Angaben über die erwarteten Verschiebungs- bzw. Verformungsvektoren bezüglich Richtung, Grösse und Verformungsgeschwindigkeiten • Verbindungen mit andern Messsystemen (innere Messsysteme, Extensometer, Inklinometer etc.) • Definition der Genauigkeitsanforderungen und der Messhäufigkeit • Notwendige Verfügbarkeit der Messanlage (Sommer, Winter)

2.1 Allgemeines

Bei bestehenden Stauanlagen stammt das Projekt für die geodätischen Messungen aus der Zeit der Erstellung der Stauanlage. Wegen Sanierungsarbeiten, Zerstörung oder Verschiebungen von Punkten, besserer Kenntnisse des Verhaltens durch gewonnene Betriebserfahrungen oder Weiterentwicklung der Messtechnik kann es jedoch sein, dass im Laufe der Zeit grössere Änderungen an der Messanlage vorgenommen werden müssen.

Das Überwachungskonzept der Stauanlage, zu dem auch die geodätischen Messungen gehören, wird unter Beizug der zuständigen Fachexperten periodisch überprüft. Bei den grossen Stauanlagen erfolgt diese Überprüfung der Messeinrichtungen und des Messprogramms anlässlich der Fünfjahreskontrolle. Die Resultate werden im Gutachten des Experten festgehalten. Die Betreiber setzen das Konzept zusammen mit dem erfahrenen Bauingenieur und dem beauftragten Geodäten in die Praxis um.

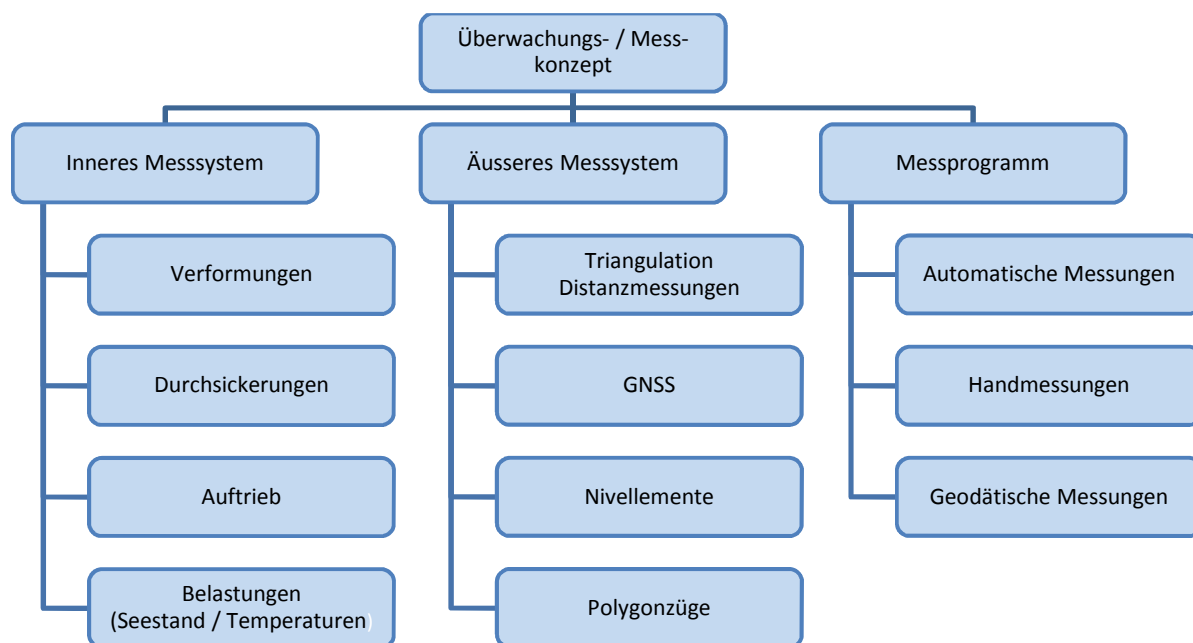


Abbildung 7: Überwachungs- / Messkonzept

Mit Hilfe der Geodäsie soll die Lage und die Höhe von Kontrollpunkten (Objektpunkten) bestimmt werden, bezogen auf ein vorgegebenes Koordinatensystem (geodätischer Bezugsrahmen), welches durch die Referenz- oder Festpunkte repräsentiert wird. Die Geodäsie ist daher geeignet, das Verschiebungs- und Verformungsverhalten von Bauten oder Gelände- partien zu überwachen. Es können ein-, zwei- oder dreidimensionale Messsysteme aufgebaut werden, welche in der Lage sind, absolute räumliche Lage- und Höhenänderungen zu messen. Zudem sollen innere Messsysteme, wie z.B. die Bezugspunkte von Loten oder Drahtalignements, bezüglich desselben Koordinatensystems kontrolliert werden. Oft sind geodätische Messungen sogar unumgänglich, wenn mechanische Messeinrichtungen nicht oder nur mit unverhältnismässig hohem Aufwand installiert werden können, wie z.B. bei Staudämmen oder bei Staumauern, welche über keine Kontrollgänge und Schächte verfügen.

Geodätische Messungen haben allerdings den Nachteil, dass eine annehmbare Genauigkeit nur mit hohen Aufwendungen erreicht werden kann. Damit der Aufwand minimiert werden kann, müssen die Anforderungen an das Messsystem und das Messverfahren den örtlichen Gegebenheiten und den vom Bauingenieur vorgegebenen Bedingungen angepasst werden. Gegebenenfalls sind automatisierte Messungen zu prüfen.



Abbildung 8: **Grossräumiges Präzisionsnivellement**



Die Bestimmung der Lage- und Höhenänderungen ausgewählter Messpunkte einer Stauanlage erfolgt mit Hilfe:

- ❑ des inneren Messsystems, welches durch verschiedene relative Messeinrichtungen wie Lote, Polygonzüge, Nivellements in den Kontrollgängen und ev. Drahtalignemente gebildet wird.
- ❑ der (äusseren) trigonometrischen Vermessung und Nivellementszügen, mit welchen nebst relativen Lage- und Höhenänderungen auch deren Bezug zur Umgebung bestimmt wird. Die Stauanlage befindet sich in der Achse des Netzes, welches sich auf die Wasserseite und die Talseite ausdehnt. Eine optimale Anzahl von stabilen, gut verteilten Referenzpunkten (Fixpunkten) wird im Gelände eingerichtet. Die Beobachtungs- oder Kontrollpunkte werden auf der Krone und teilweise auch an der Luftseite der Stauanlage sowie in Kontrollgängen installiert.
- ❑ einer sinnvollen Ausdehnung des Netzes für den Fall eines aussergewöhnlichen Ereignisses. Die Idee besteht darin, mit Hilfe von GNSS-Stationen das Messnetz der Stauanlage auszudehnen, damit bei aussergewöhnlichen Verformungen im Untergrund oder im Tal die Bestimmung von absoluten Verschiebungen gewährleistet ist.
- ❑ von Verbindungspunkten zwischen dem äusseren und dem inneren Messnetz der Stauanlage.

Zur Überwachung einer Stauanlage muss eine hohe Verfügbarkeit und Stabilität des Messnetzes gewährleistet sein. Dadurch kann die Kontinuität der Messungen erreicht werden, welche für die Langzeitüberwachung erforderlich ist. Die Referenzmessung (Nullmessung) sollte möglichst beibehalten werden, um die Interpretation zu erleichtern. Eine wichtige Rolle spielt auch das Messprogramm. Weil geodätische Messungen aufwändig sind, werden sie in der Regel nur einmal pro Jahr oder gar nur alle fünf Jahre durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messungen immer zur selben Jahreszeit mit ungefähr demselben Seestand durchgeführt werden (vgl. Kapitel 2.2). Dadurch können saisonale Einflüsse von Temperatur und Seestand eliminiert werden. Wenn möglich ist darauf zu achten, dass der Messzeitpunkt so gewählt wird, dass alle Messpunkte zugänglich sind. Sind Wintermessungen erforderlich, muss das Messnetz so angeordnet werden, dass die Messpunkte auch bei Schnee zugänglich sind. Zur Erreichung einer erhöhten Genauigkeit (sofern erforderlich) können allenfalls unzugängliche Messpunkte für die Winkel- und elektronische Distanzmessung mit festen Reflektoren ausgerüstet sein.



Abbildung 9: **Motorisierter Tachymeter bei einer automatischen Messanlage**

Bei kritischen Geländepartien oder intensiveren Bauwerksüberwachungen werden z.T. permanente und automatische Messungen eingesetzt. Dabei ist wichtig, dass die Messgeräte und Zielvorrichtungen vor Steinschlag, Lawinen, störenden Umwelteinflüssen und Beschädigungen durch Personen geschützt sind. Das Messkonzept ist so zu wählen, dass systematische Fehler, z.B. bedingt durch Temperatur- oder Feuchtigkeitseinflüsse, klein bleiben. Solche äusseren Einflüsse müssen möglichst in der Auswertung berücksichtigt und eliminiert werden können.

Das Messnetz sollte wenn immer möglich mit dem inneren Messsystem (z.B. Lote, Aligement, Polygonzüge) verknüpft werden, z.B. durch direktes Messen der Verschiebungen der Lotaufhängepunkte oder Fixpunkte des Drahtalignements etc.

Vor dem Erstellen oder der Erweiterung eines Messnetzes ist die Zusammenarbeit zwischen Bauingenieur, Geologe und Geodät sehr wichtig:

- Bauingenieur: Anforderungen an das Messsystem, Festlegung der Referenzepoche
- Geologe: Festlegung und Beurteilung der Festpunkte
- Geodät: Planung des geodätischen Messkonzeptes und des Messnetzes

2.2 Messgenauigkeit und Messhäufigkeit

Es ist primär die Aufgabe des für die Überwachung verantwortlichen Bauingenieurs und der allfälligen Experten, Anforderungen an die Messgenauigkeit und an die Messhäufigkeit zu stellen. Insbesondere in Verbindung mit dem Einsatz der Geodäsie in der laufenden Überwachung sollen die Verschiebungen und Verformungen der gesamten Stauanlage überwacht werden können (d.h. auch Untergrunds- und Uferbereiche, eventuell auch weiter entfernte Gebiete die eine Gefährdung darstellen wie Gletscherpartien). Es soll überprüft werden können, ob die für die Überwachung der Stauanlage als fest angenommene Punkte in der Tat fest sind (z.B. Lotbezugspunkte).



Die Genauigkeit der geodätischen Messungen ist so zu wählen, dass die Resultate der geodätischen Messungen die notwendige Aussagekraft für eine ingenieurmässige Beurteilung der Stauanlage besitzen. Daher sollten Folgemessungen grundsätzlich unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt werden, das heisst

- bei "gleichem" Seestand und
- bei ähnlichen Temperaturverhältnissen (gleiche Saison).

Dies setzt voraus, dass

- andere Typen von Deformationsmessungen auch bei ähnlichen Wasserstands- und Temperaturverhältnissen erfolgen (z.B. Lotmessungen);
- eine Verbindung zwischen der Geodäsie und diesen anderen Typen von Messungen besteht.

Ansonsten sind zusätzliche geodätische Messungen bei weiteren Betriebszuständen (Wasserstand und Temperatur) durchzuführen.

2.3 Verbindungen mit anderen Messsystemen

Wie im Kapitel 2.1 erwähnt, sollte wenn immer möglich das innere Messsystem ins geodätische Messnetz eingebunden werden. Dadurch kann erreicht werden, dass die aus den Loten, Extensometern etc. gewonnen Verformungen bezüglich der Gesamtverschiebungen im Gelände verglichen werden können.

Bei solchen Vergleichen müssen die folgenden Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Die Genauigkeit der Geräte ist verschieden: Sie variiert von 1 mm oder besser für die Geodäsie, bis zu 0.1 mm für die Lote. Unterschiede bei den Genauigkeiten sind auch zu beachten, wenn reduzierte geodätische Messungen mit den vollständigen Messungen verglichen werden.
- Das innere Messsystem liefert in der Regel relative Verschiebungen, während mit der Geodäsie absolute Verschiebungen gemessen werden. Bei ungenügender Einbindung in den Untergrund können zwischen innerem und äusserem Messsystem (Geodäsie) erhebliche Differenzen entstehen.
- Bei den zu vergleichenden Resultaten muss darauf geachtet werden, dass das Datum der Referenzmessung übereinstimmt.

Damit die geodätischen Messungen miteinander verglichen und ihre Resultate interpretiert werden können, wird der Bauingenieur die zugehörige Staukote und die gemessenen Temperaturen berücksichtigen. Es obliegt ebenfalls dem Bauingenieur, die Ergebnisse der umfangreichen Messungen zu analysieren und zu dokumentieren.

Alle Dokumente über das Verhalten der Stauanlage sind in der Aktensammlung über die Stauanlage archiviert und können in einer Monographie zusammengefasst werden.

Folgende Beispiele sollen die Kombination von Messsystemen erläutern:

a) Geodäsie / Lote

Damit bei Staumauern mit Loten möglichst Absolutverschiebungen gemessen werden, ist wichtig, dass die Schwimmllote genügend tief in die Foundation eingebunden sind.

Um eine gute Verbindung zwischen Loten und Geodäsie zu erhalten, müssen die Kontrollpunkte möglichst nahe an die Lotmesspunkte (Setzplatten und Aufhängepunkte) gesetzt werden. Es ist nicht zwingend notwendig, den Lotdraht selbst einzumessen, da die Verformungen zwischen Kontrollpunkt und Lotmesspunkt oft vernachlässigbar sind.

Bei den grossen Staumauern wird mindestens ein Punkt im Kontrollgang mit dem Aussen-netz verbunden, von welchem die Lotreferenzpunkte mithilfe eines Polygonzuges eingemes-sen werden können.

Die Richtung der Lotsetzplatten kann von der Richtung der Staumauerachse abweichen. Um eine ausreichende Genauigkeit zu gewährleisten, sind allenfalls Korrekturberechnungen nö-tig.



Abbildung 10: Einmessung des Lotdrahtes

b) Geodäsie / Gleitmikrometer

Messungen in Gleitmikrometerrohren sollen präzise mit den geodätischen Messungen verknüpft werden. Dazu kann eine geodätische Messmarke mittels Spezialinstrumenten und optischer Lotung genau senkrecht über dem Zentrum des obersten Messringes des Gleitmikrometers aufgestellt und deren Lage und Höhe im geodätischen Netz bestimmt werden. Besondere Anstrengungen sind vor allem dann notwendig, wenn das Gleitmikrometerrohr nicht bis zur Oberkante einbetoniert wurde oder die oberste Messmarke relativ tief liegt.



c) Nivellemente / Invardrähte oder -bänder

Die Verbindung des Nivellements in einem Kontrollgang mit der Krone kann mittels geeichten Invardrähten oder Invarbändern erfolgen, welche in einem Schacht aufgehängt sind. Vor der Messung wird der Invardraht oder das Invarband mit einem wohldefinierten Gewicht belastet, das auch bei dessen Kalibrierung verwendet wurde. Der Nivellementanschluss erfolgt über fixe Bolzen, welche neben der oberen Befestigung des Drahtes/Bandes sowie neben dessen unteren Messmarke versetzt wurden.

Der Einsatz von Quarzrohren, die in einem Metall-Schutzrohr übereinandergestellt wurden, kann den Invardraht ersetzen. Schliesslich sind auch vertikale Präzisionsdistanzmessungen möglich.

2.4 Verformungs- und Verschiebungsverhalten von Dämmen und ihres Untergrundes

Bei Dämmen spielen geodätische Messungen eine bedeutende Rolle, weil meistens keine redundanten Messungen wie Lote oder Drahtalignements vorhanden sind.

Bei Dämmen wird vor allem das langzeitige Setzungsverhalten des Dammkörpers und des Untergrundes überwacht. Dazu müssen die Höhenverschiebungen auf der Krone, an den Böschungen und im Untergrund gemessen werden. Die Setzungen auf der Krone und an den Böschungen lassen sich am besten mit einem Nivellement erfassen, während die Untergrundsetzungen mittels Setzpegeln gemessen werden, deren Bezugshöhen ebenfalls mit einem Nivellement überprüft werden können.

Horizontale Lagemessungen, wie sie beispielsweise für die Stabilitätskontrolle von Böschungen erforderlich sind, können mittels Triangulation, elektronischer Distanzmessung oder allenfalls mit Hilfe von GNSS durchgeführt werden.



Abbildung 11: GNSS-Messung in Kombination mit Präzisions-Distanzmessung

2.5 Verformungs- und Verschiebungsverhalten von Staumauern und ihres Untergrundes

Bei Staumauern können die Resultate aus dem inneren Messnetz mit geodätischen Messungen überprüft werden. Zudem erfolgt der Bezug dieser "inneren" Verformungen und Verschiebungen zur Umgebung der Mauer. Dazu werden meist Triangulationsmessungen mit elektronischen Distanzmessungen durchgeführt. Nicht nur die Gesamtverformungen auf der Krone sind wichtig, sondern auch diejenigen auf verschiedenen Ebenen z.B. auf der Höhe der Lotmessstellen. Dazu werden Polygonzüge in den Kontrollgängen oder Punkte an der Luftseite gemessen. Für die Messung der Höhenänderungen werden Nivellemente auf der Krone und in den Kontrollgängen durchgeführt.

Eine Kontrolle der Festpunkte des inneren Messsystems (z.B. Lotfusspunkte) ist wichtig. Die Stabilität solcher Alignements- oder Lotbezugspunkte muss mit den geodätischen Messungen überprüft werden können.

2.6 Überwachung von kritischen Geländepartien

Bei der Überwachung von Hangrutschungen interessieren die Verschiebungsgrößen, -richtungen und -geschwindigkeiten von charakteristischen Geländepartien. Da die Verschiebungen oft mehrere cm betragen, ist in der Regel nicht eine besonders hohe Messgenauigkeit, sondern die Durchführbarkeit der Messungen die grösste Herausforderung. Gelegentlich sind die Messpunkte schwer zugänglich und wenige geeignete Festpunkte vorhanden. Trotzdem müssen die Messungen einfach und rasch durchgeführt werden können, ohne dass die Messequippe unzulässigen Gefahren ausgesetzt wird. Die Punkte müssen deshalb so gut markiert werden, dass sie im Gelände einfach auffindbar sind. Der Einsatz von vereinfachten GNSS-Messungen, z.B. die "Rapid-Static" - oder die "Real Time Kinematic (RTK)" - Methode können hier unter Umständen sehr effizient sein. Allenfalls kann hier auch der Ein-

satz von permanenten Messanlagen, Laserscanning oder Radarmessungen (LIDAR, INSAR) sinnvoll sein.

Als weitere Möglichkeit kann die Photogrammetrie eingesetzt werden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit müssen jedoch verschiedene Passpunkte geodätisch eingemessen werden.

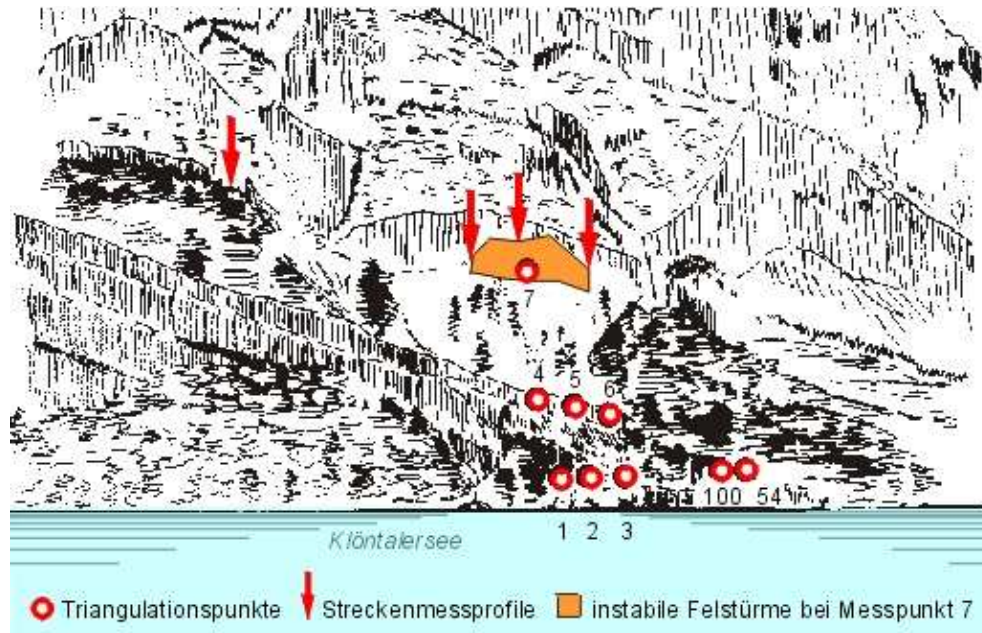


Abbildung 12: **Bärentritt, Messung vom gegenüberliegenden Ufer sowie relative-Messungen mittels Invardrähten und Distometer (Streckenmessprofile)**





3. Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen

Ziel:	Erzielung optimaler Resultate aus den geodätischen Messungen bezüglich Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit
Ablauf:	<ul style="list-style-type: none">• Planung der optimalen Messanlage• Installation der Messanlage unter den gegebenen Umständen• Effiziente Erfassung der Messdaten mit der notwendigen Qualität• Ausgleichung der Messdaten und Berechnung allfälliger Deformationen• Dokumentation der Messungen und Ergebnisse

Die einwandfreie Durchführung einer geodätischen Deformationsmessung bedingt die korrekte Handhabung der geodätischen Messverfahren und Instrumente sowie die Einhaltung gewisser Regeln. Dieser Abschnitt soll einige für Betreiber, Experten und Aufsichtsbehörden interessante Aspekte kurz beleuchten und zusammenfassen. Hintergründe und Details zu diesen generellen Ausführungen und Stichworten können dem **Anhang A1** entnommen werden.

3.1 Messanlage und Durchführung der Messungen

Die geodätische Messanlage muss an die konkrete Stauanlage und deren Umgebung angepasst werden. Sie hat die Vorgaben des Auftraggebers, des Bauingenieurs und der Aufsichtsbehörden zu erfüllen. Folgende Planungsschritte können unterschieden werden:

1. Das Projekt
2. Die Präanalyse zur Planung und Optimierung geodätischer Messanordnungen
3. Bau und Installation der Messanlage
4. Die Vorbereitung und Durchführung der Messungen

3.1.1 Das Projekt

Ziel:	Planung der optimalen Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Auswahl der Messpunkte (Kontroll- oder Objektpunkte) für die Überwachung der Verschiebungen in Lage und Höhe• Festlegung der Genauigkeitsanforderungen• Auswahl des geodätischen Bezugssystems und des Bezugsrahmens sowie der Festpunkte• Definition des Netzplanes, der Messmethoden und des Instrumentariums• Festlegung der Messprogramme und der Messzyklen (inkl. reduzierter Messungen und Notfallszenarien) sowie allenfalls automatisierter Messungen

Da geodätische Messanlagen in der Regel eine lange Lebensdauer haben sollen, ist deren weitsichtige Auslegung von entscheidender Bedeutung. Notwendige Anpassungen im Laufe der Nutzungszeit könnten zu unerwünschten Inhomogenitäten in den Messreihen führen.

3.1.2 Präanalyse zur Planung und Optimierung der Messanordnung

Ziel:	Bezüglich der Resultate und des Messaufwandes optimierte Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Variantenstudium verschiedener Messanordnungen und Messinstrumente• Studium und Ausweis der zu erwartenden Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse (Koordinaten, Höhen, Verschiebungen)• Untersuchung der Auswirkungen von Ausfällen• Diskussion der Anforderungen und der Resultate mit Auftraggebern und Experten

Die in guten Ausgleichungsprogrammen eingebauten Hilfsmittel zur Berechnung der erreichbaren Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten anhand einer entworfenen Netzkonfiguration erlauben die Beurteilung der projektierten Messanlage bevor diese realisiert wird. Dies gibt allenfalls Hinweise auf Mängel, oder aber auch auf vorhandenes Optimierungspotential.

3.1.3 Bau und Installation der Messanlage

Ziel:	Stabile, langfristige Materialisierung der Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Sorgfältige Erstellung der Messpfeiler, der Referenzpunkte und der Kontrollpunkte• Bau und Installation der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen• Logistik und Schutzeinrichtungen für automatisierte Messsysteme

Im Allgemeinen wird der grösste Teil der geodätischen Messanlage vom Betreiber der Stauanlage installiert. Dies bedingt eine intensive Zusammenarbeit zwischen Betreiber und Geodät.



Abbildung 13: Doppelwandiger Messpfeiler

3.1.4 Vorbereitung und Durchführung der Messungen

Ziel:	Effiziente Erfassung der vorgesehenen Messdaten mit der notwendigen Qualität
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Bereitstellung und Prüfung der Instrumente• Vorbereitung der Messanlage• Planung des Messablaufs• Erfassung von Lage- und Höhenänderungen während den Messungen unter gleichzeitiger Beobachtung mit anderen Messeinrichtungen• Tägliche Datensicherung und Kontrolle mittels Vorauswertung

Anzustreben ist eine zügige Durchführung der Messungen unter Berücksichtigung der aktuellen Randbedingungen (Temperatur, Wasserstand, etc.), um systematische Fehlereinflüsse bedingt durch deren mögliche Änderung möglichst zu vermeiden. Wichtig ist auch die gleichzeitige Messung der übrigen Messeinrichtungen (Lote, Rockmeter usw.) durch den Betreiber der Stauanlage, insbesondere wenn diese mit Vermessungspunkten verknüpft sind.



Abbildung 14: Präzisionsnivellement über die Mauerkrone

3.2 Auswertung der Messungen durch den Geodäten

Die Auswertung der geodätischen Messungen lässt sich in der Praxis in drei Phasen gliedern:

1. Prüfung der ausgeführten Messungen durch die spezifische Aufbereitung der Rohmessungen entsprechend den Messverfahren (Richtungen, Höhenwinkel, Distanzen, Nivellement, GNSS)
2. Ausgleichung aller Messungen einer Epoche zur Berechnung der aktuellen Geometrie (Koordinaten)
3. Optional: Gesamtausgleichung über mehrere Epochen und Deformationsanalyse

Ziel dieser Auswertungen ist die Bestimmung allfälliger Lage- und Höhenänderungen mit den dazugehörigen Genauigkeiten. Für eine Beschreibung der in der Geodäsie üblichen Genauigkeiten sei auf den Artikel "Die mittleren Fehler in der Geodäsie als Grundlage für die Interpretation von Verschiebungen"¹ von K. Egger verwiesen.

In der Schweiz haben sich im Verlaufe der Jahrzehnte zwei Verfahren zur Ausgleichung geodätischer Messungen durchgesetzt:

3.2.1 Freie Ausgleichung der Messungen einer Epoche

Ziel:	Von der Festpunktwahl und externen Einflüssen unabhängige Qualitätskontrolle (Annahme unveränderter Lage und Höhe der Festpunkte)
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Ausgleichung aller Beobachtungen der aktuellen Messepoche unter Berücksichtigung der funktionalen Zusammenhänge und der stochastischen Eigenschaften• Beurteilung der aus der Ausgleichung resultierenden Verbesserungen an den Messungen sowie der ausgewiesenen Genauigkeiten• Durchführen von statistischen Tests• Markierung oder begründete Mindergewichtung von Messungen mit reduzierter Genauigkeit oder unerklärlichen Abweichungen

Die Ausgleichung behandelt nur die aktuell erhobenen Messdaten. Die Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen von Messpunkten erfolgt durch den Vergleich mit der entsprechenden Lage und Höhe in der Referenzepoche.

3.2.2 Vergleich über mehrere Epochen und Deformationsanalyse

Ziel:	Auf Festpunkten gelagerte Koordinaten und Höhen resp. deren Änderungen mit ausgewiesener, bestmöglicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit für alle Kontrollpunkte
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Freie Ausgleichung aller bisherigen Messepochen und optimale Bestimmung der Koordinaten aller Punkte• Beurteilen der Festpunkthypothese und sinnvolle Wahl der Festpunkte im gewählten Bezugssystem (Festpunktanalyse)• Vergleich über mehrere Messepochen:<ul style="list-style-type: none">(a) durch Lagerung der frei ausgeglichenen Netze pro Messepoche mittels Helmert-Transformation auf den gewählten Festpunkten(b) durch eine Gesamtausgleichung (Multi-Epochen-Ausgleichung) aller Messepochen, gezwängt oder weich gelagert auf den gewählten Festpunkten• Berechnung der epochenspezifischen Koordinaten und Höhen der Kontrollpunkte sowie deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung der Lagerung resp. der Genauigkeiten der Festpunkte

Hier erfolgt die Ausgleichung der aktuellen Messung immer zusammen mit früheren Messungen. Der Vorteil gegenüber der Beschränkung auf eine Epoche ist die Ausgleichung sämtlicher Beobachtungen seit der Nullmessung in einem Guss. Damit können auch Koordinatendifferenzen bzw. Punktbewegungen über die Zeit mit korrekten statistischen Kennzahlen (relative mittlere Fehler zwischen Messepochen) ausgewiesen und ihre Signifikanz beurteilt werden. Alle bisherigen Messungen sind zudem im neusten Datenformat vorliegend und können einfach archiviert werden. Nachteilig ist, dass die Koordinaten- und Höhen der früheren Ausgleichungen minimal ändern können. Dies kann jedoch umgangen werden, indem die

¹ siehe "wasser, energie, luft - eau, énergie, air" 94. Jahrgang, 2002, Heft 11/12



bisherigen Referenzkoordinaten der Festpunkte fixiert werden, sofern diese überprüft und keine signifikanten Verschiebungen nachgewiesen wurden.

3.3 Dokumentation und Archivierung (Technischer Bericht)

Der Technische Bericht über eine geodätische Deformationsmessung verfolgt primär zwei Ziele:

- Er beschreibt die durchgeführten geodätischen Arbeiten. Der Bericht soll auch den Zustand der Messanlage und die Auswertemethoden dokumentieren.
- Er liefert die vermessungstechnischen Grundlagen und Resultate für die Beurteilung des Zustandes und des Verhaltens des Bauwerkes.

3.3.1 Inhalt und Form der technischen Berichte (inkl. Beilagen und Dokumentationen)

Ziel:	Ausführlicher Bericht über die geodätischen Messungen und die Berechnungen inkl. deren Resultate
Inhalte:	<ul style="list-style-type: none">• Einleitung und Auftrag• Zustand der Messanlage• Beschreibung der Messungen• Auswertung• Beschreibung und geodätische Beurteilung der Resultate (Koordinaten- und Höhendifferenzen) und deren Genauigkeiten aus Sicht des Geodäten• Zusammenfassung und Schlussfolgerungen• Anhänge, Beilagen (Tabellen, Pläne, evtl. Auszüge aus der Auswertung)

Es muss sichergestellt sein, dass die Dokumentation (Technischer Bericht) alle notwendigen Informationen über die erfolgte geodätische Messung enthält.

3.3.2 Darstellung der Messresultate

Ziel:	Übersichtliche Darstellung der Resultate für die Interpretation
Inhalte:	<ul style="list-style-type: none">• Plan der Messanlage; Netzpläne• Pläne der Lage- und Höhenänderungen• Beschreibung und allenfalls Tabellen, technische Pläne und Bilder

Der Technische Bericht soll alle Resultate in übersichtlicher grafischer und numerischer Form enthalten.





4. Rolle des Betreibers

Ziel:	Klare Aufgabenteilung zwischen Betreiber, Bauingenieur, Experten und Geodäten
Stichworte:	<ul style="list-style-type: none">• Erstellung eines Überwachungsreglements der Stauanlage durch den Betreiber• Ausschreibung und Vergabe von geodätischen Messungen

Für die Mehrzahl der Wasserkraftwerke ist dem Werkbetreiber das lokale Personal für die Stauanlagenüberwachung unterstellt. Er befasst sich mit der Aufstellung des Budgets, der Verleihung von Mandaten und Aufträgen und der Gewährleistung der Wartung und Erneuerung der Einrichtungen.

Der Betreiber muss eine klare Vorstellung haben über:

- den Zweck der geodätischen Messungen
- die benutzten Messtechniken
- die Aufgaben seines Personals sowohl für die Messkampagnen als auch für die Wartung
- die Kosten der gesamten Messung.

Um die Beziehungen zwischen dem Betreiber, dem Bauingenieur, den Experten und dem Geodäten, welcher mit den geodätischen Messungen beauftragt wurde, zu vereinfachen, verlangt das Gesetz vom Betreiber ein Reglement für die Betrieb und die Überwachung der Stauanlage² im Normalfall sowie bei ausserordentlichen Ereignissen, welches vom BFE genehmigt werden muss.

Betreffend die geodätischen Messungen muss dieses Reglement die folgenden Auskünfte enthalten:

- Organisation der geodätischen Messungen: Verwaltung des Mandats
- Art und Umfang der Messungen (Anforderungen; vollständige / reduzierte Messung)
- Häufigkeit und Epoche der Messungen
- Vorbereitung der Messkampagne
- Aufgaben des lokalen Personals
- Unterhalt der Messanlage
- Betriebsvorschriften während der Messung: Wasserstand, maximale Seeschwankungen
- Zusätzliche, begleitende (nicht geodätische) Messungen (z.B. Lotmessungen, Rissmessungen und diverse Temperaturmessungen)
- Abgabe der Resultate und Archivierung

Das Reglement kann sich auf die Beschreibung der wesentlichen Angaben beschränken und braucht keine Detailfestlegungen zu enthalten.

Der Betreiber stellt die erforderlichen Anforderungen an die Messungen und das Messnetz. Er legt die erforderlichen Genauigkeiten anhand der Art, der Grösse und der Wichtigkeit des

² Verordnung über die Sicherheit der Stauanlagen (Stauanlagenverordnung, StAV) vom 7. Dezember 1998, Art. 9.2

zu überwachenden Bauwerkes fest. Je nach verlangter Genauigkeit werden hohe Ansprüche an die Qualität der Messungen gestellt. Das Messnetz und das verwendete Instrumentarium müssen vom Geodäten so ausgelegt sein, dass die Genauigkeitsanforderungen erfüllt werden können.

4.1 Wartung der geodätischen Messanlage

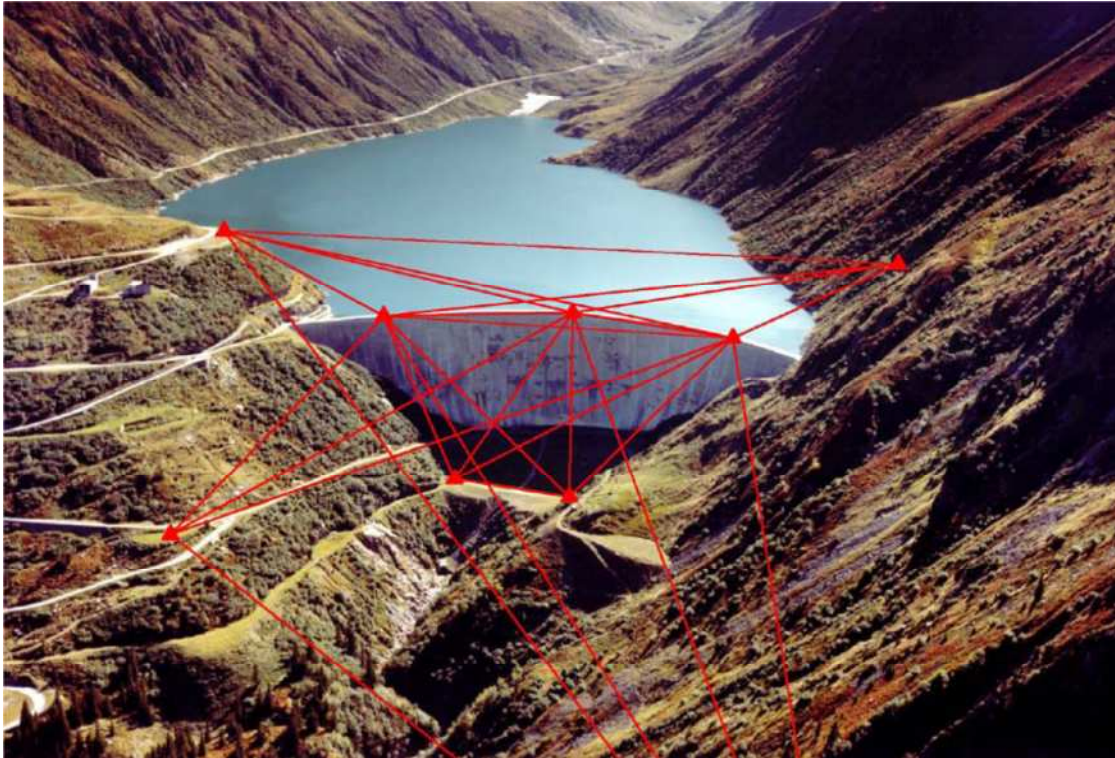


Abbildung 15: Beispiel eines geodätischen Netzes

Der gute Zustand einer Messanlage ist die unbedingte Voraussetzung für die Einhaltung der geforderten Genauigkeit der aus den geodätischen Messungen ermittelten Lage- und Höhenänderungen. Der Betreiber ist in der Regel für den Unterhalt der Referenz- und Kontrollpunkte zuständig. Er muss darauf achten, dass diese Punkte gut sichtbar (Vegetation) und möglichst begehbar sind. Sie müssen von allen im Netzplan dafür vorgesehenen Stationspunkten aus ungehindert sichtbar sein. Die Festpunkte sind regelmässig auf ihren Zustand zu überprüfen. Die Kontrolle der Stabilität wird im Rahmen der geodätischen Messungen durchgeführt.

Die folgenden Wartungsempfehlungen erlauben es, ein Netz mit guter Qualität während einer langen Periode zu gewährleisten:

- Plan der bestehenden Punkte und der notwendigen Visuren zu Handen des lokalen Personals.
- Signalisation und Bezeichnung der Referenz- und Kontrollpunkte vor Ort.
- Regelmässiges Ausholzen der Visuren.
- Stabile und dauerhafte Ausführung der Messpfeiler und der Zielpunkte. Ein Wärmeschutz bei den Messpfeilern verhindert Verformungen aufgrund der Sonneneinstrahlung.



- Schutz der Zentriereinrichtungen bei den Messpfeilern und den Zielpunkten durch regelmässiges Schmieren der Schrauben und Gewinde sowie durch Montage von Schutzhauben.
- Sicherer Zugang zu allen Messpfeilern.

Es ist wichtig, dass dem Geodäten jede Demontage eines Referenz- oder Kontrollpunktes im Voraus gemeldet wird, damit er wenn nötig einen neuen Bezugspunkt einmessen kann, bevor der alte entfernt wird.

Der Betreiber ist darauf angewiesen, dass die Überwachung seiner Stauanlage jederzeit gewährleistet ist. Deshalb sollten Ingenieurvermessungsbüros mit langjähriger Erfahrung in Ingenieurvermessung und mit regelmässigen Tätigkeiten auf dem Gebiet der Geodäsie berücksichtigt werden. Ist trotzdem ein Wechsel des Geodäten oder auch des Messsystems notwendig, müssen die Auswertungen der Messungen jederzeit nachvollzogen werden können. Die Sicherung der Rohdaten und der bereinigten Messdaten (z.B. Berücksichtigung von Kalibrierwerten), die klare Beschreibung der verwendeten Parameter und der Auswerteverfahren sowie die Dokumentation der Messreihen sind daher äusserst wichtig. Mit der Abgabe des Messberichts müssen diese Daten dem Betreiber der Stauanlage unbedingt mitgeliefert werden.

4.2 Ausschreiben von geodätischen Messungen

Bei der Ausschreibung von geodätischen Messungen muss der Betreiber die folgenden Punkte berücksichtigen:

- Büros, die bereits die Überwachung anderer Stauanlagen durchführen oder die sich mit der Errichtung von geodätischen Messnetzen und Präzisionsüberwachungen befassen, sind in der Regel gut geeignet, Messungen mit der geforderten Genauigkeit für Stauanlagen durchzuführen.
- Verlangen der Lebensläufe der Fachpersonen und der anderen Spezialisten des Ingenieurvermessungsbüros; Referenzenliste
- Verlangen einer Liste des Instrumentariums, über welches das Büro verfügt.
- Angaben verlangen über die Art der Ausgleichs- und Spezialsoftware (z.B. für GNSS-Auswertungen), welche das Büro verwendet.
- Angaben über die erwartete Messqualität für Lage- und Höhenmessungen.

Der Wechsel des Geodäten, resp. des beauftragten Ingenieurvermessungsbüros bedeutet immer einen Bruch in der Kontinuität der bisherigen Messreihe. Meist ist ein Genauigkeitsverlust und eine erschwerte Interpretation der Resultate ist eine unvermeidbare Folge davon. Grundsätzlich soll derselbe Geodät für mehrere Messungen beibehalten und ein Wechsel nur in begründeten Fällen in Betracht gezogen werden.

Ein Musterbeispiel einer solchen Ausschreibung findet sich im Anhang A2.





5. Anforderungen an den Geodäten und das Ingenieurvermessungsbüro

Ziel:	Grundvoraussetzungen, damit der Geodät die an ihn gestellte Aufgabe lösen kann
Stichworte:	<ul style="list-style-type: none">• Fundiertes Fachwissen und Erfahrung bezüglich der speziellen Anforderungen bei der geodätischen Überwachung von Stauanlagen• Kennen der Zusammenhänge zu den anderen Messsystemen einer Stauanlage• Fähigkeit, die Kontinuität der Messreihe über Jahre und womöglich über Jahrzehnte zu gewährleisten• Entsprechendes Instrumentarium (Hard- und Software)• Genügend Kapazität des Ingenieurvermessungsbüros

5.1 Allgemeines

Bei geodätischen Messungen, insbesondere im Bereich der Überwachung von grossen Talsperren, handelt es sich um Messungen höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Dabei sind nicht nur bei der Datenerfassung im Feld (den eigentlichen Messungen) sondern auch bei der Auswertung der Messdaten vertiefte Kenntnisse über die Grundlagen der Vermessung notwendig. Insbesondere bei grossräumigen Netzen und bei kombinierten geodätischen Netzen (konventionelle Geodäsie zusammen mit anderen Messmethoden wie GNSS, Laserscanning, etc.) sind vermehrt Kenntnisse der "höheren" Geodäsie und der Ingenieurgeodäsie notwendig.

Die Geodäsie in der Überwachung von Talsperren kann 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. Nur so ist es dem Geodäten möglich, seine eigenen Resultate kritisch zu hinterfragen und den Betreiber, resp. dessen Experten und Ingenieure auf mögliche Schwachstellen und Unzulänglichkeiten seiner Messungen hinzuweisen. Aus diesen Gründen ist es auch wichtig, dass der Geodät fähig ist zur interdisziplinären Zusammenarbeit mit den Betreibern und Experten der Stauanlage, den Aufsichtsbehörden, Bauingenieuren, Geologen u.a. und dass er mit diesen eine "gemeinsame Sprache" spricht. Langjährige Erfahrung und personelle Kontinuität in der Betreuung einer geodätischen Messanlage sind anzustreben.

5.2 Ausbildung und Erfahrung

Einrichtung, Messung und Auswertung einer geodätischen Messanlage benötigt fundiertes Fachwissen über die geodätischen Methoden, Instrumente sowie Kenntnisse über deren Vorteile und Grenzen. Aus diesen Gründen haben zumindest die Projektleiter einer geodätischen Messung erhöhten Anforderungen bezüglich ihrer Ausbildung (ETH, FH) zu genügen.

Vom Geodäten sind Kenntnisse über die Konzepte und Verfahren betreffend die Sicherheit der Talsperren und Stauanlagen sowie über mögliche Deformations- und Gefahrenszenarien zu fordern. Erst das Verständnis über das Verhalten einer Talsperre und des umliegenden Geländes ermöglicht es dem Geodäten, die Messanlage optimal einzurichten und die mit seiner Vermessung ermittelten Lage- und Höhenänderungen auf deren Plausibilität zu überprüfen. Es ermöglicht ihm auch, Schlüsse auf allfällige Fehler in der Auswertung zu ziehen und eine allfällige ungenügende Stabilität der verwendeten "Festpunkte" zu erkennen.

Das Erheben von geodätischen Messdaten hoher Genauigkeit bedingt mehr als bloss die Fähigkeit, ein Präzisionsinstrument bedienen zu können. So kann beispielsweise nur schon das vermeintlich einfache Erfassen der meteorologischen Parameter zum Problem werden und zu fehlerhaften Distanzreduktionen bei der Auswertung führen. Daher ist bei Deformationsmessungen eine grosse Erfahrung unerlässlich, welche es ermöglicht, auf wechselnde Bedingungen (z.B. Meteoverhältnisse) und besondere Vorkommnisse während einer Messkampagne korrekt zu reagieren, um bestmögliche Messungen zu erhalten.

Häufig sind auch Lotmessungen oder geotechnische Referenz- und Vergleichsmessungen (Extensometer, TRIVEC-Messanlagen, etc.) in die Deformationsmessung einer Stauanlage zu integrieren. Dies bedingt das Verständnis über die Eigenheiten dieser Messverfahren und deren Auswertung.



Abbildung 16: Jointmeter-Messungen in Kombination mit geodätischer Messung

5.3 Anforderungen an das Ingenieurvermessungsbüro

Nicht nur an den Geodäten selbst werden erhöhte Anforderungen gestellt, um im Bereich der präzisen Deformationsmessungen kompetente Dienstleistungen erbringen zu können. Dies gilt natürlich auch für das beauftragte Ingenieurvermessungsbüro. So hat es den Nachweis zu erbringen, dass zumindest in personeller Hinsicht die in Kapitel 5.2 aufgeführten Kriterien erfüllt werden.

Weitere wichtige Kriterien, welche ein zu beauftragendes Ingenieurvermessungsbüro erfüllen soll, werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

5.3.1 Fähigkeit eines langjährigen Engagements für eine bestimmte Anlage

Geodätische Deformationsmessungen an Stauanlagen erstrecken sich, wenn auch in Etappen, über mehrere Jahre, ja gar Jahrzehnte. Um die Kontinuität der Messreihe zu gewähr-



leisten, sind die wirtschaftlichen Zukunftsaussichten, welche das langfristige Überleben des Büros ermöglichen, nicht unerheblich. Um die technischen Voraussetzungen schaffen zu können, damit überhaupt genaue geodätische Deformationsmessungen möglich werden, sind grosse Investitionen in das Messinstrumentarium und dessen Zubehör, sowie in die Auswerte-Software und vor allem auch in das Know-How und die Weiterbildung der Mitarbeitenden zu tätigen.

5.3.2 Erfahrung zum Einrichten von geod. Messanlagen bei Stauanlagen

Spezielle Kenntnisse und entsprechende Erfahrung sind nötig, um geodätische Messanlagen zu projektieren und einzurichten, welche den speziellen Anforderungen der Überwachung von Stauanlagen genügen. Der Geodät soll die Fachkenntnisse und die Weitsicht haben, die Messanlagen mit Blick auf ein möglichst langjähriges Bestehen von Beginn weg optimal anzulegen. Dennoch sollen spätere Erweiterungen, allfällige Verfeinerungen oder der Einbezug neuer Messmethoden in begründeten Fällen möglich sein. Dabei muss der Geodät alle Eigenheiten, Vor- und Nachteile der bestehenden und neu zu integrierenden Verfahren und Instrumente kennen, um ein effektives und effizientes Messkonzept zu realisieren resp. zu erweitern.

5.3.3 Vorhandenes Messinstrumentarium

Allein mit dem Kauf eines modernen, mit ATR (automatische Zielerkennung) ausgerüsteten Totalstation hoher Genauigkeit sind die Voraussetzungen bei weitem noch nicht geschaffen, um präzise Deformationsmessungen an Stauanlagen durchführen zu können. Nicht nur geeignete Messinstrumente (Theodolite, hochpräzise Distanzmesser, andere Spezialgeräte wie allenfalls GNSS) sondern auch den speziellen Anforderungen genügendes Zubehör muss zur Verfügung stehen. So ist beispielsweise das Vorhandensein von kalibrierten Nivellierlaten, Zielmarken und Reflektoren in genügender Anzahl unerlässlich. Daneben ist auch ein Instrumentarium nötig, um eher seltene, aber immer wieder anzutreffende Spezialaufgaben wie Lotungen, Höhenübertragungen mittels vertikaler Distanzmessung, etc.) sicher und effizient zu bewältigen. Das gesamte Messinstrumentarium inkl. Zubehör muss ständig gepflegt, unterhalten und kontrolliert werden. Dazu gehören Kalibrierungen mit den entsprechenden Nachweisen.



Abbildung 17: Präzisions-Reflektoren

5.3.4 Vorhandene spezielle Berechnungsprogramme

Die in jedem Vermessungsbüro vorhandene Software zur Lösung der Vermessungsaufgaben in der Grundbuchvermessung (oder amtlichen Vermessung) ist für den Einsatz in der präzisen Deformationsmessung ungenügend. Hier sind Vorverarbeitungs- und Ausgleichsprogramme anzuwenden, deren Möglichkeiten zur funktionalen und stochastischen Modellierung des geodätischen Netzes den Genauigkeitsanforderungen gerecht werden. Zudem müssen diese Programme von entsprechend ausgebildetem und erfahrenem Personal eingesetzt werden können.

5.3.5 Zertifizierung des Büros und der ausführenden Personen

Eine Zertifizierung wird zurzeit nicht gefordert, sollte aber geprüft werden. Immerhin könnte diese als Bestätigung für das Engagement des Ingenieurvermessungsbüros hin zur Gewährleistung von Qualität und Verlässlichkeit gelten. Dabei müsste aber noch festgelegt werden, welche Stellen zur Ausstellung des Zertifikats in Frage kommen könnten.

Auf jeden Fall muss die Ausbildung und Erfahrung der eingesetzten Geodäten durch das Büro belegt werden können. Zudem muss auch der Nachweis der periodischen Prüfung und Kalibrierung der Messinstrumente bei Nachfrage erbracht werden können.

5.3.6 Gewährleistung genügender Fachkräfte und Instrumente in Krisenfällen

Es ist zweifellos von grossem Vorteil, wenn das mit den geodätischen Messungen beauftragte Büro intern über genügend ausgewiesene Fachpersonen sowie über das beschriebene Instrumentarium inkl. Reserveinstrumente und -zubehör verfügt. In Krisenfällen kann aber ein einzelnes Büro oft nicht genügend Fachkräfte und Instrumente alleine zur Verfügung stellen. Dies insbesondere dann nicht, wenn wegen speziellen Naturereignissen (z.B. ein Erdbeben) die Stauanlagen einer ganzen Region in kurzer Zeit überprüft werden müssen. Aus diesem Grunde ist eine Zusammenarbeit in Ingenieurgemeinschaften oder mit Partnerbüros



zu begrüßen. Damit kann im Ereignisfall auf entsprechend grössere Ressourcen zurück gegriffen werden.





Anhang

A1. Durchführung und Auswertung der geodätischen Messungen³

A1.1. Messanlage und Durchführung der Messungen

A1.1.1. Das Projekt

Ziel:	Planung der optimalen Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Auswahl der Messpunkte (Kontroll- oder Objektpunkte) für die Überwachung der Verschiebungen und Verformungen in Lage und Höhe• Auswahl des geodätischen Bezugssystems und des Bezugsrahmens sowie der Festpunkte• Festlegung der Genauigkeitsanforderungen• Definition des Netzplanes, der Messmethoden und des Instrumentariums• Festlegung der Messprogramme und der Messzyklen (inkl. reduzierter Messungen und Notfallszenarien) sowie allenfalls automatisierter Messungen

Im Projekt der geodätischen Messanlage werden die Art, der Ort und die Anzahl der Referenz- und Kontrollpunkte festgelegt. Es gibt vor, welche **Kontrollpunkte** (Objektpunkte) auf, an und in der Stauanlage in Lage und/oder Höhe mit welcher Genauigkeit und bezüglich welcher Referenzpunkte (Festpunkte) überwacht werden müssen. Die Messanlage soll vom Geodäten in enger Zusammenarbeit mit dem verantwortlichen Bauingenieur und dem Geologen projektiert werden. Sie soll so angelegt werden, dass zukünftige Entwicklungen der Messtechnik soweit dies vorhersehbar ist, optimal integrierbar werden können. Die Methode der geodätischen Deformationsmessungen ist zwar äusserst flexibel und kann durch Erweiterungen oder Modifikationen neuen Gegebenheiten in der Regel gut angepasst werden. Dennoch sind eine stabile Messanlage und gleich bleibendes Instrumentarium für die Deformationsanalyse von grosser Bedeutung. Kontinuität ist auch seitens des beauftragten Geodäten wichtig, indem über mehrere Messkampagnen dieselbe Person die Arbeiten durchführen und die gemachten Erfahrungen an allfällige Nachfolger weitergeben sollte.

Die sorgfältige Auswahl der Referenz- oder Festpunkte ist entscheidend für die langfristige Qualität der Deformationsanalyse und für die Bestimmung von "absoluten" Verschiebungen im gewählten Bezugsrahmen.. Die Referenzpunkte müssen ausserhalb des Einflussbereichs der Stauanlage liegen, mit Vorteil luft- und wasserseits. Kontrollpunkte sollen auf beiden Talseiten gewählt werden, damit auch relative Verschiebungen der vermeintlich stabilen Talflanken feststellbar sind.

Wegen der notwendigen Sichtverbindungen für die terrestrischen Deformationsmessungen müssen die **Referenzpunkte** meist in der näheren Umgebung der Stauanlage gewählt werden. Falls diese Forderung nach Referenzpunkten ausserhalb des Einflussbereiches der Stauanlage nicht erfüllt werden kann, müssen zusätzliche, weiter entfernte Referenzpunkte

³ In diesem Anhang werden die im Kapitel 3 zusammengestellten Grundsätze und Regeln nochmals aufgenommen detaillierter beschrieben. Der Anhang enthält teilweise auch überarbeitete und aktualisierte Texte aus einer Publikation der Arbeitsgruppe Stauanlagenbeobachtung, welche unter dem Titel "Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen" in der Zeitschrift "wasser, energie, luft – eau, énergie, air" im Heft 9/1993 publiziert worden ist.

in stabilen geologischen Zonen erstellt werden. Dabei kann der Einbezug von satellitengestützten Messmethoden (GNSS) sehr dienlich oder gar unerlässlich sein. Schliesslich ist zu beachten, dass alle Referenzpunkte immer wieder auf ihre Stabilität überprüft werden müssen. Bei der Auswertung der Messdaten, insbesondere der Lagerung des Messnetzes, ist darauf zu achten, dass durch die Referenzpunkte (Festpunkte) keine falschen Zwänge im Massstab und in der Orientierung des Überwachungsnetzes eingeführt werden.

Die Zahl der Referenzpunkte ist (nach oben) nicht limitiert. Es muss immer damit gerechnet werden, dass Referenzpunkte zerstört werden oder sich nachträglich als instabil erweisen, auch wenn sie sorgfältig ausgesucht und materialisiert worden sind, sei dies durch Umwelteinflüsse (Lawinen, Hochwasser, Rutschungen) oder durch spätere bauliche Massnahmen. Die Stabilität der als Pfeiler eingerichteten Referenzpunkte muss durch Messungen auf sog. Rückversicherungen in festem Untergrund überprüft werden können. Die ganzjährige Zugänglichkeit zu den Referenzpunkten ist wünschenswert oder je nach Notfallkonzept, welches auch wintertauglich sein muss, sogar zwingend zu fordern.

Zum Projekt gehören auch Angaben über die zu erreichenden **Genauigkeiten** der Bestimmung der Lage- und Höhenänderungen unter Berücksichtigung der Messverfahren und der Instrumente. Die geforderten Genauigkeiten haben einen Einfluss auf den Bau und Rückversicherung der Referenz- und Kontrollpunkte, auf die Ausgestaltung des Netzes, den Umfang der Messungen sowie auf das einzusetzende Instrumentarium und damit auf die (wiederkehrenden) Kosten der Deformationsmessungen.

Das Projekt legt den Netzplan, die eingesetzten **Messmethoden** und das **Instrumentarium** fest. Bei den klassischen terrestrischen Deformationsmessungen werden trigonometrische Richtungs-, Höhenwinkel- und Distanzmessungen mit Theodoliten, Tachymetern oder Totalstationen, evtl. auch speziellen Präzisionsdistanzmessinstrumenten (Infrarot- oder Lasergehäte), durchgeführt sowie Präzisionsnivelements und Polygonzüge gemessen. Im Innern der Sperren können auch Invardraht- oder Invarband-Distanzmessungen zum Einsatz kommen.

Insbesondere für die Einmessung der Referenzpunkte und wichtiger Stationspfeiler sowie allenfalls von Kontrollpunkten auf der Krone in Bezug zu (weit) entfernten Referenzpunkten in stabilen geologischen Zonen werden heute geodätische Zweifrequenzen-GNSS-Empfänger mit kalibrierten Antennen eingesetzt. Hinzu kommt eine grosse Anzahl von zusätzlichen (Hilfs-) Geräten wie Ablotgeräte, Invarnivellierlatten, Zielmarken, Reflektoren, Adapter usw. Das Instrumentarium für die Deformationsmessungen an einer grossen Stauanlage kann sehr umfangreich und spezifisch sein und nicht alle Hilfsmittel sind Standardartikel. Andererseits geht die Entwicklung von neuen Instrumenten und neuen Messmethoden, welche für Deformationsmessungen interessant sein können, weiter, beispielsweise Laserscanner oder Radarinstrumente. Die wirtschaftliche Integration neuer Instrumente in bestehende Messanlagen unter Beachtung der Genauigkeits- und Kontinuitätsanforderungen der Deformationsmessungen bildet einen anspruchsvollen Aspekt der Tätigkeit des Geodäten.

Wichtig ist eine umfassende, hochpräzise Referenzmessung der gesamten Messanlage. Nach jeder Wiederholungsmessung müssen aus den Differenzen der Koordinaten und Höhen der Kontrollpunkte zu früheren Messungen die Lageverschiebungen und Höhenänderungen mit genügender Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt werden können. Daraus werden für den Bauingenieur, die Experten und den Betreiber der Stauanlage die notwendigen Informationen betreffend das Verformungs- oder Verschiebeverhalten der Stauanlage und die Stabilität ihrer Umgebung abgeleitet. Besonders zu beachten ist der optimale, möglichst direkte Bezug zwischen den Referenzpunkten und den Kontrollpunkten der Stauanlage resp. der Umgebung sowie die Verbindung zu den in der Stauanlage eingebauten Messinstrumenten (wie Lote, Extensometer usw.). Dies beeinflusst auch die Redundanz des ge-



samten Überwachungssystem und damit dessen Zuverlässigkeit. Das Projekt muss für genügende (Über-) Bestimmungen der Referenz- und Kontrollpunkte sorgen.

Schliesslich sollte das Projekt die **Messprogramme** (Haupt- und Zwischenmessungen) und in Absprache mit dem Bauingenieur, den allfälligen Experten und dem Betreiber auch die Messzyklen festlegen sowie die Möglichkeiten reduzierter Messungen aufzeigen. Insbesondere im Falle ausserordentlicher Ereignisse oder im Notfall sollen ein reduziertes Messprogramm oder gar ausgewählte Einzelmessungen rasch erste Resultate und Erkenntnisse über allfällige Verschiebungen oder Verformungen ermöglichen.

Umgekehrt ist zu prüfen, ob automatisierte geodätische Messungen, beispielsweise mit GNSS-Empfängern oder Tachymetern, die übrigen Messeinrichtungen der Stauanlage sinnvoll ergänzen können. Automatisierte Messungen können insbesondere zur dauernden, kontinuierlichen Überwachung kritischer Geländepartien eingesetzt werden. Dank der Tatsache, dass sie beliebig häufig bis kontinuierlich sowie zu unterschiedlichen Tageszeiten (auch Nachts) durchgeführt werden können, tragen automatisierte Messungen allenfalls zur Elimination von systematischen Messfehlern oder zum besseren Verständnis von zeitlich veränderlichen Phänomenen bei.

A1.1.2. Präanalyse zur Planung und Optimierung der Messanordnung

Ziel:	Bezüglich der Resultate und des Messaufwandes optimierte Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Simulationen mit Variation der Messanordnungen und der Messinstrumente• Studium und Ausweis der zu erwartenden Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse (Koordinaten, Höhen, Verschiebungen)• Untersuchung der Auswirkungen von Ausfällen• Diskussion der Anforderungen und der Resultate mit Auftraggebern und Experten

Die ersten, simulierten Auswertungen von Deformationsmessungen einer Stauanlage finden statt, bevor man überhaupt etwas gemessen hat. Man plant die optimale **Messanordnung** im Büro mit Hilfe von sog. Präanalysen. Die Ausgleichsrechnung erlaubt **Genauigkeit und Zuverlässigkeit** der Ergebnisse in Simulationen zu untersuchen, wenn die projektierte Messanordnung vorliegt und die Genauigkeit der vorgesehenen Messinstrumente bekannt ist.

Dank wiederholter Präanalysen kann die Messanordnung im Sinne der Erfüllung der Anforderungen mit minimalem Messaufwand optimiert werden. Ebenfalls können **besondere Vorkommnisse** oder **Ausfälle** (Ausfallen von Referenzpunkten, ausgedehnte Rutschungen usw.) simuliert und untersucht werden. Die Ergebnisse solcher a priori (im Voraus) Berechnungen sind die mittleren Fehlerellipsen und die Zuverlässigkeitsrechtecke, die für die Kontrollpunkte unter den vorgesehenen Bedingungen zu erwarten sind. So kann der Geodät ein modernes geodätisches Überwachungssystem sorgfältig projektieren, damit die späteren Ergebnisse die Anforderungen des Auftraggebers, der Experten und der Aufsichtsbehörden erfüllen werden.

A1.1.3. Bau und Installation der Messanlage

Ziel:	Stabile, langfristige Materialisierung der Messanlage
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Sorgfältige Erstellung der Messpfeiler, der Referenzpunkte und der Kontrollpunkte• Bau und Installation der notwendigen Sicherheitsvorkehrungen• Logistik und Schutzeinrichtungen für automatisierte Messsysteme



Stauanlagen verfügen meist über umfangreiche, permanente Messeinrichtungen, die zum Teil schon anlässlich des Baus der Stauanlage installiert oder zumindest vorgesehen wurden. Unter Umständen wurden Teile der Messanlage bereits für die Absteckung und Bauüberwachung eingesetzt. Der sorgfältigen und dauerhaften Installation ist grösste Aufmerksamkeit zu schenken. Es ist empfehlenswert, dass die Zentriervorrichtungen auf den Pfeilern und die Bolzen der Kontrollpunkte durch den Geodäten selbst oder unter seiner Aufsicht versetzt werden.

Die zu stationierenden Referenzpunkte werden in der Regel durch massive, doppelwandige **Messpfeiler** aus Beton mit einer genauen Zentriervorrichtung materialisiert. Sie sind so im stabilen Untergrund (Fels) zu verankern, dass sie keine Eigenbewegungen ausführen. Bei Bedarf oder entsprechenden Einschränkungen sind auch andere Konstruktionen wie Konsolen oder (demontierbare) Stahlpfeiler denkbar. Zur lokalen Versicherung der Referenzpunkte gehören mindestens zwei, idealerweise drei sog. Rückversicherungen. Diese Rückversicherungsmarken werden geometrisch optimal verteilt im nahen Fels eingelassen und dienen dazu, kleine lokale Bewegungen der Pfeiler gegenüber der Umgebung festzustellen. Bei einer allfälligen Zerstörung des Pfeilers helfen sie mit, den Bezug zum neu konstruierten Pfeiler herzustellen.

An allen exponierten Stellen, insbesondere den Messpfeilern aber auch auf dem ganzen Weg dorthin, sind gefährliche Orte und Passagen durch **Sicherheitsvorkehrungen** und Schutzmassnahmen wie Geländer, Seilsicherungen oder Dächer zu sichern. Ein allfällig erforderlicher ganzjähriger Zugang soll bei jedem Wetter gefahrlos und ohne Schwierigkeiten möglich sein. Dabei sind aber auch die notwendigen Sichtverbindungen sowie allenfalls die Horizontfreiheit für GNSS-Messungen zu beachten.

Die Kontrollpunkte (Objektpunkte) sollen unter allen Umständen die Bewegung des zu kontrollierenden Untergrundes oder Bauwerkes wiedergeben. Kontrollpunkte können je nach Lage ganz verschieden gebaut werden, resp. montiert sein: Mauerbolzen an der Luftseite, Pfeiler auf der Krone, Bolzen im Fels der Widerlager oder auf Fernzielpunkten, Bolzen mit Spezialeinsätzen, welche direkt anzielbar sind oder über denen entsprechende Marken mechanisch oder optisch zentriert werden können, fest montierte oder zwangszentriert aufsetzbare Reflektoren, horizontale oder vertikale Nivellementsbolzen usw. Die zweckmässige und dauerhafte Versicherung ist von Fall zu Fall festzulegen, abhängig von der Zugänglichkeit, der Netzgeometrie sowie den eingesetzten Messmethoden und Instrumenten.

Besondere Massnahmen erfordern meist die festinstallierten und **automatisierten Messsysteme**. Einerseits sind je nach eingesetzter Technik Energie- und Kommunikationsnetzanschlüsse notwendig (Stromanschluss oder Solaranlage, Kabel- oder Funkverbindung für den Datenverkehr). Andererseits müssen die Sensoren und Komponenten der automatischen Messungen vor starken Witterungs- und Umwelteinflüssen geschützt werden (z.B. Schutzbauten für automatische Totalstationen; Schutz vor Schneeablagerungen auf Reflektoren oder GNSS-Antennen).



A1.1.4. Vorbereitung und Durchführung der Messungen

Ziel:	Effiziente Erfassung der vorgesehenen Messdaten mit der notwendigen Qualität
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Ausbildung der beteiligten Personen• Bereitstellung und Prüfung der Instrumente• Vorbereitung der Messanlage• Planung des Messablaufs• Vermeidung oder Erfassung von Verformungen der Stauanlage während den Messungen; gleichzeitige Beobachtung anderer Messeinrichtungen• Zügige Durchführung der Messungen unter Berücksichtigung der aktuellen Bedingungen und Vermeidung oder Reduktion von systematischen Fehlereinflüssen• Tägliche Datensicherung und Kontrolle mittels Vorauswertung

Die erste Voraussetzung für erfolgreiche Deformationsmessungen sind **gut ausgebildete, erfahrene Geodäten** (Geomatik-Ingenieure) und Operateure (vgl. Kapitel 5). Sie müssen sowohl die Ziele, die Anforderungen und das Konzept hinter dem Messplan verstehen als auch die Technik und das Instrumentarium beherrschen. Schliesslich ist eine genaue und sorgfältige Arbeitsweise unerlässlich.

Auch die für die Messungen vorgesehenen Instrumente müssen den hohen Ansprüchen gerecht werden. Hierzu müssen die Instrumente in **gutem Zustand** sein. Die Sensoren und ihre Komponenten müssen kalibriert und periodisch geprüft werden. So müssen beispielsweise der Massstab der Distanzmesser sowie deren Additionskonstanten in Kombination mit den eingesetzten Reflektoren bekannt sein. Die (absoluten oder relativen) individuellen Phasenzentren-Offsets der GNSS-Antennen sind vorgängig durch Kalibrationsmessungen zu bestimmen.

Die **Messanlage** muss für die Deformationsmessungen vorbereitet werden. Es muss rechtzeitig gewährleistet werden, dass alle Visuren gemäss Netzplan frei sind. Wichtig sind auch die sorgfältige Reinigung und allenfalls Kennzeichnung der Zielpunkte. Schliesslich müssen die erforderlichen Sicherheits- und Schutzeinrichtungen montiert werden.

Der konkrete **Messablauf** ist entsprechend dem Messkonzept und dem Netzplan zu planen. Dabei sind auch die Messzeiten zu beachten. Bei den klassischen Messungen kann beispielsweise die Sonneneinstrahlung und damit die Tageszeit eine Rolle spielen, bei kurzzeitigen GNSS-Messungen die Satellitenkonstellation. Dank Messungen in der Nacht können die Vorteile stabilerer meteorologischer Bedingungen, geringerer Refraktionseinflüsse sowie (für GNSS wichtig) geringerer Ionosphärenaktivität genutzt werden. Weitere Randbedingungen für die Beobachtung sind die aufgestellten Genauigkeitskriterien. Auch die Messungen früherer Epochen sind zu beachten, sollten die Deformationsmessungen doch möglichst nach dem gleichen Konzept und unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden (dies ist auch ein Grund, warum nur in Ausnahmefälle ein Wechsel des Geodäten erfolgen sollte). Es ist empfehlenswert, wenn immer möglich das gleiche Instrumentarium auf den gleichen Pfeilern und Kontrollpunkten wieder zu verwenden.

Die Messungen selber erfolgen **sorgfältig und zügig** nach den bewährten Regeln der klassischen oder satellitengestützten Geodäsie. Sie sind so anzulegen, dass allfällige Fehler sofort an Ort entdeckt und behoben werden können. Wegen der wechselnden Belastungen, die auf die Stauanlage wirken (Wasserspiegel, Temperatur), ist eine spätere Nachmessung des gleichen Zustandes in der Regel nicht mehr möglich. Nachmessungen sind zudem meist mit sehr grossem Aufwand verbunden.

Diese Belastungen der Stauanlage sollten für die gesamte Dauer der Messungen, die einige Tage dauern können, möglichst gleich bleiben. So sind mit dem Betreiber Massnahmen für

die Erhaltung der gleichen Staukote vorzusehen. Der **Verformungsstand der Staumauer** während der Messung ist zu erfassen. Zur Kontrolle ist evtl. eine tägliche Ablesung der Lote anzuordnen und tägliche oder gar kontinuierliche Messungen von weiteren Daten (Wasserstand, Temperaturen) können angezeigt sein. Andererseits ist die Zeitdauer der geodätischen Messungen möglichst kurz zu halten, unter Umständen kann der Einsatz von mehreren, zeitgleich arbeitenden Messequipen erforderlich sein.

Es ist auch zweckmässig, zum Zeitpunkt der geodätischen Deformationsmessungen alle **anderen Messeinrichtungen** in, an und um die Stauanlage zu beobachten, so dass für diese Zeit ein möglichst vollständiges Gesamtbild des Zustandes und Verhaltens der Stauanlage vorliegt.

Bei den Messungen sind alle Einflüsse, die zu systematischen Fehlern führen können, möglichst zu vermeiden. Allenfalls sind zusätzliche Messwerte zu erfassen, welche unmittelbar oder anlässlich der Auswertung die Elimination oder wenigstens Reduktion der systematischen Fehlereinflüsse ermöglichen. Besondere Bedeutungen haben, je nach Messanlage, die Höhen und allfälligen Exzentrizitäten der Instrumente, Zielmarken und Reflektoren sowie, insbesondere für elektronische Distanzmessungen, die Erfassung der atmosphärischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck).

Die Messdaten werden heute mit Hilfe von elektronischen Erfassungsgeräten oder gleich in den Instrumenten selber registriert. Die **tägliche Sicherung der registrierten Daten** sowie ihre formale und eigentliche Kontrolle, am besten mit einer Vorauswertung, sind von entscheidender Bedeutung.

A1.2. Auswertung der Messungen durch den Geodäten

A1.2.1. Feldkontrollen, Datenaufbereitung und Vorverarbeitung

Ziel:	Gewähr für Vollständigkeit aller notwendigen Messdaten in der erforderlichen Qualität am Ende der Messkampagne
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Elektronische Erfassung und Kontrolle der originalen Messdaten im Feld• Aufdecken von groben Fehlern und Datenausfällen• Vorverarbeitung spezieller Messtypen (z.B. Distanzmessungen, Nivellement)• Anbringen von Eich- und Kalibrierwerten• Modellierung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen• Berechnen von stochastischen Kennzahlen für die Messungen (a priori)

Die meisten geodätischen Messungen werden heute elektronisch erfasst, sei dies durch das Messgerät selber oder mit einem Feldrechner, allenfalls zusammen mit der manuellen Eingabe von Zusatzmessungen. Dadurch können die Rohmessungen bereits während oder unmittelbar nach deren Erhebung im Feld aufbereitet und **speziellen Kontrollen** unterzogen werden (Mittelbildung, Varianzschätzung, Reduktionen). Dies ermöglicht es, dass insbesondere allfällige grobe **Messfehler** (Punktverwechslungen, falsche Ablesungen, Fehler in der Datenübertragung) sofort aufgedeckt werden und dass als notwendig erkannte Wiederholungsmessungen gleich stattfinden können. So werden beispielsweise die Satzmittel der Richtungsmessungen noch auf der Station berechnet, um deren Qualität beurteilen zu können. Die Kontrolle auf der Station hat zudem den Vorteil, dass die Vollständigkeit aller zu erhebenden Daten überprüft wird.

Andere Messtypen werden in längeren Pausen, über Mittag oder am Abend aufbereitet und kontrolliert, beispielsweise durch den Vergleich zwischen der Hin- und der Rückmessung beim Nivellement. Auch bei den GNSS-Messungen ist eine Testauswertung mit einer Stan-



dardsoftware zu empfehlen, nachdem die Daten aller Empfänger einer gemeinsamen Session auf einen Rechner übertragen worden sind. Dabei kann überprüft werden, ob auf allen Basislinien die Phasenmehrdeutigkeiten (sog. Ambiguities) zu allen Satelliten auf ganzzahlige Werte fixiert werden können. Das Hauptziel dieser Aufbereitung oder Auswertung der Rohmessungen an Ort ist, am Ende einer Messkampagne Gewähr zu bieten, dass alle notwendigen Messungen mit der nötigen Qualität vorliegen und keine Nachmessungen erforderlich sind. Dies ist umso bedeutender, wenn spezifische Umweltbedingungen oder betriebliche Massnahmen, z.B. die Konstanthaltung des Stauspiegels auf einer bestimmten Höhe, eine spätere Wiederholung der Messungen nicht oder nur mit erheblichem Mehraufwand zulassen würden. Schliesslich sind auch Situationen und Extremereignisse denkbar, bei denen das rasche Vorliegen von zuverlässigen Resultaten wichtiger ist als höchste Genauigkeit.

Zurück im Büro werden alle Originalmessungen (Rohwerte) gespeichert. Danach werden die Feldkontrollen wie Stationsausgleichungen oder atmosphärische und geometrische **Korrekturen** der Distanzmessungen auf dem Bürorechner wiederholt, wobei auch alle Nebenmessungen (Instrumentenhöhen, Zielhöhen, Antennenhöhen, meteorologische Messwerte, etc.) und **Kalibrierwerte** (Instrumenten- und Prismenkonstanten, Massstäbe und Ausdehnungskoeffizienten, Antennen-Phasenexzentrizitäten, etc.) berücksichtigt werden. Bei den GNSS-Messungen ist für die definitive Auswertung die Verwendung einer Software empfohlen, welche erweiterte Möglichkeiten zur Modellierung und **Korrektur von systematischen Fehlerinflüssen** bietet. Nach Abschluss der Datenbereinigung sowie den messtypenspezifischen Auswertungen liegen kontrollierte, von groben und systematischen Fehlern weitgehend befreite Messwerte der verschiedenen Sensoren vor, zusammen mit Schätzwerten über deren **stochastisches Verhalten** (Verteilungsfunktionen, Varianzen).

A1.2.2. Freie Ausgleichung der Messungen einer Epoche

Ziel:	Von der Festpunktwahl und externen Einflüssen unabhängige Qualitätskontrolle
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Alle Beobachtungen der aktuellen Messepoche werden unter Berücksichtigung der funktionalen Zusammenhänge und der stochastischen Eigenschaften ausgeglichen• Beurteilung der aus der Ausgleichung resultierenden Verbesserungen an den Messungen sowie der ausgewiesenen Genauigkeiten• Durchführen von statistischen Tests• Markierung oder begründete Mindergewichtung von Messungen mit reduzierter Genauigkeit oder unerklärlichen Abweichungen

Terrestrische Deformationsmessungen umfassen in der Regel eine beträchtliche Anzahl von redundanten (überschüssigen) Messungen, die sich gegenseitig kontrollieren. Die Gesamtheit aller Messungen weist somit eine grosse innere Redundanz auf. Nach Abschluss der Messkampagne und der Bereinigung der Messungen werden daher alle Beobachtungen gesamthaft einer kombinierten Ausgleichung unterzogen. Diese wird zuerst als **zwangsfreie Netzausgleichung** (freies Netz) einer Messepoche durchgeführt, wobei gemeinsam mit den Informationen über die funktionalen Zusammenhänge (geometrische Beziehungen usw.) auch die stochastischen Eigenschaften aller verwendeten Grössen zu beachten sind, um trotz Störeinflüssen (unvermeidlichen Messungenauigkeiten und anderen zufälligen Fehlerursachen) möglichst sichere Aussagen herleiten zu können.

Die freie Netzausgleichung ist die geeignete Methode, um die Gesamtheit der Beobachtungen der aktuellen Epoche zu überprüfen, da die so ermittelten Verbesserungen an den Messungen nicht von den Festpunkthypothesen abhängig sind. Diese Verbesserungen haben eine bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung (Normalverteilung mit Erwartungswert Null) und werden mit einem **statistischen Test** (Test der standardisierten Verbesserungen) geprüft,

um allfällige grobe Messfehler (z.B. Punktverwechslungen) entdecken zu können. Die freie Netzausgleichung erlaubt auch die tiefere **Gewichtung von Messungen** mit verminderter Genauigkeit. Allerdings ist es bei solchen gezielten Manipulationen an den Messdaten unerlässlich, dass die Ursachen der Störeinflüsse analysiert und die Auswirkungen der Massnahmen auf die Resultate studiert werden.

Üblicherweise werden die geodätischen Netze einer kombinierten Lage- und Höhenausgleichung (2D+1D) unterzogen. Solange auch die Beobachtungen nach Lage und Höhe getrennt durchgeführt werden (Richtungen resp. Höhenwinkel und Nivellement), ist diese Trennung nicht grundsätzlich nachteilig. Mit der Einführung von kombinierten räumlichen Messungen, den Distanz- und insbesondere den GNSS-Messungen, gewinnt die dreidimensionale (3D) Ausgleichung an Bedeutung. Damit steigen aber auch die Ansprüche an die geometrischen und physikalischen Modelle wie beispielsweise an die korrekte Modellierung der Schwerefeldbeeinflüsse (Lotabweichungen, Geoidundulationen). Für die Bestimmung von Deformationen ist die Frage, ob eine 2D+1D- oder eine 3D-Ausgleichung vorgenommen wird, jedoch von untergeordneter Bedeutung, solange die Methoden bei der Differenzbildung nicht gemischt werden.

A1.2.3. Vergleich über mehrere Epochen und Deformationsanalyse

Ziel:	Auf Festpunkten gelagerte Koordinaten und Höhen resp. deren Änderungen mit ausgewiesener, bestmöglicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit für alle Kontrollpunkte
Vorgehen:	<ul style="list-style-type: none">• Freie Ausgleichung aller bisherigen Messepochen und optimale Bestimmung der Koordinaten aller Punkte• Beurteilen der Festpunkthypothese und sinnvolle Wahl der Festpunkte im gewählten Bezugssystem (Festpunktanalyse)• Vergleich über mehrere Messepochen• Berechnung der epochenspezifischen Koordinaten und Höhen der Kontrollpunkte sowie deren Genauigkeit und Zuverlässigkeit unter Berücksichtigung der Lagerung resp. der Genauigkeiten der Festpunkte• Berechnung der Koordinaten- und Höhendifferenzen inkl. Vertrauensintervall und Beurteilung ihrer Signifikanz bei einem festgelegten Vertrauensniveau

Die geodätische Deformationsmessung hat ganz allgemein zum Ziel, das kinematische Verhalten eines Bauwerks oder einer Geländepartie mittels Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitepochen zu erfassen und daraus die allfälligen Bewegungen zu berechnen und in geeigneter Art zu beschreiben. Dabei kann die Fragestellung der zu untersuchenden Kinematik unterschiedlich sein. Beispielsweise können die relativ kurzfristigen Bewegungen (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 werden. Während der Messung eines bestimmten Zustandes sollten alle beeinflussenden Umgebungsbedingungen (z.B. Stauhöhe, Temperaturen) möglichst konstant bleiben. Ebenso sollten beim direkten Vergleich verschiedener Zustände (z.B. unterschiedliche Stauhöhe) die nicht interessierenden Parameter (z.B. Temperaturen) möglichst wenig variieren.

Bei Vergleichen der Zustände über mehrere Epochen wird in einem ersten Schritt die Stabilität der Festpunkte geprüft. Die Beurteilung der Anschluss- oder Festpunkte wird üblicherweise als statistischer Hypothesentest formuliert (Festpunkthypothese). Bei der sog. **Festpunktanalyse** werden Punkte, die man geologisch und bautechnisch als stabil vermutet, im Hinblick auf allfällige Lage- oder Höhenänderungen beurteilt. Dabei sucht man die Referenzpunkte, deren Koordinaten über mehrere, am besten alle Epochen hinweg ohne (signifikan-



te) Verschiebungen in möglichst guter Übereinstimmung bleiben und somit als stabile Festpunkte betrachtet werden können.

Der Vergleich über **mehrere Messepochen** erfolgt durch:

- (a) Lagerung der frei ausgeglichenen Netze pro Messepoche mittels Helmert-Transformation (Ähnlichkeitstransformation) auf den gewählten Festpunkten, oder
- (b) eine Gesamtausgleichung (Multi-Epochen-Ausgleichung) aller Messepochen, gezwängt oder weich gelagert auf den gewählten Festpunkten

Die sorgfältige Festpunktanalyse ist insofern von Bedeutung, als sich eine geodätische Messreihe zur Überwachung von Stauanlagen in der Regel über mehrere Jahre, meist sogar über mehrere Jahrzehnte erstreckt. Während so langer Zeitperioden muss davon ausgegangen werden, dass auch die Festpunkte Bewegungen unterliegen können, welche beispielsweise durch geologisch-tektonische Vorgänge hervorgerufen wurden. Das Auswerteverfahren muss also diesem Umstand Rechnung tragen und auch im Falle einer reduzierten Anzahl stabiler Festpunkte ein der Realität möglichst nahes Verschiebungsbild wiedergeben.

Nebst der rein vermessungstechnischen Beurteilung sind bei der Festpunkthypothese auch bau- und geotechnische Aspekte zu berücksichtigen, ohne dabei die eigentliche Interpretation durch den Experten vorweg zu nehmen. Die Festpunktanalyse ist für die gesamte Deformationsanalyse von entscheidender Bedeutung und erfordert grosse Erfahrung seitens des Geodäten.

Der nächste Schritt der Deformationsanalyse umfasst die epochenspezifisch **genaue Bestimmung der Koordinaten** (Lage und Höhe) der dauerhaft markierten Kontrollpunkte am Bauwerk und im Gelände (Objektpunkte). Die berechneten Koordinaten der Kontrollpunkte sind als relative Angaben bezüglich der gewählten Festpunkte zu sehen. Die Ausgleichung liefert neben den gesuchten Punktkoordinaten eine Vielzahl von Zusatzinformationen, die für die Analyse der Verformungen und Beurteilung der Qualität der Messungen von grosser Bedeutung sind:

- Die Genauigkeit in Form von empirischen Standardabweichungen (mittleren Fehlern) und mittleren Fehlerellipsen: absolut bezüglich den Festpunkten, relativ zwischen den Neupunkten in derselben Epoche oder in unterschiedlichen Epochen
- die Zuverlässigkeitsrechtecke
- die Schätzung der erreichten Genauigkeit der verschiedenen Beobachtungstypen (Varianzkomponentenschätzung).

Die a posteriori Genauigkeit der Punktbestimmung ist nicht nur abhängig von der Qualität der eingesetzten Instrumente und der Netzkonfiguration, sondern auch von der Wahl der Festpunkte und deren Stabilität.

Ziel der Deformationsanalyse ist schliesslich die Bestimmung und Darstellung der Bewegungen der Kontroll- und Objektpunkte, d.h. der Lage- und Höhenunterschiede inkl. der Berechnung ihrer Genauigkeit, über eine oder mehrere Perioden (Differenz zweier Epochen) hinweg. Dabei ist zu prüfen, ob die Koordinaten- oder Höhendifferenzen für ein **gewähltes Vertrauensniveau** (z.B. 95% oder 99%) signifikant sind und somit als reelle Veränderungen zu betrachten sind oder nur durch Beobachtungsungenauigkeiten begründet werden können. Hierzu werden die relativen Fehlerellipsen der Kontrollpunkte zwischen deren Bestimmungen in zwei Messepochen berechnet.

A1.3. Dokumentation und Archivierung (Technischer Bericht)

A1.3.1. Aufgabe des Technischen Berichtes

Ziel:	Dokumentation der durchgeführten Messungen und deren Resultate
Inhalte:	<ul style="list-style-type: none">• Umfassende Beschreibung der durchgeführten Messungen (inkl. Messmittel und -bedingungen, Auswerteverfahren etc.) als Teil der langfristigen Überwachung• Beschreibung, Darstellung und geodätische Beurteilung der Resultate der Deformationsmessungen als Grundlage für die Experten

Der Technische Bericht über eine geodätische Deformationsmessung verfolgt primär zwei Ziele:

- ❑ Einerseits sind darin die durchgeführten geodätischen Arbeiten so zu beschreiben, dass die Informationen über die gewählten Mess- und Auswerteverfahren für zukünftige Messungen **vollständig** und **nachvollziehbar** vorhanden sind. Der Bericht soll den Zustand der Messanlage, die eingesetzten Messmittel und deren Charakteristika, die Messbedingungen und die Auswertemethoden dokumentieren. Dies ist insofern von Bedeutung, dass nur so eine konsistente Messreihe erreicht und langfristig verlässliche Aussagen über Veränderungen an der Stauanlage oder deren Umgebung gemacht werden können. Zielpublikum: Vermessungsingenieur (Geodät).
- ❑ Andererseits soll er die vermessungstechnischen Resultate liefern für die **Beurteilung des Zustandes und des Verhaltens** des Bauwerkes. Dies hat immer in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber, resp. mit dem für die Beurteilung zuständigen Bauingenieur/Experten zu erfolgen, damit der Technische Bericht alle notwendigen Informationen in der erforderlichen Form enthält. Zielpublikum: Werkeigentümer, Betreiber, Experten (Bauingenieur, Geologe), Aufsichtsbehörde.

Grundsätzlich sollen die Technischen Berichte inkl. aller Anhänge und Beilagen sowohl beim Werkeigentümer/Betreiber (Auftraggeber) als auch beim Geodäten (Auftragnehmer) aufbewahrt resp. archiviert werden. Auch die langfristige Verfügbarkeit (Speicherung, Archivierung) der Messungen sowie der Resultate in digitaler Form ist zu regeln. Dabei ist sowohl das Problem der physischen Datenspeicherung (Datenträger und Speichermedien) als auch die Gewährleistung der zukünftigen Verarbeitbarkeit (Datenformate, Betriebssysteme und Software) zu lösen. Denn grundsätzlich sollten der Zustand und die Veränderung des Bauwerkes über seine gesamte Lebensdauer rückverfolgbar sein, wozu allenfalls auch die Nachverarbeitung früherer Messdaten interessant sein kann.

A1.3.2. Inhalt und Form der technischen Berichte (inkl. Beilagen und Dokumentationen)

Ziel:	Vollständiger, verständlicher Bericht über die geodätischen Messungen und die Resultate der Deformationsanalyse
Inhalte::	<ul style="list-style-type: none">• Einleitung und Auftrag• Zustand der Messanlage• Beschreibung der Messungen• Auswertung und Deformationsanalyse• Beschreibung und geodätische Beurteilung der Resultate (Koordinaten- und Höhendifferenzen resp. Verschiebungen) und deren Genauigkeiten• Zusammenfassung und Schlussfolgerungen• Anhänge, Beilagen (Tabellen, Pläne, evtl. Auszüge aus der Auswertung)



Folgende Kapitel sind empfohlener Inhalt des Technischen Berichtes:

- ❑ Einleitung und Auftrag
 - Zusammenfassung des Auftrages (Auftraggeber, Auftragsdatum und –nummer)
 - Übersicht über die Geschichte der Messanlage
 - Bisher durchgeführte Messungen
- ❑ Messanlage
 - bei neuen Stauanlagen: Beschreibung der Messanlage und des Messkonzeptes, Dokumentation der Referenz- und Kontrollpunkte
 - Zustand der Messanlage (fehlende und mangelhafte Versicherungen), Beschädigungen, Unterhalt
 - Vorbereitungsarbeiten
 - Veränderungen (Erweiterung, Reduktion) am Umfang der Messanlage seit der letzten Messung
- ❑ Beschreibung der Messungen dieser Messepoche
 - Leitung, Personal, Hilfskräfte
 - Beschreibung der Messverfahren und der verwendeten Messinstrumente sowie Zubehör, inkl. Instrumenten- und Lattennummern sowie deren Genauigkeiten, letzte Instrumentenprüfung, Eich- resp. Kalibrationswerte
 - Messprogramm (Messablauf) mit Zeitpunkt und Umfang der geodätischen Messungen
 - Messverhältnisse mit meteorologischen Bedingungen, Staukoten, Mauertemperaturen und anderen wichtigen Umweltbedingungen
 - weitere, "nicht-geodätische" Messungen, welche für die Auswertung verwendet werden (z.B. Lotmessungen)
 - Besonderheiten der aktuellen Messung gegenüber der "Standardmessungen" (besondere Vorkommnisse)
 - Erfahrungen (wichtig für nächste Messung)
- ❑ Auswertung und Deformationsanalyse
 - Beschreibung der Auswerte- und Ausgleichungsverfahren sowie der eingesetzten Software
 - Geodätische Bezugssysteme (Koordinatensysteme) und Bezugsrahmen
 - Durchgeführte Vorverarbeitungen, z.B. Nivellement- oder GNSS-Auswertungen
 - Bereinigungen der Messdaten und angebrachte Eich-, Kalibrations- und Korrekturwerte (evtl. Verweis auf Anhang und Beilagen)
 - Freie Netzausgleichung pro Messepoche
 - Angaben über die a priori und a posteriori Genauigkeiten und Fehlerbereiche / Zuverlässigkeiten
 - Festpunkthypothese / Festpunktanalyse und Wahl der Festpunkte, allfällige Annahmen
 - Auf die Festpunkte gezwängte (Multi-Epochen-) Ausgleichung oder freie Gesamtausgleichung und Lagerung auf den Festpunkten (Passpunkten) mittels Helmert-Transformation

- Beschreibung der evtl. durchgeführten Transformationen (Werk- oder Objektkoordinatensystem)
- **Resultate**
 - Berechnung der Koordinaten- und Höhendifferenzen
 - Beschreibung und geodätische Beurteilung der vorliegenden Resultate, inkl. Beurteilung der Genauigkeit (gewähltes Konfidenzniveau) und Diskussion der Signifikanz von Lage- und Höhenänderungen
 - zur Terminologie: „Lage- oder Höhendifferenzen“, wenn die Verschiebungen oder Verformungen erst vermutet werden, also nicht als signifikant ausgewiesen sind; „Lageverschiebungen“ oder „Höhenänderungen“, wenn deren Signifikanz nachgewiesen wurde
 - Beschrieb der im Bericht enthaltenen grafischen und numerischen Beilagen und Anhänge
 - Aufzeigen von Schwachstellen, resp. Unzulänglichkeiten der aktuellen Messung
 - Diskussion besonderer Phänomene (ohne eigentliche Interpretation -> Sache der Experten)
 - allenfalls Hinweis auf die Datensicherung und Archivierung
- **Zusammenfassung und Schlussbemerkungen**
 - Zusammenfassung der wichtigsten Resultate und Erkenntnisse aus der Messung
 - Pendenzen (zum Unterhalt der Messanlage) und wichtige Hinweise für die nächste Messung und Auswertung/Analyse
 - Vorschlag für den Zeitpunkt der nächsten Messung

A1.3.3. Darstellung der Messresultate

Ziel:	Übersichtliche Darstellung der Resultate für die Interpretation
Inhalte:	<ul style="list-style-type: none">• Plan der Messanlage; Netzpläne• Pläne der Lageverschiebungen- und Höhenänderungen• Beschreibung und allenfalls Tabellen, technische Pläne und Bilder

Der Technische Bericht soll alle für die Interpretation des Verhaltens des Bauwerkes notwendigen Resultate in übersichtlicher grafischer und numerischer Form enthalten. Grössere Tabellen (Koordinatenlisten, Koordinatendifferenzen, Genauigkeiten, Zuverlässigkeiten, etc.) kommen meist in den Anhang, Pläne in die Beilagen.

Die Koordinaten(-differenzen) sollen im übergeordneten geodätischen Bezugssystem (Landeskoordinatensystem) und eventuell in einem sinnvollen lokalen Werk- oder Objektkoordinatensystem (z.B. längs und quer zur Mauer) angegeben werden, welches die Interpretation erleichtert.

Nicht unmittelbarer Bestandteil eines Technischen Berichtes sind seitenlange Programmdateien; sie sind allenfalls in einem Anhang oder in Beilagen zum Bericht aufzunehmen oder in digitaler Form abzugeben.

Grundsätzlich sind zu jedem numerischen Resultat (z.B. Koordinaten, Verschiebungen) immer dessen Genauigkeiten anzugeben. Dazu üblich ist die Angabe oder Darstellung von mittleren Fehlern (eindimensional, z.B. Nivellement), von mittleren Fehlerellipsen (zweidimensional) oder Fehlerellipsoiden (dreidimensional); allenfalls können diese auch umgerechnet werden in Genauigkeiten / Signifikanzbereiche in Richtung der Koordinatenachsen.



Die **Darstellungen der Messanlage** (Netzpläne, Grundrisse, Ansichten, Querschnitte) sollen hilfreiche topografische Hintergrundinformationen sowie die Stauanlage selbst und wichtige andere baulichen Anlagen enthalten. Zudem sollen das Koordinatennetz, die Nordrichtung, der Massstab und ein Distanzbalken eingetragen werden. Unter Umständen können auch Fotos wertvolle Informationen über den Zustand der Messanlage oder die Durchführung der Messungen geben. Insbesondere bei neuen Stauanlagen können zudem technische Skizzen und Detailpläne wichtige Dokumente sein.

In den **Plänen der Lageverschiebungen und Höhenänderungen** sind der Planmassstab und der Massstab der eingezeichneten Vektorzüge anzugeben sowie die entsprechenden Distanzbalken und das lokale Koordinatengitter einzutragen. Die Vektorzüge der Veränderungen über mehrere Epochen sind durch klare Farbkodierungen darzustellen. Üblicherweise wird für die grafische Darstellung der Lage- und Höhenänderungen der Massstab 1 : 1 verwendet. Dahinter steht die Überlegung, dass Änderungen, welche kleiner sind als die zeichnerische Auflösung meist auch nicht signifikant sind. Zudem verleitet eine Darstellung im Massstab $x : 1$ (wobei $x > 1$) meist zur Überinterpretation der Lage- und Höhenänderungen, d.h. sie werden als grösser wahrgenommen als sie tatsächlich sind. Bei grossen Lage- und Höhenänderungen kann eine verkleinerte Darstellung jedoch sinnvoll sein.

Die Pläne müssen die **Fehlerbereiche der Resultate** (Koordinaten und Höhen resp. berechnete Differenzen) übersichtlich aufzeigen. Die grafische Darstellung der Fehlerellipsen für jeden dargestellten Punkt ist oft wenig sinnvoll. Zugunsten der Übersichtlichkeit genügt eine Beschränkung auf wenige, "typische" Fehlerellipsen.

Nach Absprache mit dem Auftraggeber und/oder den Experten sind besondere Darstellungen der Veränderungen des Bauwerkes oder bestimmter Geländepartien zu erstellen. Diese können sich auf bestimmte Messepochen beziehen oder über die ganze Messperiode (seit der ersten Messung) erstrecken. Denkbar sind auch spezielle Weg/Zeit-Grafiken.

Geodätische Messreihen sind allenfalls in Tabellen und/oder Grafiken mit nicht-geodätischen Informationen, Messungen oder Resultaten zu kombinieren.





A2. Muster-Pflichtenheft

XXXXXXXXX XXXXXXXX AG

Staumauer XXXXXXXXXXX

Geodätische Deformationsmessungen Ausschreibung (Musterpflichtenheft)

Bewerbung für Ingenieurarbeiten

Bewerber

.....

.....

.....

.....

Der Bewerber erklärt, dass er die nachstehenden Bestimmungen zur Kenntnis genommen hat und aufgrund derselben seine Bewerbung einreicht.

Ort und Datum:

Der Bewerber:
(Stempel und Unterschrift)

.....

.....



A. Allgemeines

A1. Bewerbung

- a) Auftraggeber xxxxxxxxx xxxxxxxx AG
Hauptstrasse 99
9999 Ortlikon
- b) Auftrag Geodätische Deformationsmessungen
der Staumauer XXXXXXXXXXXX
- c) Stichwort Geodätische Deformationsmessungen
- d) Verfahren Einladungsverfahren
- e) Ausführungstermine Offerteingabe: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
Vergabeentscheid: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
Durchführung der geodätischen Messungen ab xxxxxxxxxxxx
- f) Eingabeadresse xxxxxxxxx xxxxxxxx AG
Hauptstrasse 99
9999 Ortlikon
Tel. ++41 nn nnn nn nn
Fax ++41 nn nnn nn nn

A2. Termine

- a) Eingabefrist dd. mm. yyyy (Poststempel)
- b) Gültigkeit des Angebotes 6 Monate ab Eingabetermin
- c) Vergabeentscheid dd. mm. yyyy

A3. Sprache der Bewerbung

Das Angebot ist in deutscher Sprache einzureichen.



A4. Begehung

Eine Begehung kann in Absprache mit dem Auftraggeber durchgeführt werden.

A5. Angaben des Bewerbers

sind im Kapitel C "Angaben des Bewerbers" zu machen.

A6. Bietergemeinschaften

Die Bildung einer Ingenieurgemeinschaft ist zulässig.

A7. Mehrfachbewerbungen

Mehrfachbewerbungen eines Anbieters sind nicht erlaubt.

A8. Fragen zur Ausschreibung

Fragen zur Ausschreibung können schriftlich bis zum dd. mm. yyyy eingereicht werden. Die gestellten Fragen und deren Beantwortung werden allen Anbietern schriftlich zugestellt.

A9. Umfang der Arbeiten

Kapitel B und D geben einen Überblick über die auszuführenden Arbeiten. Der Auftraggeber behält sich jedoch vor, dem Umfang der Arbeiten einzuschränken oder auszudehnen.

A10. Honorarordnung SIA

Sofern in der vorliegenden Ausschreibungsunterlage nichts anderes festgelegt wird, gelten die Bestimmungen der Honorarordnung SIA 103/2003.

A11. Kontrollrecht des Auftraggebers

Der Auftraggeber hat jederzeit das Recht alle geodätischen Arbeiten beim Bewerber zu kontrollieren oder prüfen zu lassen und die entsprechenden Dokumente z.B. Messprotokolle einzusehen oder eine Kopie davon anzufordern.



A12. Rechte und Publikation

Alle Rechte an den Ergebnissen der geodätischen Deformationsmessungen liegen beim Auftraggeber. Publikationen bedürfen der Einwilligung des Auftraggebers.

A13. Beizug von Dritten

Arbeiten, welche nicht durch den Anbieter selbst, sondern durch einen Unterakkordanten ausgeführt werden, bedürfen der ausdrücklichen Genehmigung durch den Auftraggeber.

A14. Benutzung der Messanlage durch Dritte

Der Auftraggeber hat jederzeit das Recht, auf der geodätischen Messanlage Dritte mit Vermessungsarbeiten zu beauftragen.

A15. Änderungen beim Personal

Projektleiter und Stellvertreter können nur mit Zustimmung des Auftraggebers in ihrer Funktion durch andere Personen ersetzt werden.

A16. Änderungen beim Instrumentarium

Der Beauftragte informiert den Auftraggeber unverzüglich über Änderungen des verwendeten Instrumentariums. Änderungen des Instrumentariums bedürfen der Genehmigung des Auftraggebers.



B. Inhalt und Umfang des Auftrages

B1. Allgemeine Angaben zum Auftrag

.....

B2. Problematik

.....

B3. Projekt

.....



C. Anforderungen an den Anbieter

C1. Allgemeines zu geodätischen Deformationsmessungen

Geodätische Deformationsmessungen sind spezielle Vermessungsaufgaben. Höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit bedingen den Einsatz von entsprechendem Instrumentarium und die Anwendung besonderer Messmethoden. Die Vermeidung systematischer Fehler hat ein grosses Gewicht und bedingt eine periodische Kontrolle des Instrumentariums.

Geodätische Deformationsmessungen sind nur mit geprüften und bewährten Mess- und Auswertungsmethoden auszuführen. Sie dürfen in keinem Fall mit experimentellen Techniken getätigt werden.

C2. Angaben des Bewerbers

Name des Bewerbers:			
Gründungsjahr:			
Adresse:			
Telefon und Fax:	Tel.:	Fax:	
e-Mail:			
Anzahl Mitarbeiter total: davon Ing. Geodäsie / Deformationsmessung			
Ausbildung Mitarbeiter:	ETH/Uni :	FH:	Lehre:
Technische Leitung:			
Kaufmännische Leitung:			
Projektleiter:			
Qualitätssicherung:			
Den Bewerbungsunterlagen ist ein Organigramm mit der Firmenstruktur beizulegen			



C3. Angaben über die Berufshaftpflicht-Versicherung

Versicherungsgesellschaft:

Deckungssumme:

Selbstbehalt:

C4. Objektbezogene Firmenreferenzen

Referenzobjekt 1	
Name des Objektes:	
Auftraggeber / Bauherrschaft:	
Aufgabe / Funktion des Bewerbers:	
Schlüsselpersonal: Projektleitung Sachbearbeitung	
Zeitraum der Realisierung:	
Zusatzinformationen dürfen beim Auftraggeber eingeholt werden:	

Referenzobjekt 2	
Name des Objektes:	
Auftraggeber / Bauherrschaft:	
Aufgabe / Funktion des Bewerbers:	
Schlüsselpersonal: Projektleitung Sachbearbeitung	
Zeitraum der Realisierung:	
Zusatzinformationen dürfen beim Auftraggeber eingeholt werden:	



C5. Vorgesehener Personaleinsatz

C5.1 Projektleiter

Name, Vorname:	
Jahrgang:	
Ausbildung:	
Sprachen:	
Im Beruf tätig seit:	
Funktion in der Firma:	
In der Firma tätig seit:	
Einsatz in den letzten 2 Jahren:	

Persönliche Referenzobjekte

Objekt 1

Name:	
Werkeigentümer:	
Art der Deformationsmessung:	
Zeitraum der Ausführung:	
Einsatz / Funktion als:	

Objekt 2

Name:	
Werkeigentümer:	
Art der Deformationsmessung:	
Zeitraum der Ausführung:	
Einsatz / Funktion als:	



C5.2 Stellvertreter des Projektleiters

Name, Vorname:	
Jahrgang:	
Ausbildung:	
Sprachen:	
Im Beruf tätig seit:	
Funktion in der Firma:	
In der Firma tätig seit:	
Einsatz in den letzten 2 Jahren:	

Persönliche Referenzobjekte

Objekt 1

Name:	
Werkeigentümer:	
Art der Deformationsmessung:	
Zeitraum der Ausführung:	
Einsatz / Funktion als:	

Objekt 2

Name:	
Werkeigentümer:	
Art der Deformationsmessung:	
Zeitraum der Ausführung:	
Einsatz / Funktion als:	



D. Geodätische Messungen und Auswertung

D1. Umfang der Messungen

.....

(Falls zusätzlich zu den unter D2 – D4 beschriebenen Messtypen auch andere, z.B. GNSS-Messungen eingesetzt werden, müssen diese ebenso detailliert beschrieben werden.)

D2. Winkelmessungen

Die Erfahrung des Beobachters entscheidet was, wann, wo und wie gemessen wird. Es ist das Ziel der Messungen mit möglichst wenigen Beobachtungen eine entsprechend definierte Beobachtungsgenauigkeit und ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen. Die Berücksichtigung lokaler Verhältnisse und atmosphärischer Besonderheiten bei der Beobachtung von Richtungs- und Höhenwinkeln hat eine hohe Bedeutung. Messungen mit ATR (automatische Zielerfassung) sind nur unter gewissen Bedingungen zugelassen

Einen weiteren entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Winkelmessung haben die eingesetzten Zielmarken. Sie entscheiden über die Güte der Anzielgenauigkeit.

Die zu erreichenden und nachzuweisenden Genauigkeiten betragen:

- einfacher mittlerer Fehler der Zentriergenauigkeit ± 0.1 mm
bei optischer Zentrierung mit Nadirlot $\pm 0.2 - 0.3$ mm (je nach Höhe)
- einfacher mittlerer Fehler Richtungsmessung (Satzmittel) $< \pm 0.2$ mgon ($< \pm 2cc$)
- einfacher mittlerer Fehler Höhenwinkelmessung (Satzmittel) $< \pm 0.3$ mgon ($< \pm 3cc$)

Vom Bewerber zum Einsatz vorgesehenes Instrumentarium:

Präzisionstheodolit:	: Typ:	Anzahl:
	: Typ:	Anzahl:
Zielmarken:	: Typ :	Anzahl:
	: Typ :	Anzahl:

D3. Distanzmessungen

Die Verwendung von Präzisionsreflektoren mit bekannter Additionskonstante (einfacher mittlerer Fehler ± 0.1 mm) ist Bedingung. Alle Distanzen sind (soweit möglich) hin und zurück zu messen.

Die korrekte Modellierung der atmosphärischen Bedingungen ist bei Präzisionsdistanzmessungen entscheidend für die erreichbaren Genauigkeiten. Die Erfahrung der Beobachter und



die herrschenden Meteoverhältnisse bestimmen die Zahl der Temperaturmessstellen.

Die zu erreichenden und nachzuweisenden Genauigkeiten betragen:

- einfacher mittlerer Fehler der Zentriergenauigkeit ± 0.1 mm
bei optischer Zentrierung mit Nadirlot $\pm 0.2 - 0.3$ mm (je nach Höhe)
- einfacher mittlerer Fehler Distanzmessung $< \pm 0.15$ mm + 1 ppm

Vom Bewerber zum Einsatz vorgesehene Instrumentarium:

Distanzmesser:	: Typ:	Anzahl:
	: Typ:	Anzahl:
Reflektoren:	: Typ :	Anzahl:
	: Typ :	Anzahl:

D4. Nivellemente

Die Nivellemente und die daraus hervorgehenden Höhenänderungen liefern wichtige Hinweise auf das Verhalten einer Talsperre. Dem stehen grundsätzlich die kleine Zuverlässigkeit eines Nivellements sowie dessen Anfälligkeit auf Systematiken gegenüber. Es ist daher beim Nivellement besonders wichtig, alle möglichen systematischen Einflüsse (Instrumente, Latten, Aufstellung, Umstellpunkte, etc.) möglichst auszuschliessen

Für die Beobachtung der Nivellemente können die anerkannten Regeln des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo zur Anwendung gelangen. Andere Messmethoden sind aber bei entsprechender Begründung und vorheriger Absprache durchaus denkbar.

Die zu erreichenden und nachzuweisenden Genauigkeiten betragen:

- einfacher mittlerer Fehler pro Instrumentenaufstellung $< \pm 0.15$ mm

Vom Bewerber zum Einsatz vorgesehene Instrumentarium:

Nivelliergeräte:	: Typ:	Anzahl:
	: Typ:	Anzahl:
Invarlatten:	: Typ :	Anzahl:
	: Typ :	Anzahl:
	: Typ :	Anzahl:



D5. Instrumentenprüfung

Beim Einsatz geodätischer Messmittel muss sich der Ingenieur darauf verlassen können, dass diese den von ihm gewünschten bzw. vorgeschriebenen Genauigkeitsanforderungen genügen. Daher ist die Aufgabe des Anbieters die Konformität der zum Einsatz vorgesehenen geodätischen Instrumente zu prüfen.

Der Anbieter hat die Prüfung seiner Instrumente und Komponenten (z.B. Invarlatten, GNSS-Antennen) zu beschreiben und bei Bedarf die entsprechenden Nachweise zu erbringen.

D6. Auswertung

Die Auswertung der Messdaten hat in einem freien, ungezwängten Netz mit anschliessender Lagerung in überprüften Festpunkten zu erfolgen, z.B. mittels einer Helmert-Transformation. Erreichte mittlere Fehler a posteriori sind auszuweisen. Der Anbieter hat die Möglichkeiten (u.a. 2-d, 3-d) der eingesetzten Auswertesoftware detailliert nachzuweisen.

Vom Bewerber zum Einsatz vorgesehene Software:

Ausgleichung:	:	Typ:	Fabrikat:
	:	Typ:	Fabrikat:
Transformationen:	:	Typ:	Fabrikat:
	:	Typ:	Fabrikat:

D7. Technischer Bericht

Der technische Bericht gibt detailliert Auskunft über die aktuelle Messung und deren Resultate und kann in folgenden Kapiteln aufgeteilt sein:

1. Allgemeines
2. Messanlage
3. Aktuelle Messung
4. Auswertung
5. Resultate und geodätische Beurteilung

Der Bericht ist in XX Exemplaren sowie in digitaler Form innerhalb von 3 Monaten nach Durchführung der Messungen abzuliefern.



D8. Abzuliefernde Dokumente

- Dokumentation der rohen Messwerte in einer für den geodätischen Fachmann lesbaren Form nach Ende der Messung
- Lückenlose Dokumentation der Auswertung in einer für den geodätischen Fachmann lesbaren Form

D9. Archivierung der Messdaten und Dokumente

Alle Rohmessungen und bereinigten Messungen sowie alle für die Auswertung relevanten Zusatzinformationen ebenso wie die unter D8. erwähnten Dokumente müssen vom Auftragnehmer in geeigneter digitaler und/oder analoger Form langfristig, d.h. im Minimum während der Dauer des Auftrages gespeichert bzw. archiviert werden. Die Rohmessungen müssen in einer Software- und Betriebssystem-neutralen Form gespeichert werden.



E. Angebot

E1. Allgemein gültige Bedingungen

.....

E2. Offerte für Messung und Auswertung

Der Auftraggeber ist an einer qualitativ hoch stehenden Ausführung der Arbeiten und ebenso an einem wirtschaftlich günstigen Angebot interessiert. Die SIA Ordnung 103/2003 für Leistungen und Honorare für Bauingenieure gilt als Grundlage

E3. Pauschalofferte

Die folgende Pauschale beinhaltet die gesamten Aufwendungen für die Messung, die Transportkosten und Spesen, sowie die Benutzungsgebühren der Spezialinstrumente und -Software, die Reproduktion und Mehraufwendungen infolge Schlechtwetters.

Pauschalbetrag CHF

exkl. MWST

E4. Zusätzliche Arbeiten

Unvorhergesehen oder zusätzliche Arbeiten sind nur in vorheriger Absprache mit dem Auftraggeber erlaubt und werden nach effektivem Zeitaufwand, höchstens aber zu den jeweils gültigen KBOB-Ansätzen, wie folgt, abgerechnet:

A	Fr.	/ Std.
B	Fr.	/ Std.
B/C	Fr.	/ Std.
C	Fr.	/ Std.
C/D	Fr.	/ Std.
D	Fr.	/ Std.
D/E	Fr.	/ Std.
E	Fr.	/ Std.
F	Fr.	/ Std.
G	Fr.	/ Std.
Lehrling	Fr.	/ Std.



Eine Personalliste mit Name, Jahrgang, Ausbildung, Funktion/Stellung/Einsatz, Kategorie und Stundenansatz aller ev. zum Einsatz kommenden Mitarbeitern ist diesem Angebot beizulegen.

E5. Nebenkosten

Reisekosten:

Öffentliche Transportmittel
Autotransporte

Reisespesen:

Übernachtung, inkl. Frühstück
Hauptmahlzeit

Kopien:

A3	A4
Grossformatkopien	
Planplots	

Verbrauchsmaterial im Feld gem. beiliegender Liste

Einsatz von speziellen Vermessungsinstrumenten:

Distanzmesser	Typ	
	Fr.	/ Einsatztag
Präzisionstheodolit	Typ	
	Fr.	/ Einsatztag
Zielmarken / Reflektoren	Typ	
	Fr.	/ Einsatztag
...	Typ	
	Fr.	/ Einsatztag

Einsatz von spezieller EDV Software:

Name	
Tarif	Siehe Beilage "Verrechnungsansätze Ausgleichungssoftware"

E6. Teuerung

Die Teuerung richtet sich nach den Bestimmungen der KBOB





A3. Begriffe

A priori und a posteriori: Bei der Beurteilung des Messsystems, insbesondere von dessen Genauigkeit und Zuverlässigkeit, wird zwischen den theoretisch zu erwartenden Werten **vor** (a priori) einer Ausgleichung und den realisierten Werten **nach** (a posteriori) der Ausgleichung der effektiv durchgeführten Messungen unterschieden.

AGNES: Automatisches GNSS Netz Schweiz (Stand 2009). Das Netz umfasst 31 permanent messende GNSS Stationen, welche gleichmässig über die ganze Schweiz verteilt sind. Die Messdaten dieser Stationen werden vom Bundesamt für Landestopografie (swisstopo) stündlich und täglich in Verbindung mit ca. 50 europäischen und weltweiten GNSS Stationen ausgewertet. Sie dienen auch als Referenzstationen für den schweizerischen Positionierungsdienst swipos.

Atmosphärische Refraktion: Unter Refraktion (Brechung) versteht man i.A. die Richtungsänderung eines Lichtstrahles (einer ebenen Welle) beim Übergang von einem Stoff in einen anderen. Diese Richtungsänderung wird durch die lokale Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes hervorgerufen. In der Geodäsie werden Refraktionsanomalien durch Inhomogenitäten der Luftschichten (Temperaturverhältnisse) verursacht. Sie wird somit wesentlich durch den Verlauf der Visur über dem Gelände beeinflusst.

Ausgleichsrechnungen: Durch die Ausgleichsrechnung wird anhand einer Reihe von Messdaten ein oder mehrere unbekannte Parameter geschätzt. Ziel der Ausgleichung ist, dass sich dieser unbekannte Parameter "bestmöglich" anpasst indem die unvermeidlichen kleinen Widersprüche minimiert werden. Sie liefert somit den wahrscheinlichsten Wert für die zu berechnenden Unbekannten. In der Geodäsie liefert die Ausgleichsrechnung neben den üblicherweise geschätzten Koordinaten unter anderem auch Angaben über die erreichten Genauigkeiten.

Bezugssystem und Bezugsrahmen: Der Begriff (geodätisches) Bezugssystem (auch Referenzsystem genannt) bezeichnet die (theoretische) Definition eines Koordinatensystems im Raum. Sie umfasst insbesondere Angaben zum Nullpunkt, zu den Richtungen der Koordinatenachsen und deren Massstab (meist Meterdefinition) sowie die Grösse und Lagerung allfälliger Bezugsflächen (z.B. Bezugsellipsoid). Der Bezugsrahmen (oder Referenzrahmen) bezeichnet die (praktische) Realisierung eines Bezugssystems (aus Beobachtungen ermittelte Koordinatensätze von konkreten Punkten). Beispiel: Neues Bezugssystem der Schweiz: CH1903+, zugehöriger Bezugsrahmen: LV95. Es können aber auch rein örtliche, lokale Bezugssysteme und –rahmen definiert werden, meist bezogen auf die "Staumauerachse".

Elektronische Distanzmessung, auch elektro-optische Distanzmessung genannt: Ein Verfahren zur indirekten Entfernungsmessung. Mittels Messung jener Zeit, die ein Schall- oder Lichtsignal für das Durchlaufen der Messstrecke benötigt wird die Distanz bestimmt (Laufzeitmessung).

Erweiterte Messnetze: erweiterte Messnetze dienen im Allgemeinen dazu, weitergehenden Informationen und detailliertere Aussagen über das Verhalten der Talsperre und/oder des umliegenden Geländes zu erhalten. Sie werden beispielsweise dann eingerichtet, wenn eine zusätzliche Gefährdung des Bauwerkes vorliegt, oder wenn das bestehende geodätische Netz die gestellten Anforderungen nicht mehr erfüllen kann

Fest- oder Fixpunkte (siehe Referenzpunkte)

Freie und gezwängte Ausgleichung: Die Ausgleichungsrechnung oder die Ausgleichung, ist eine mathematische Optimierungsmethode, um auf Basis von erhobenen Messdaten die unbekannt Parameter eines geometrisch-physikalischen Modells oder die Parameter einer vorgegebenen Funktion zu bestimmen ("zu schätzen"). Ziel der Ausgleichung ist, dass sich das endgültige Modell bzw. die Funktion den Daten und ihren unvermeidlichen kleinen Widersprüchen "bestmöglich" anpasst.

Die freie Ausgleichung geht davon aus, dass die verwendeten Festpunkte fehlerlos sind. Dies wird meist dadurch erreicht, dass nur die absolut minimal nötige Anzahl von Festpunkten verwendet wird. Dadurch werden keine Zwänge "von aussen" (eben durch Fehler der Festpunkte) auf die ausgeglichenen Koordinaten der Kontrollpunkte übertragen.

Bei der gezwängten Ausgleichung hingegen wird der Einfluss von Fehlern, oder Zwängen zwischen den als fehlerfrei betrachteten Festpunkten auf die ausgeglichenen Koordinaten übertragen.

Genauigkeit und Zuverlässigkeit: Der Begriff Genauigkeit gilt als qualitative Bezeichnung für das Ausmass der Annäherung von einem Ergebnis an den wahren Wert. Die Genauigkeit, oder der mittlere Fehler nach dieser Definition berücksichtigt also die zufälligen und eventuellen systematischen Abweichungen. Der Ausdruck Zuverlässigkeit ist als Mass zu verstehen, wie gut die erhobenen Beobachtungen durch die Gesamtzahl der übrigen Beobachtungen kontrolliert werden. Zuverlässig hat also gleich wie in der Umgangssprache die Bedeutung von vertrauenswürdig, kontrolliert, sicher.

GNSS: Global Navigation Satellite Systems; Überbegriff für globale, satellitengestützte Navigations- und Messsysteme wie das U.S. amerikanische Global Positioning System (GPS), das russische Navigationssystem GLONASS oder das europäische Satellitensystem GALILEO sowie deren Erweiterungen, beispielsweise mit geostationären Satelliten.

In geodätischen Netzen zur Überwachung von Stauanlagen werden GNSS-Messungen primär eingesetzt für die Kontrolle der Stabilität der Referenzpunkte sowie zur Verbindung der lokalen Messnetze mit Referenzpunkten, welche weiter entfernt und allenfalls in anderen geologischen Zonen liegen (vgl. Beispiele im Anhang A4). Die Genauigkeit der GNSS-Messungen ist stark abhängig von

- den eingesetzten Instrumenten und Antennen bzw. der Güte ihrer Kalibrationswerte,
- der Eignung der gemessenen Punkte/Stationen für GNSS-Messungen (Horizontfreiheit, Mehrweg- und Störsignale),
- der Anzahl und Konstellation der verfügbaren Satelliten,
- der Dauer und allenfalls Tageszeit der Messungen,
- der Distanz- und Höhendifferenz zwischen den Messstationen bzw. zu den Referenzstationen und schliesslich auch
- der Auswertesoftware.

Bei sorgfältiger Durchführung der Messungen und Auswertungen mit geprüften geodätischen Mehrfrequenz-Empfängern und -Antennen sind Genauigkeiten (1 Sigma) für die relative Lage von 1-3 mm erreichbar. Die Messungenauigkeiten für die Höhendifferenzen sind ungefähr dreimal grösser als in der Lage



Helmert-Transformation: Die Helmert-Transformation, benannt nach Geodäten und Mathematiker Friedrich Robert Helmert, ist eine Koordinatentransformation für dreidimensionale kartesische Koordinaten, die in der Geodäsie häufig zur verzerrungsfreien Umrechnung von einem in ein anderes ebenfalls dreidimensionales System genutzt wird. Somit ist die Helmert-Transformation eine Ähnlichkeitstransformation. Analog zum 3-dimensionalen Fall lässt sie sich auch für 2- oder 1-dimensionale Koordinatensätze anwenden.

Hybride Messnetze: hybride Messnetze umfassen neben den klassischen geodätischen Messmethoden (Winkel-, Distanzmessungen, Nivellements, etc.) die neueren Methoden wie GNSS aber ev. auch physikalisch-geodätische Messungen (z.B. Schwere-messungen, etc.)

Innere und äussere Genauigkeit: Die innere Genauigkeit oder Präzision bezeichnet die Wiederholgenauigkeit einer Messung oder einer Koordinatenbestimmung bei gleich bleibenden Versuchsbedingungen; insbesondere sind auch allfällige Lagerungs- oder Konfigurationsdefekte eines geodätischen Netzes (wie z.B. ein Massstabsfehler) nicht berücksichtigt. Demgegenüber berücksichtigt die äussere Genauigkeit oder Richtigkeit (entsprechend der Abweichung zwischen Erwartungswert und wahren Wert) auch die Möglichkeit von variierenden Messbedingungen, beispielsweise auch die Messung mit anderen Instrumenten.

Inneres und äusseres Netz: Die Festlegung der Grenze zwischen dem inneren und dem äusseren Netz ist abhängig von der Wahl der Festpunkte bzw. der Definition des Bezugsrahmens:

- **Inneres Netz:** Messnetz oder Messsystem zur Bestimmung der relativen Verschiebungen oder Verformungen innerhalb der Stauanlage.
- **Äusseres Netz:** Messnetz oder Messsystem das die Bestimmung von Verschiebungen gegenüber "absoluten" Festpunkten (im gewählten Bezugsrahmen) ermöglicht.

Kalibrierung: Bestimmung der systematischen Fehler eines Instruments.

Konfidenzbereiche: Das Konfidenz- oder Vertrauensintervall eines geschätzten Parameters, beispielsweise einer Koordinate oder einer Koordinatendifferenz, beschreibt den Bereich um den Schätzwert, der mit einer festgelegten Wahrscheinlichkeit die wahre Lage des Parameters enthält und damit eine Aussage über die Signifikanz ermöglicht.

Dabei werden je nach gewünschter Aussagekraft verschiedene Konfidenzniveaus vorgegeben. Folgende Tabelle zeigt die notwendigen Faktoren (Multiplikatoren der Standard-Fehlerintervalle) für die Berechnung der gewünschten Konfidenzniveaus im Falle von ein-, zwei- und dreidimensionalen Konfidenzgebieten einer einzelnen Bestimmung sowie für den Fall der Differenz zweier Bestimmungen.

Konfidenz- niveau (Wahrschein- lichkeit)	Wertebereich (Dimension = 1) Intervall		Lage (Dimension = 2) Ellipse		Raum (Dimension = 3) Ellipsoid	
	Original	Differenz	Position	Differenz	Position	Differenz
19.9 %	-	-	-	-	1	1.41
39.4 %	-	-	1	1.41	-	-
68.3 %	1	1.41	-	-	-	-
95.0 %	1.96	2.77	2.45	3.46	2.70	3.82
99.0 %	2.58	3.65	3.04	4.30	3.37	4.76

Lesebeispiel: Die mittlere Fehlerellipse um einen Lagepunkt beschreibt dessen zwei-dimensionale Position mit einer Wahrscheinlichkeit von 39.4 %. Um die Differenz zweier Bestimmungen in verschiedenen Epochen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % beschreiben zu können, müssen die Achsen der mittleren Fehlerellipse um den Faktor 3.46 vergrößert werden, für die Wahrscheinlichkeit 99 % sogar um den Faktor 4.30.

Kontrollpunkte (auch Objektpunkte): Kontroll- und Objektpunkte sind (möglichst) dauerhaft materialisierte Punkte an der Stauanlage (dem Objekt) oder in dem zu überwachenden Gelände (z.B. im Fels), welche bezüglich den Referenzpunkten eingemessen werden. Sie sollen möglichst repräsentativ sein für die zu bestimmenden Verschiebungen und Verformungen der Objekte und Geländepartien.

Korrelation: Die Korrelation beschreibt die lineare Beziehung zwischen zwei oder mehr statistische Variablen. In der Geodäsie wird unter Korrelation das Mass der Abhängigkeit von verschiedenen Beobachtungen untereinander verstanden. So sind beispielsweise zwei Messungen einer Höhendifferenz, welche zeitlich unmittelbar nacheinander durchgeführt werden, stark korreliert (u.a. wegen gleichen Meteoverhältnisse, etc.)

Lageverschiebungen und Höhenänderungen: Koordinatenunterschiede zwischen den Epochen, wenn deren Signifikanz auf dem gewählten Vertrauensniveau nachgewiesen wurde. Aufgabe der Geodäsie ist es primär solche Lage- und Höhenänderungen zu bestimmen. Nichtsignifikante Unterschiede werden als Lage- und Höhendifferenzen bezeichnet.

Lotabweichungen und Geoidundulationen: Mit Lotabweichung wird der Winkel zwischen der effektiven Lotrichtung und der Normalen auf das für die Ausgleichung verwendete Referenzellipsoid in einem Vermessungspunkt bezeichnet. Die Geoidundulation ist dabei die Höhendifferenz zwischen diesem Referenzellipsoid und dem Geoid, welches, global betrachtet, in guter Näherung durch den mittleren Meeresspiegel der Weltmeere repräsentiert wird.

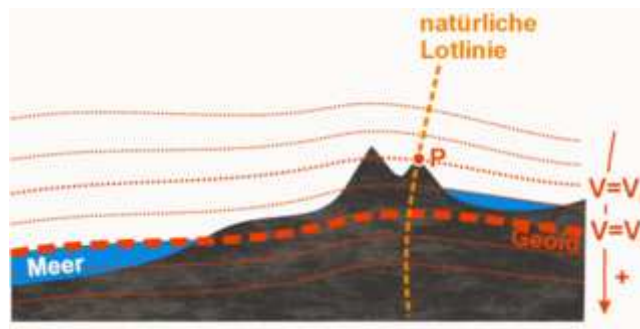


Abbildung A3.1: Lotabweichung und Geoidundulation

Messpunkte: siehe Kontroll- oder Objektpunkte

Methode der kleinsten Quadrate: Die Methode der kleinsten Quadrate (bezeichnender auch: der kleinsten Fehlerquadrate; englisch: *least squares method*) ist das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung mittels einer Approximation. Dabei soll diese Approximation berücksichtigen, dass grosse Abweichungen der Modellfunktion weniger Einfluss auf das Endresultat haben als kleine. Daraus resultiert die Bedingung, dass die quadratische Addition der Residuen (Differenzen zwischen der Beobachtung und dem ausgeglichenen Wert dieser Beobachtung) möglichst klein, also minimal werden soll.

Referenzpunkte (auch Fest- oder Fixpunkte): Die Verschiebungen und Verformungen der Stauanlage werden gegenüber sorgfältig ausgewählten und dauerhaft materialisierten, stabilen, von den Bewegungen der zu untersuchenden Objekte unabhängigen Referenzpunkten bestimmt. Die Koordinaten und/oder Höhen der Referenzpunkte müssen im gewählten Bezugsrahmen bekannt sein bzw. genau bestimmt werden können. Referenzpunkte können, müssen aber nicht stationierbar sein. Falls die Referenzpunkte aufgrund einer sog. Festpunktanalyse über zwei oder mehrere Messperioden als fest gewählt werden können (a priori gleich bleibende Koordinaten) und somit die Lagerung des geodätischen Netzes mitbestimmen, so spricht man von Festpunkten (evtl. Fixpunkten).

Verformungen: Ursache, welche zu Lage- und/oder Höhenänderungen führen kann. Es ist Aufgabe des Bauingenieurs, aufgrund der ermittelten Lage- und Höhenänderungen auf deren Ursachen und Einfluss auf die Sicherheit der Anlagen zu schliessen. Eine mögliche Ursache sind Verformungen des Bauwerks oder dessen Untergrundes infolge Quellens, Änderung der Temperaturbelastung, etc.

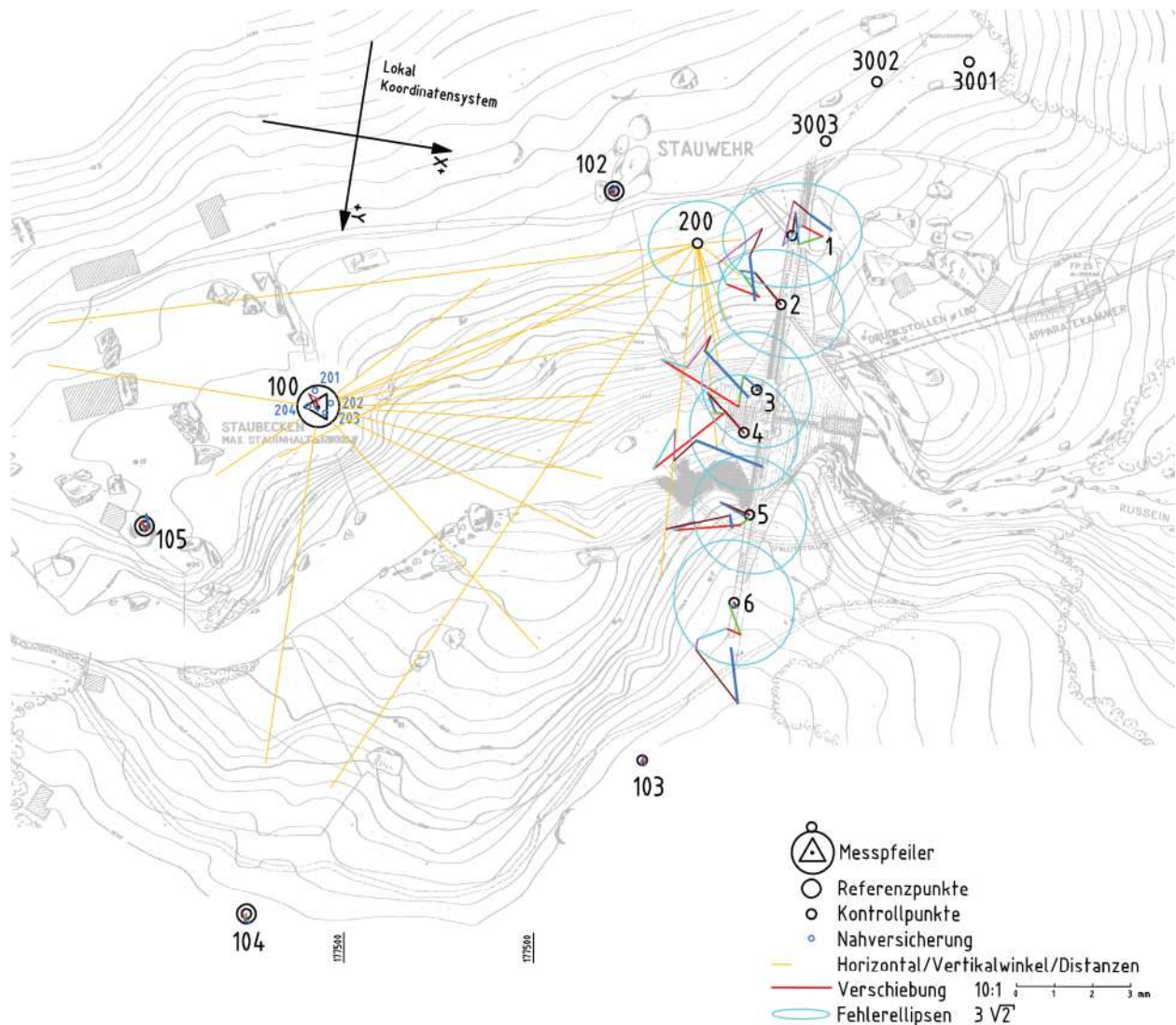
Verschiebungen: Ursache, welche zu Lage- und/oder Höhenänderungen führen kann. Es ist Aufgabe des Bauingenieurs, aufgrund der ermittelten Lage- und Höhenänderungen auf deren Ursachen und Einfluss auf die Sicherheit der Anlagen zu schliessen. Eine mögliche Ursache sind Verschiebungen des Bauwerks oder dessen Untergrundes infolge von Setzungen, Rutschungen, Rissbildung, etc.



A4. Beispiele

Einfaches konventionelles Netz zur jährlichen Messung der Verformung einer kleinen Gewichtsmauer

(Kombinierte Darstellung von Netzplan und Lageänderungen)



Netztyp: kleinräumiges terrestrisches Triangulationsnetz

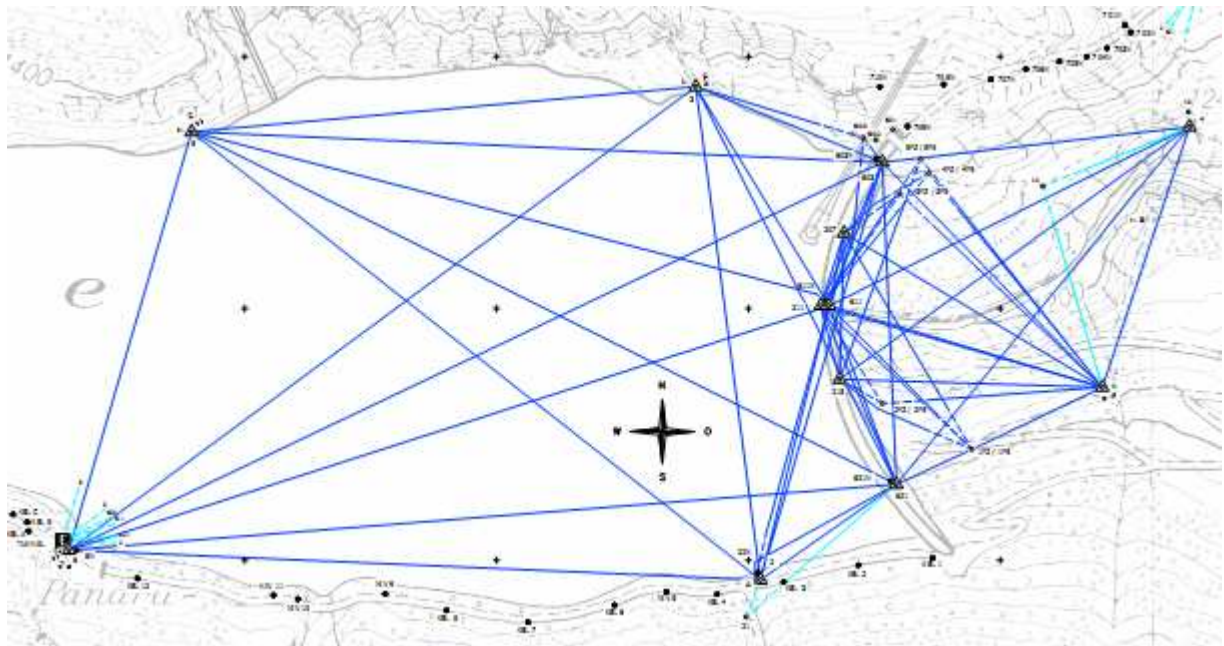
Materialisierung: 1 Messpfeiler mit 5 Rückversicherungen und 6 Kontrollpunkten

Verwendetes Instrumentarium: Präzisionstheodolit Leica TDA5005

Messintervall: 1 mal jährlich im Herbst

Ausgleichung nach der Methode der „kleinsten Quadrate“

Konventionelles Netz einer grossen Bogenmauer



Netztyp: konventionelles terrestrisches Triangulationsnetz (übergeordnetes Netz) kombiniert mit einem Präzisionsnivellement entlang der Zufahrtstrasse und über Mauerkrone

Materialisierung: 12 Messpfeiler (teilweise mit Rückversicherungen) sowie 7 zusätzliche Geländepunkte und ca. 30 Nivellmentspunkte

Verwendetes Instrumentarium: Präzisionstheodolite Leica TDA5005, Präzisionsdistanzmesser Mekometer Kern ME5000, Präzisionsnivellier Leica DNA03 mit geeichten Invarlatten

Messintervall: in der Regel alle 5 Jahre

In der Ausgleichung verwendete Beobachtungen: ca. 600 Richtungs- und Höhenwinkel sowie Distanzen

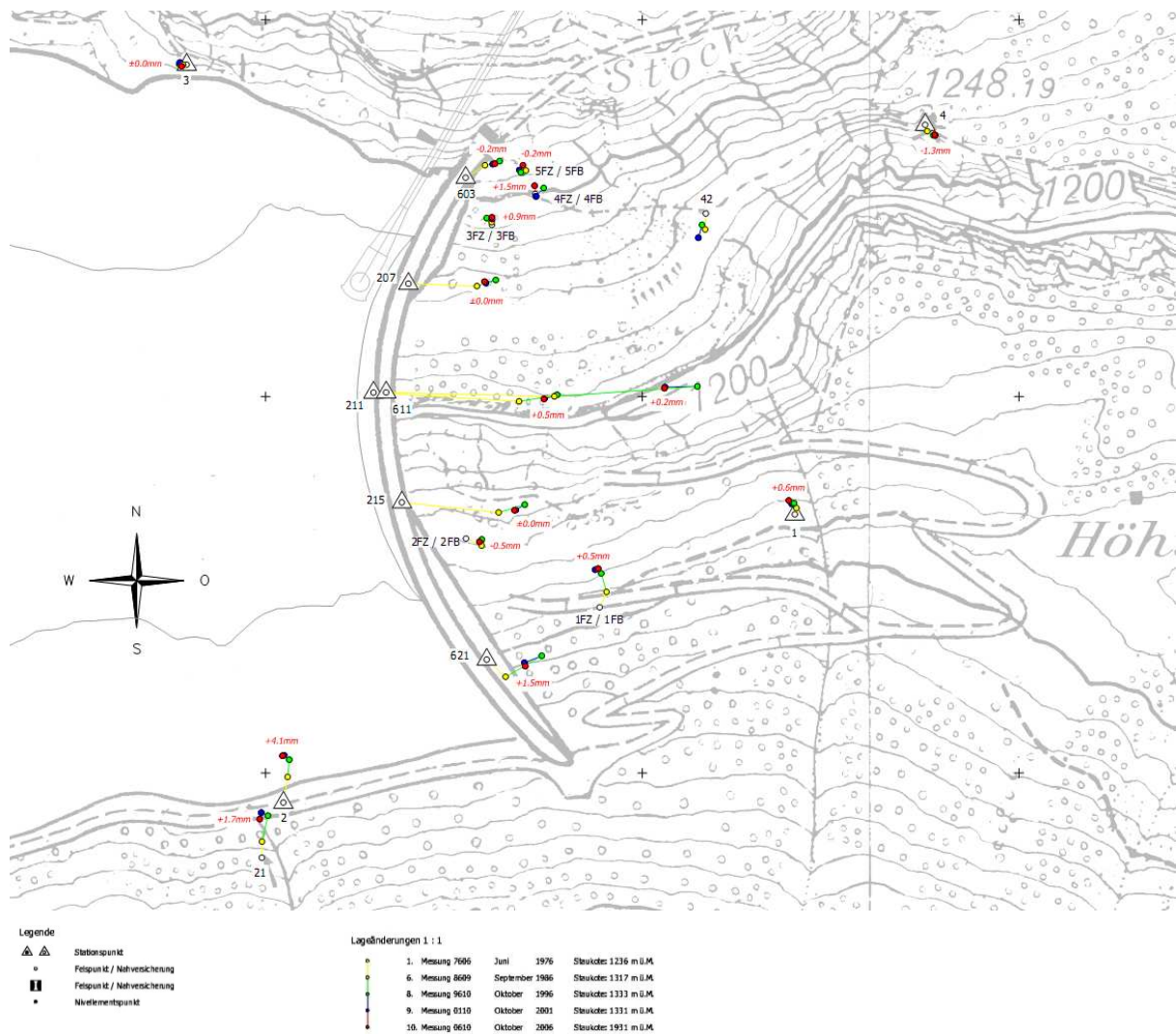
A posteriori Genauigkeiten (1σ) für Punkte auf der Mauerkrone:
Lage ± 0.3 mm, Höhe ± 0.5 mm

Inneres Netz: Polygonzüge und Nivellemente in den Kontrollgängen

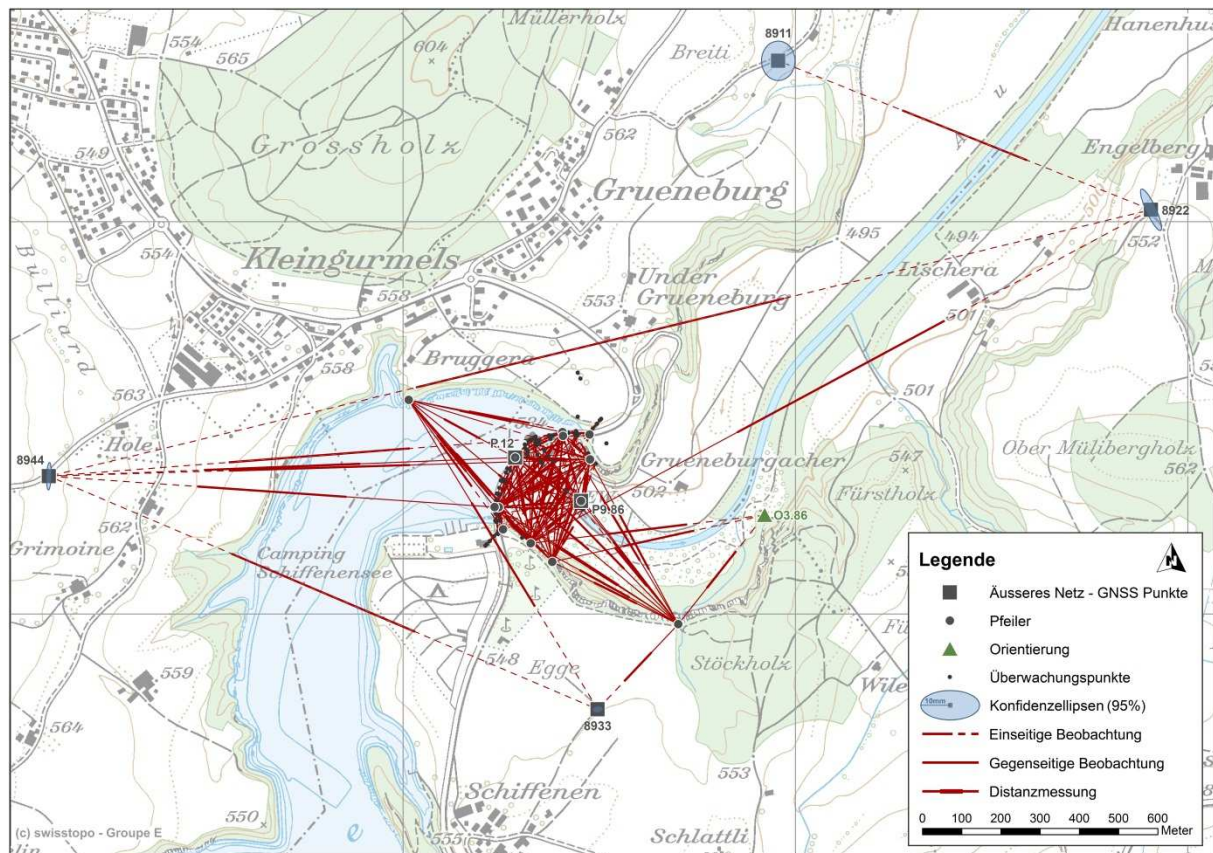
Verbindung zwischen übergeordnetem und innerem Netz über optische Lotungen und Lotmessanlage sowie zusätzlich bei den Ausgängen einiger Kontrollgänge



Darstellung der Lage und Höhenänderungen:



Hybrides Messnetz: Konventionelles Triangulationsnetz kombiniert mit GNSS-Beobachtungen auf vier Referenzpunkten und auf der Mauerkrone



Netztyp: konventionelles terrestrisches Triangulationsnetz kombiniert mit einem Präzisionsnivelllement über Mauerkrone und am Mauerfuss. Das Netz ist mittels statischen GNSS-Messungen in ein Rahmennetz mit 4 stabil materialisierten Punkten (8911-8944) eingebunden. Zusätzlicher Polygonzug über 26 Punkte in der untersten Galerie für die Bestimmung von 8 Mauerloten

Materialisierung: 8 Betonpfeiler, 3 Stahlpfeiler auf der Mauerkrone und 4 Stahlpfeiler der GNSS-Referenzstationen. Die Stahlpfeiler werden nach den Messungen demonstert. 6 zusätzliche, nicht stationierte Geländepunkte, 29 Mauerzielbolzen, 47 Nivellementspunkte

Verwendetes Instrumentarium: Präzisionstheodolite Leica TDA5005, Präzisionsdistanzmesser Mekometer Kern ME5000, Präzisionsnivellier Zeiss DiNi12 mit geeichten Invarlatten

Anzahl Beobachtungen pro Messepoche: 332 Richtungs- und 309 Höhenwinkel sowie 162 Distanzen

A posteriori Genauigkeiten (1σ) für Punkte auf der Mauerkrone: Lage ± 0.3 mm, Höhe ± 0.3 mm; für Mauerzielbolzen: Lage ± 0.5 mm, Höhe ± 0.6 mm

Verbindung zwischen übergeordnetem und innerem Netz über trigonometrische Messungen durch zwei Bohrungen am Mauerfuss