

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 9

Artikel: Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue = Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessungen für die Überwachung der Stauanlagen
Autor: Aeschlimann, Heinz / Ammann, Eduard / Biedermann, Rudolf
Kapitel: 6: Exploitation, précision et fiabilité = Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939996>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

mations du glacier suspendu du Weisshorn, glacier qui menaçait de s'écrouler (fig. 5.2). Les prises de vue ont été effectuées deux fois par jour au moyen d'une caméra automatique.

L'utilisation de cette méthode pour la restitution à partir de vues aériennes est présentée dans [22]. Comme exemple, on citera la détermination de la vitesse de fluage du glacier rocheux de la région du glacier du Gruben [23] au-dessus de Saas-Balen (figure 5.3).

5.5.3 Surveillance photographique du terrain

Des photographies terrestres ou aériennes périodiques prises à la main ou avec des caméras automatiques conviennent bien au suivi d'évolutions. Les images peuvent être interprétées en tout temps, par exemple après un événement imprévu. C'est ainsi que dans le cadre du programme de prises de vues «Glaciers dangereux» l'Office fédéral de la topographie assure annuellement depuis longtemps une couverture photographique en vue de l'établissement d'une documentation historique ou préventive. Grâce à ces photos aériennes, on a pu par exemple reconstruire l'évolution du glacier suspendu du Weisshorn cité plus haut sur des années, au moment où le risque de rupture a été reconnu. Cette étude a permis de faire à temps des pronostics sur l'instant de la chute.

De la même manière, certaines sociétés productrices d'électricité surveillent des masses de glace instables. Les Forces motrices de l'Oberhasli par exemple font relever périodiquement les changements de tous les glaciers des bassins versants de leurs ouvrages de retenue par photogrammétrie aérienne.

automatischen Kameras aufgenommen – eignen sich grundsätzlich zur Überwachung zeitlich ändernder Zustände. Die Bilder können jederzeit, beispielsweise nachträglich eines nicht vorausgesehenen Ereignisses, ausgewertet werden. So werden bereits seit langer Zeit von der Landestopographie jährlich Photos für historische oder vorsorgliche Bilddokumentationen aufgenommen (Aufnahmeprogramm «Gefährliche Gletscher»). Dank diesen Luftbildern konnte beispielsweise die Entwicklung des vorher erwähnten Hängegletschers am Weisshorn über Jahre zurückverfolgt werden, nachdem die Absturzgefahr erkannt wurde. Diesem Umstand war es zu verdanken, dass frühzeitig Prognosen über den Zeitpunkt des Absturzes gemacht werden konnten.

Auch einige Kraftwerksgesellschaften überwachen absturzgefährdete Eismassen in dieser Art. Beispielsweise lassen die Kraftwerke Oberhasli AG die Veränderungen aller Gletscher im Einzugsgebiet ihrer Stauanlagen periodisch luftphotogrammetrisch vermessen.

6. Exploitation, précision et fiabilité

Alessandro Carosio et Hubert Dupraz

6.1 Principes et buts des mesures géodésiques de déformation et de leur analyse

D'une manière générale, les mesures géodésiques de déformation ont pour but de saisir le comportement cinématique d'un ouvrage ou d'une zone de terrain au moyen d'images instantanées, et de le décrire convenablement. Cette description, et l'analyse de déformation que cela nécessite, dépendent des exigences formulées au départ.

Pour le spécialiste en mensuration, l'analyse de déformation regroupe les aspects suivants:

- a) le contrôle des points fixes quant à d'éventuels déplacements relatifs horizontaux ou verticaux par rapport aux environs immédiats (repérages excentriques) et par rapport aux autres points fixes;
- b) la détermination périodique exacte de la position et de l'altitude de points de contrôle durablement matérialisés sur l'ouvrage ou sur le terrain, et celle des points fixes, présumés stables par le géologue et par le constructeur;
- c) la détermination et la représentation des déplacements (différences planimétriques) sur une ou plusieurs périodes;
- d) le calcul de la précision de tous les résultats à livrer (déplacements, coordonnées, etc.) à l'aide de la statistique mathématique;
- e) la vérification des hypothèses sur lesquelles on a basé les calculs géodésiques et le calcul des risques d'erreur (analyse de fiabilité).

6. Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Alessandro Carosio und Hubert Dupraz

6.1 Grundzüge und Ziele der geodätischen Deformationsmessungen und -analysen

Die geodätische Deformationsmessung hat ganz allgemein zum Ziel, das kinematische Verhalten eines Bauwerks oder einer Geländepartie mittels Momentanbildern zu erfassen und in geeigneter Art zu beschreiben. Die Beschreibung und die hierzu erforderliche Deformationsanalyse sind dabei von der Aufgabenstellung abhängig.

Die Deformationsanalyse seitens der Vermessungsspezialisten umfasst im wesentlichen:

- a) die Beurteilung der Festpunkte im Hinblick auf allfällige (relative) Lage- oder Höhenänderungen in bezug zur unmittelbaren Umgebung (Rückversicherungen) und bezüglich der anderen Festpunkte;
- b) die periodische genaue Bestimmung der Lage und der Höhen von dauerhaft markierten Kontrollpunkten am Bauwerk und im Gelände sowie der Festpunkte, die man als geologisch und bautechnisch stabil vermutet;
- c) die Bestimmung und Darstellung der Bewegungen (Lageunterschiede) über eine oder mehrere Perioden;
- d) die Berechnung der Genauigkeit aller abzugebenden Resultate (Verschiebungen, Koordinaten usw.) mit den Methoden der mathematischen Statistik;
- e) die Überprüfung der Hypothesen, auf welche sich die geodätische Auswertung stützt, und Berechnung der Irrtumswahrscheinlichkeit (Zuverlässigkeitsanalyse).

6.2 Evolution des méthodes d'exploitation

Jusqu'aux années 70, on s'efforçait de concevoir les mesures géodésiques de déformation de manière à réduire autant que possible le temps nécessaire aux calculs toujours fastidieux.

La solution consistait à comparer directement des valeurs observées (directions) à différentes époques et à les représenter graphiquement. Ce procédé était précis et économique, mais il avait le gros désavantage d'être assujéti à un dispositif de mesure rigide et à des hypothèses du modèle mathématique plus ou moins constantes. Une modification du plan de mesure, la détérioration d'un pilier, nécessitaient la détermination d'une nouvelle époque de référence (Nullmessung) indépendante. La relation avec le passé était perdue.

Dès que l'informatique rendit négligeable le problème du volume des calculs, on abandonna l'exploitation des différences d'observations pour exécuter une compensation par la méthode des moindres carrés. Cette technique très efficace offre des avantages non seulement pour les calculs, mais aussi pour la conception des réseaux géodésiques de surveillance, pour l'interprétation des résultats et pour l'analyse de qualité des dispositifs de mesure projetés.

Grâce aux nouvelles méthodes d'exploitation, on a pu, dès les années 80, mettre au point le concept des réseaux hiérarchiques de contrôle, concept qui continue de garantir une haute précision localement, et permet aussi, dans le cas d'événements défavorables (tels que des éboulements, la destruction de points fixes, etc.) de déterminer la position des points à partir des points fixes éloignés encore existants.

Dans le procédé actuel, le choix des observations peut être adapté aux changements de situation. L'apparition d'une nouvelle technique de mesure (par exemple GPS) ou la disparition d'une ligne de visée ne mettent plus en danger le dispositif de mesure. La compensation est capable de s'adapter, elle fournit les coordonnées souhaitées et aussi, ce qui est essentiel – des informations sur la précision et sur la fiabilité atteintes.

Dans le domaine des analyses de déformation, on utilise toujours plus les méthodes de la statistique mathématique. Par exemple, on peut formuler la stabilité d'un point fixe comme un test d'hypothèse statistique. Le comportement global des points de contrôle peut être étudié à l'aide de la statistique multivariée (analyse des composantes principales) lorsqu'on veut comparer les observations de plusieurs époques.

Toutes les informations disponibles sur les relations fonctionnelles (par exemple des relations géométriques) et celles sur le comportement stochastique des variables utilisées (fonctions de distribution, variances, etc.) sont combinées avec les observations elles-mêmes, et malgré certaines sources d'erreur (imprécisions inévitables de mesure et autres erreurs accidentelles), on peut finalement en tirer les conclusions les plus probables [25].

6.3 Modèles mathématiques

En général, les grandeurs nécessaires à une analyse de déformation ne sont pas directement observables; on doit les déduire mathématiquement d'un grand nombre d'observations et d'autres informations. Pour cela, on doit disposer d'une «traduction» préalable de la réalité physique, souvent complexe, en concepts mathématiques. On parle de *modèle mathématique*, car on sait que cette traduction

6.2 Entwicklung der Auswertungsmethoden

Bis in die 70er Jahre versuchte man die geodätischen Deformationsmessungen so einfach wie möglich zu gestalten, damit vor allem wenig Zeit für die aufwendigen Berechnungen eingesetzt werden musste.

Die Lösung führte zum direkten Vergleich der Messwerte (Richtungen) der verschiedenen Epochen, die graphisch dargestellt wurden. Das Verfahren war genau und zeitsparend, hatte aber den grossen Nachteil, an eine fixe Messanordnung und relativ konstante Modellhypothesen gebunden zu sein. Eine Änderung des Messplanes, die Beschädigung eines Pfeilers oder ähnliches hatten zur Folge, dass eine neue unabhängige Nullmessung erforderlich war. Die Beziehung mit der Vergangenheit war verloren.

Als die Informatik das Problem des Rechenaufwandes verschwinden liess, stellte man die Differenzenauswertung der Messungen ein, um die Koordinaten mit einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate zu berechnen. Die Vorteile dieses wirksamen und effizienten Verfahrens haben sich nicht nur auf die Berechnungen ausgewirkt, sondern auch stark auf die Konzeption der geodätischen Überwachungsnetze, auf die Interpretation der Ergebnisse und auf die Qualitätsüberprüfung der geplanten Messanordnungen.

Dank der neuen Auswertungsmethoden konnte man in den 80er Jahren das neue Konzept der mehrstufigen geodätischen Kontrollnetze entwickeln, welches die bisherige hohe Genauigkeit im lokalen Bereich erzielen lässt, aber auch bei ungünstigen Ereignissen (grossräumige Rutschungen, Zerstörung von Festpunkten usw.) eine Lagebestimmung aus den noch vorhandenen entfernten Festpunkten erlaubt.

Mit dem heutigen Vorgehen können die Messungen den veränderten Verhältnissen angepasst werden. Eine neue Entwicklung in der Messtechnik (z. B. GPS) oder das Verschwinden einer Sichtverbindung beeinträchtigen die geodätische Überwachung nicht. Die Ausgleichung ist anpassungsfähig, liefert die gewünschten Koordinaten und zusätzlich, was sehr wichtig ist, auch Informationen über die erreichte Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Im Bereich der Deformationsanalysen werden Methoden der mathematischen Statistik immer mehr eingesetzt. Die Stabilität der Festpunkte kann z. B. als statistischer Hypothesentest formuliert werden. Das gemeinsame Verhalten der Kontrollpunkte kann mit multivariaten Verfahren (z. B. Hauptkomponentenanalyse) untersucht werden, wenn die Messungen vieler Epochen zu vergleichen sind.

Alle bekannten Informationen über funktionale Zusammenhänge (geometrische Beziehungen usw.) und diejenigen über das stochastische Verhalten der verwendeten Grössen (Verteilungsfunktionen, Varianzen usw.) werden mit den Messungen kombiniert, um trotz Störeinflüssen (unvermeidliche Messungenauigkeiten und andere zufällige Fehlerursachen) möglichst sichere Aussagen herleiten zu können [25].

6.3 Mathematische Modelle

Die Grössen, die für eine Deformationsanalyse benötigt werden, können nicht direkt abgelesen werden; man muss sie aus vielen Beobachtungen und anderen Informationen mathematisch herleiten. Dafür benötigt man zwischen der physikalischen komplexen Realität und den Begriffen der Mathematik eine vorgegebene Beziehung. Man spricht von einem *mathematischen Modell*, da man

ne peut fournir qu'une bonne approximation de la réalité. Par exemple, les cibles fixées sur le barrage et les chevilles de centrage des piliers d'observation sont considérées comme des points (géométriques). Les rayons lumineux qui interviennent lors de la mesure de directions ou de distances sont considérés comme des droites. A partir de telles simplifications, on peut exprimer mathématiquement de nombreuses relations ou conditions entre les grandeurs observées et celles qui sont inconnues (par exemple la somme des angles d'un triangle, la distance totale comparée à la somme des distances partielles, etc.). L'ensemble de ces relations mathématiques, qui doivent être respectées exactement lors de la compensation, constituent le *modèle fonctionnel*.

Les inévitables (petites) imprécisions de mesure se comportent comme des variables aléatoires de la mathématique statistique. On ne peut calculer leur grandeur exacte ni à l'avance, ni même après coup. Mais on connaît la relation entre leur grandeur possible et la probabilité associée, relation bien décrite par la fonction de distribution d'une variable aléatoire bien choisie. Sa déviation-standard (racine carrée de la variance) caractérise la précision de l'observation correspondante. L'expérience et des considérations théoriques ont montré que la *distribution normale* (distribution de Gauss) décrit particulièrement bien le comportement des erreurs de mesure accidentelles. Toutes les informations relatives aux variables aléatoires (distributions, déviations-standards, etc.) intervenant dans la modélisation mathématique constituent le *modèle stochastique*.

6.4 La méthode des moindres carrés

La méthode de compensation par les moindres carrés [25] la mieux adaptée aux possibilités modernes de calcul est la méthode des «observations médiates». L'expression allemande «vermittelnde Beobachtungen» est plus explicite. En mensuration, on s'intéresse en effet aux coordonnées des points-objets décrivant l'ouvrage à surveiller, mais on ne sait pas les observer directement. C'est pourquoi on les observe «par l'intermédiaire» d'autres grandeurs plus faciles à observer et combinables à volonté: angles, distances, différences de niveau, angles de hauteur, différences de coordonnées par GPS, qui ont toutes en commun d'exprimer une relation entre deux points quelconques du réseau. Chaque observation doit donc être comprise, dans le cadre d'un *modèle fonctionnel*, comme une fonction des coordonnées inconnues. Pour un système donné, (par exemple un réseau géodésique comprenant n coordonnées de points nouveaux et m observations), le nombre des observations doit correspondre au moins au nombre des inconnues ($n=m$). En pratique, on en prévoit un plus grand nombre ($m <$), pour améliorer la précision et la fiabilité des résultats. Le système n'a plus de solution unique, on dit qu'il est surdéterminé. Si l'on veut tenir compte de toutes les observations disponibles, on verra alors apparaître des écarts et des contradictions sur les observations, qu'il s'agit de minimiser. On choisit dans ce but la «*solution des moindres carrés*», proposée il y a déjà près de deux siècles par Gauss et Legendre. C'est la solution pour laquelle la somme des carrés des erreurs résiduelles est minimale. La statistique moderne a confirmé la pertinence de cette méthode, en montrant qu'elle conduit aux résultats les plus probables.

Cette méthode offre des avantages importants:

- elle permet de tenir compte de la précision effective de chaque observation et d'éventuelles corrélations, en fonction des instruments utilisés, des conditions de tra-

weiss, dass die mathematischen Elemente nur eine gute Approximation der Wirklichkeit darstellen. So werden die Zielbolzen an der Staumauer und die Zentriereinrichtungen der Messpfähle als (geometrische) Punkte betrachtet. Die Lichtstrahlen, die bei Distanzen- und Richtungsmessungen vorkommen, werden als Gerade angenommen. Aus solchen oder ähnlichen Annahmen werden viele Beziehungen oder Bedingungen zwischen den beobachteten und bekannten Grössen mathematisch formuliert (z.B. Winkelsumme in einem Dreieck, die Gesamtlänge ist gleich der Summe der Teilstrecken usw.). Die Gesamtheit dieser mathematischen Zusammenhänge, die im Modell genau gelten sollen, nennt man das *funktionale Modell*.

Die unvermeidlichen (kleinen) Ungenauigkeiten einer Messung verhalten sich wie Zufallsvariablen der mathematischen Statistik. Sie sind in ihrer genauen Grösse weder vorhersehbar noch später berechenbar. Man kennt aber die Beziehung zwischen den möglichen Grössen und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens, die mit der Verteilungsfunktion einer zugeordneten Zufallsvariablen gut beschrieben werden kann. Ihre Standardabweichung (Quadratwurzel der Varianz) ist das Mass für die Genauigkeit der dazugehörigen Messung. Erfahrung und theoretische Herleitungen zeigen, dass die *Normalverteilung* besonders gut die Eigenschaften der zufälligen Messfehler beschreibt. Alle Informationen über die Eigenschaften der Zufallsvariablen (Verteilungen, Standardabweichungen usw.), die bei der mathematischen Modellierung auftreten, nennt man das *stochastische Modell*.

6.4 Die Methode der kleinsten Quadrate

Die vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate [25] gilt zurzeit als das geeignetste Ausgleichungsverfahren im Einsatz zusammen mit modernen Rechenanlagen. In der Vermessung interessieren schlussendlich meist die Lagekoordinaten und die Höhe von charakteristischen Punkten des Bauwerkes, diese können aber nur selten direkt gemessen werden; so sind es meist indirekte Beobachtungen, welche, richtig kombiniert, auf die gesuchten Koordinaten schliessen lassen. Solche Beobachtungen drücken immer eine Beziehung zweier Punkte in einem geodätischen Netz aus; Winkel, Distanzen, Höhenunterschiede, Höhenwinkel oder Koordinatendifferenzen zwischen zwei mit GPS gemessenen Punkten sind Beispiele dafür. Jede Beobachtung im Netz ist im Rahmen eines *funktionalen Modells* als Funktionswert für die gesuchten Koordinaten zu verstehen. Für ein bestimmtes System (z.B. ein geodätisches Netz mit n Neupunktkoordinaten und m Beobachtungen) muss die Anzahl der Beobachtungen der Anzahl der Unbekannten entsprechen ($n=m$). In der Praxis wird man aber immer eine grössere Anzahl Beobachtungen für eine Berechnung verwenden, dies um die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der erzielten Resultate zu verbessern. Das System hat nun keine eindeutige Lösung mehr, man sagt es sei überbestimmt; will man alle Beobachtungen berücksichtigen, entstehen Zwänge und Widersprüche im System, welche es zu minimieren gilt. Den Ansatz zur Lösung des Problems liefert ein schon seit zwei Jahrhunderten bekanntes Verfahren von Gauss und Legendre: *Die Methode der kleinsten Quadrate*. Danach muss die Summe aller Restfehler im Quadrat minimiert werden. Mit der modernen Statistik konnte gezeigt werden, dass diese Methode zu den wahrscheinlichsten Resultaten führt.

Diese Methode erlaubt auf die verschiedenen Genauigkeiten der einzelnen Messungen und auf eventuelle

vail, de l'habileté de l'observateur. Ces informations, qui constituent le *modèle stochastique*, doivent être établies avec beaucoup de soin pour que les résultats soient conformes à la réalité;

- elle fournit non seulement des valeurs pour les coordonnées inconnues, mais encore une *quantification de la précision et de la fiabilité* a posteriori de celles-ci. En d'autres termes, elle nous informe sur les incertitudes et les risques de fautes qui entachent les résultats, à partir de la structure de mesure choisie et des erreurs inévitables qui entachent les observations. Ces informations sont essentielles si l'on veut éviter des erreurs d'interprétation qui peuvent être lourdes de conséquences pour l'exploitation du barrage. Cet aspect de l'analyse est développé plus loin.

6.5 Précision et fiabilité

Le mot «précision» prend des sens différents, selon le contexte dans lequel il est utilisé. Il y a des précisions d'observation pour chaque mode d'observation; il y a la précision des résultats, les précisions interne et externe, relative et absolue, etc.

L'erreur moyenne a priori des observations (c'est-à-dire avant la compensation) est choisie sur la base de l'expérience ou d'essais empiriques.

L'indicateur de précision d'observations géodésiques est l'erreur moyenne; elle correspond à l'écart-type (ou déviation-standard) de la statistique mathématique. Les observations sont considérées comme des estimations des «valeurs vraies» des grandeurs observées. Elles sont influencées par des erreurs aléatoires, souvent inévitables, et on fait l'hypothèse qu'elles ne sont entachées d'aucune erreur systématique. Dans la règle, on admet que les observations suivent la distribution normale, et l'erreur moyenne suffit à décrire la distribution de probabilité.

Toutes ces erreurs moyennes (le modèle stochastique), combinées avec le dispositif d'observation et un choix de points fixes, permettent le calcul de l'erreur moyenne des résultats, c'est-à-dire des coordonnées X, Y, Z. Pour des résultats à 2 dimensions, l'ellipse d'erreur est un indicateur de précision très pratique. Avec les instruments géodésiques actuels et la précision dont ils sont capables, on

Korrelationen Rücksicht zu nehmen (konstante Instrumentenfehler, Arbeitsbedingungen, verschiedene Beobachter...). Diese Informationen zusammen genommen ergeben das *stochastische Modell*, welches mit grosser Sorgfalt vor den Berechnungen erstellt werden muss, damit das Ergebnis so gut als möglich dem Ist-Zustand in der Realität entspricht.

Die Methode liefert indes nicht nur die gewünschten Koordinaten, sie erlaubt es zusätzlich, *Aussagen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit* der erhaltenen Werte zu machen (a posteriori Beurteilung des Systems). Mit anderen Worten: Die Methode zeigt uns Unsicherheiten und Fehlerisiken der Resultate, in Abhängigkeit der Systemkonfiguration und der Tatsache, dass alle Beobachtungen unvermeidlich mit Fehlern behaftet sind. Diese letzte Feststellung ist von ausserordentlicher Bedeutung. Eine Missachtung dieser Information kann zu groben Fehlinterpretationen mit schwerwiegenden Konsequenzen für den Betrieb der Talsperren führen. Dieser Aspekt der Ausgleichung wird später ausführlich diskutiert werden.

6.5 Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Genauigkeit hat verschiedene Attribute, je nachdem in welchem Zusammenhang der Begriff Genauigkeit gebraucht wird. Es gibt Beobachtungsgenauigkeiten für die verschiedenen Beobachtungsarten; Genauigkeiten der Resultate (Auswertegenauigkeiten), innere und äussere Genauigkeiten, absolute und relative Genauigkeiten usw.

Der mittlere Fehler a priori (vor der Ausgleichung) der Beobachtungen wird aufgrund der Erfahrung oder empirisch aus Versuchen bestimmt.

Das Genauigkeitsmass geodätischer Messungen ist der mittlere Fehler; er entspricht der Standardabweichung der mathematischen Statistik. Die Messungen werden als Schätzungen für die «wahren Werte» der beobachteten Grössen betrachtet. Sie sind durch zufällige, meist unvermeidbare Fehler beeinflusst, und man nimmt an, dass keine systematischen Fehler die Messungen verfälschen. In der Regel werden die Messungen als normalverteilt angenommen, und der mittlere Fehler genügt, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung zu beschreiben.

Alle diese mittleren Fehler (das stochastische Modell) erlauben zusammen mit der Konfiguration der Messanlage und einer Auswahl von Festpunkten die Berechnung des mittleren Fehlers der Resultate, z. B. der Koordinaten X, Y, Z. Für zweidimensionale Ergebnisse ist die Fehlerellipse ein anschauliches Genauigkeitsmass. Mit den heutigen Instrumenten und Beobachtungsgenauigkeiten sind bei guten Bedingungen in einem kleinen Netz (ca. 400×200 m) mittlere Fehlerellipsen mit einer grossen Halbachse von 0,2 mm erreichbar. Ähnliche mittlere Höhenfehler weisen Präzisionsnivelemente in Kontrollgängen einer Staumauer auf. In grösseren Netzen von 2,5×1,5 km kann man 1 mm erreichen. Diese sind Grenzen, die grossen Aufwand erfordern.

Die Statistik und die Wahrscheinlichkeitsrechnung zeigen, dass die wahren Werte der berechneten Koordinaten mit einer Wahrscheinlichkeit von 39% innerhalb der Fehlerellipse liegen. Bei einer Verdoppelung der Fehlerellipse erhöht sich die Wahrscheinlichkeit auf ca. 86%, bei einer Verdreifachung auf 99%.

Bild 6.1. Beispiel für eine gute Genauigkeit und eine schlechte Zuverlässigkeit. Zwei zusätzliche Winkel auf A und B führen zu einer wesentlichen Zuverlässigkeitsverbesserung. Die Genauigkeit ändert nur unwesentlich (Bild 6.2).

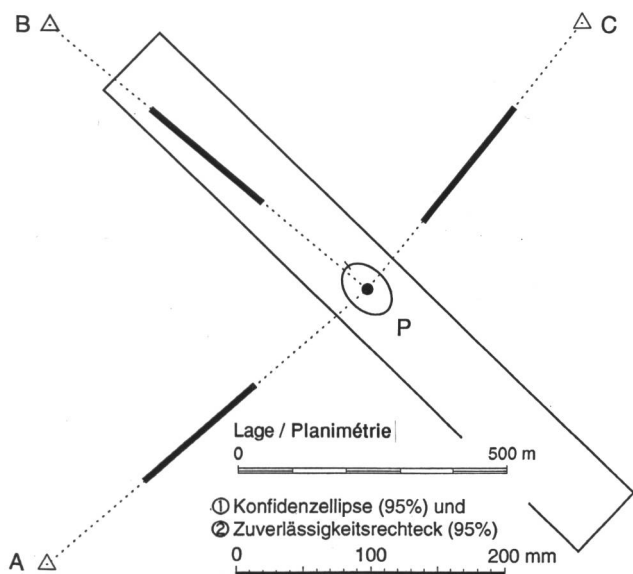


Figure 6.1. Exemple d'une bonne précision et d'une mauvaise fiabilité. 1 Ellipse de confiance (95%). 2 Rectangle de fiabilité (95%).

peut obtenir, pour de petits réseaux (env. 400×200 m) et par bonnes conditions, des ellipses d'erreur dont le demi-grand-axe n'excède pas 0,2 mm. Des erreurs moyennes altimétriques de même dimension caractérisent les nivellements de précision effectués dans les galeries de contrôle des barrages. Pour des réseaux plus grands ($2,5 \times 1,5$ km), on atteint 1 mm. Il s'agit de valeurs-limite, exigeant beaucoup de soin dans l'exécution des mesures.

La statistique et les calculs de probabilité montrent que les valeurs vraies des coordonnées calculées se trouvent, avec une probabilité de 39%, à l'intérieur de l'ellipse d'erreur. Si on double sa dimension, la probabilité monte à 86%; si on la triple, elle monte à 99%.

Si le concept de précision s'occupe des erreurs d'observations petites, aléatoires et inévitables, le concept de fiabilité, lui, concerne d'autres types d'erreur, qu'on ne peut pas exclure, mais qui ne sont pas pris en compte par le modèle mathématique. Dans la règle, il s'agit surtout des fautes grossières; mais on peut aussi inclure d'autres modèles de fautes dans l'analyse de fiabilité [24].

Une réalisation géodésique est donc considérée comme fiable, pour un certain modèle de fautes, si les contrôles prévus permettent la détection de celles-ci avec une probabilité suffisante. En d'autres termes: une réalisation géodésique est fiable si les fautes grossières non détectées sont assez petites pour n'avoir aucune influence préjudiciable. La théorie moderne de la fiabilité permet de calculer la grandeur de ces fautes et leur impact sur les coordonnées des points. Le risque qui en résulte pour la position des points est représenté sous la forme d'un rectangle.

L'exemple ci-dessous (figure 6.1 montre que même dans un réseau mal conçu (détermination d'un point par trois distances mal réparties), on peut obtenir une bonne précision (petite ellipse d'erreur). Par contre, la fiabilité est très faible dans la direction PB, car une faute grossière entachant cette distance ne peut pas être détectée (contrôle inefficace). Une faute grossière sur les distances PA ou PC est rapidement détectée, car ces deux distances se contrôlent mutuellement.

Deux angles supplémentaires mesurés en A et B améliorent considérablement la fiabilité. La précision n'augmente que peu.

Les canevas de triangulation bien conçus sont fiables (les rectangles de fiabilité sont petits). Au contraire, les longs cheminements polygonaux sont peu fiables, car la surdétermination est faible; une faute grossière se disperse sur l'ensemble des mesures, ce qui rend sa détection difficile.

A côté des fautes accidentelles ou grossières, on distingue aussi les erreurs systématiques. Elles surviennent lorsqu'une source d'erreur agit de la même manière (systématique) sur plusieurs observations. De telles erreurs peuvent fausser considérablement les résultats, même si leur grandeur en soi est faible. C'est pourquoi les méthodes géodésiques ont été conçues de telle sorte que l'influence d'éventuelles erreurs systématiques reste pratiquement négligeable. Pour y parvenir, il faut concevoir les réseaux et exécuter les mesures avec beaucoup de soin et selon les règles de l'art.

Il existe peu de domaines des sciences techniques qui ont poussé aussi loin que la géodésie la réflexion sur les erreurs de mesure et leurs conséquences.

Figure 6.2. Exemple d'une bonne précision et d'une bonne fiabilité. Deux angles supplémentaires mesurés en A et B améliorent considérablement la fiabilité. La précision n'augmente que peu. 1 Ellipse de confiance (95%). 2 Rectangle de fiabilité (95%).

Während der Begriff der Genauigkeit mit den unvermeidlichen, kleinen zufälligen Fehlern zu tun hat, hängt die Zuverlässigkeit mit den anderen, nicht auszuschliessenden Fehlerarten zusammen, die im mathematischen Modell nicht berücksichtigt wurden. In der Regel denkt man an grobe Messfehler, aber auch andere Modellfehler können in die Zuverlässigkeitsanalyse einbezogen werden [24].

Eine geodätische Arbeit gilt im Hinblick auf einen bestimmten Modellfehler dann als zuverlässig, wenn die vorgesehenen Kontrollen dessen Entdeckung mit genügender Wahrscheinlichkeit erlauben. Mit anderen Worten: eine geodätische Arbeit ist dann zuverlässig, wenn die nicht aufdeckbaren Modellfehler (grobe Messfehler) klein genug sind, um keinen schädlichen Einfluss zu haben. Die moderne Theorie der Zuverlässigkeit erlaubt, die Grösse dieser Fehler sowie die Folgefehler auf die hergeleiteten Koordinaten zu berechnen. Das Risiko für die Punktkoordinaten wird als Rechteck dargestellt.

Das folgende Beispiel (Bild 6.1) zeigt, dass in einem schlecht konzipierten Netz (Punktbestimmung mit drei ungünstig liegenden Distanzen) eine gute Genauigkeit (kleine Fehlerellipse) erzielt werden kann. Die Zuverlässigkeit ist hingegen sehr schlecht in Richtung PB, da ein grober Fehler auf diese Distanz nicht entdeckt werden kann (fehlende Kontrolle). Ein grober Fehler auf den Distanzen PA oder PC wird früh aufgedeckt, da sich beide Messungen gegenseitig kontrollieren.

Gut aufgebaute Triangulationsnetze sind zuverlässig (kleine Zuverlässigkeitsrechtecke), demgegenüber sind lange Polygonzüge weniger zuverlässig, weil die Überbestimmung klein ist und ein grober Fehler sich in der Ausgleichung auf alle Messungen verteilt und weniger leicht entdeckt wird.

Neben den zufälligen und den groben Fehlern betrachtet man auch die systematischen Fehler. Sie entstehen, wenn sich eine Fehlerursache auf verschiedene Messungen in gleicher Art (systematisch) auswirkt. Solche Fehler würden die Resultate stark verfälschen, auch wenn sie vom Betrag her klein sind. Die geodätischen Messmethoden wurden daher so entwickelt, dass systematische Fehler

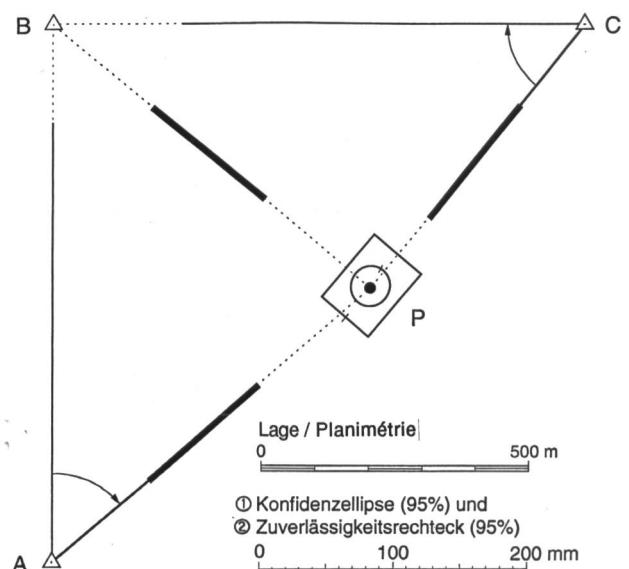


Bild 6.2. Beispiel für eine gute Genauigkeit und eine gute Zuverlässigkeit. Zwei zusätzliche Winkel auf A und B führen zu einer wesentlichen Zuverlässigkeitsverbesserung gegenüber Bild 6.1. Die Genauigkeit ändert nur unwesentlich.

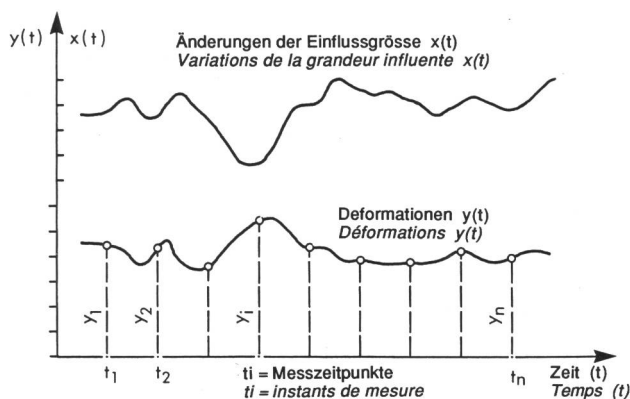


Figure 6.3. Saisie de déformations $y(t)$ provoquées par les variations non contrôlables d'une grandeur influente $x(t)$.

6.6 Préanalyses lors de la conception de dispositifs géodésiques

Les premières compensations d'observations pour la surveillance géodésique d'un barrage ont lieu bien avant les premières mesures effectives. On met au point le canevas optimal de mesure d'abord au bureau, à l'aide de calculs de simulation. La compensation ainsi conduite permet de préanalyser la précision et la fiabilité du canevas projeté si on connaît la précision des instruments de mesure qui seront mis en œuvre.

Puis, par des simulations successives, on optimise le dispositif de mesure (qui respecte à moindre coût les exigences du cahier des charges). Il est également possible de simuler et d'analyser des difficultés prévisibles (disparition de points ou de visées, extension de la zone instable, etc.) Le résultat de telles préanalyses fournit à l'avance les ellipses d'erreur et les rectangles de fiabilité des points du réseau, sous les conditions prévues. L'ingénieur géomètre peut ainsi projeter très soigneusement un dispositif de surveillance dont les résultats ultérieurs répondront aux attentes du maître de l'ouvrage, des experts et des autorités de surveillance.

Mais une conception réussie exige de la part de l'ingénieur géomètre une expérience suffisante pour prendre en compte lors des simulations, les variantes les plus réalistes, associées à des modèles mathématiques corrects. Il doit utiliser un ordinateur assez puissant et un logiciel moderne. Il doit aussi consacrer le temps nécessaire à la conception d'un bon réseau.

6.7 Compensations époque par époque

Le volumineux matériel numérique accumulé lors de la mesure doit être exploité de manière à livrer des informations utilisables et précises sur les déplacements planimétriques et altimétriques entre deux époques, ce qui constitue le but des mesures terrestres de déformation.

Avec une organisation adéquate (et un coût en rapport), on peut aujourd'hui produire immédiatement après la fin des observations des résultats d'excellente qualité permettant l'analyse de comportement de l'ouvrage. Cela implique l'installation d'un bureau de calcul. Cette exploitation in situ peut se justifier lorsque la sécurité de l'ouvrage ou des décisions concernant l'exploitation, par exemple une modification du niveau de la retenue, dépendent des résultats des mesures de déformation. Rappelons ici que ces mesures ne sont pas seulement nécessaires pour la détection précoce d'un danger, mais aussi pour la maîtrise de celui-ci, et que la mise à disposition rapide de résul-

Bild 6.3. Erfassung von Deformationen $y(t)$, die durch unkontrollierbare Änderungen einer Einflussgrösse $x(t)$ entstehen.

lereinflüsse verschwindend klein bleiben. Um dies zu erreichen, muss man die Anordnung und die Ausführung der Messungen sehr sorgfältig und nach der Regel der Kunst planen und ausführen.

In wenigen Bereichen der technischen Wissenschaften hat man sich so eingehend mit der Problematik der Fehlerauswirkung befasst wie in der Geodäsie.

6.6 Präanalysen in der Planung geodätischer Messanordnungen

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

Dank wiederholter Simulationen kann die Messanordnung optimiert werden (minimaler Aufwand bei erfüllten Anforderungen). Ebenfalls können Pannen (Ausfallen von Festpunkten, ausgedehnte Rutschungen usw.) simuliert und untersucht werden. Das Ergebnis solcher Präanalysen liefert im voraus die mittleren Fehlerellipsen und die Zuverlässigkeitsrechtecke, die für die Objektpunkte unter den vorgesehenen Bedingungen zu erwarten sind. So kann der Vermessungsingenieur sorgfältig ein modernes geodätisches Überwachungssystem projektieren, damit die späteren Ergebnisse die Anforderungen des Auftraggebers, der Experten und der Kontrollbehörden erfüllen werden.

Eine erfolgreiche Planung der geodätischen Messanordnung setzt aber voraus, dass der Vermessungsingenieur über genügend Erfahrung verfügt, um in den Simulationen die charakteristischen Varianten mit den passenden mathematischen Modellen zu berücksichtigen. Er muss eine leistungsfähige Rechenanlage mit zeitgemässer Software einsetzen und die erforderliche Zeit der Planung widmen.

6.7 Auswertungen nach jeder Messung

Das während der Messung erhobene, umfangreiche Zahlenmaterial ist mit der Auswertung so zu bearbeiten, dass daraus brauchbare, zuverlässige und genaue Lage- und Höhenänderungen, das Ziel der terrestrischen Deformationsmessung, zwischen zwei Epochen hervorgehen. Bei entsprechender Organisation (Aufwand) ist es heute möglich, unmittelbar nach der Beendigung der Beobachtungen einwandfreie Resultate zur Beurteilung des Verhaltens des Bauwerks vorzulegen. Dazu bedarf es der Einrichtung eines Auswertebüros. Diese An-Ort-Auswertung kann sinnvoll sein, wenn die Sicherheit des Bauwerks oder betriebliche Massnahmen, z.B. Änderungen des Stauspiegels, vom Resultat der terrestrischen Deformationsmessung abhängen. Es sei daran erinnert, dass Messungen nicht nur zur frühzeitigen Erkennung einer Gefährdung, sondern auch zu deren Beherrschung benötigt werden und dass das rasche Vorliegen von zuverlässigen Resultaten unter Umständen wichtiger ist als höchste Genauigkeit.

Terrestrische Deformationsmessungen weisen eine grosse innere Redundanz auf. Es gibt in der Regel eine beträchtliche Zahl von überschüssigen Messungen. Die-

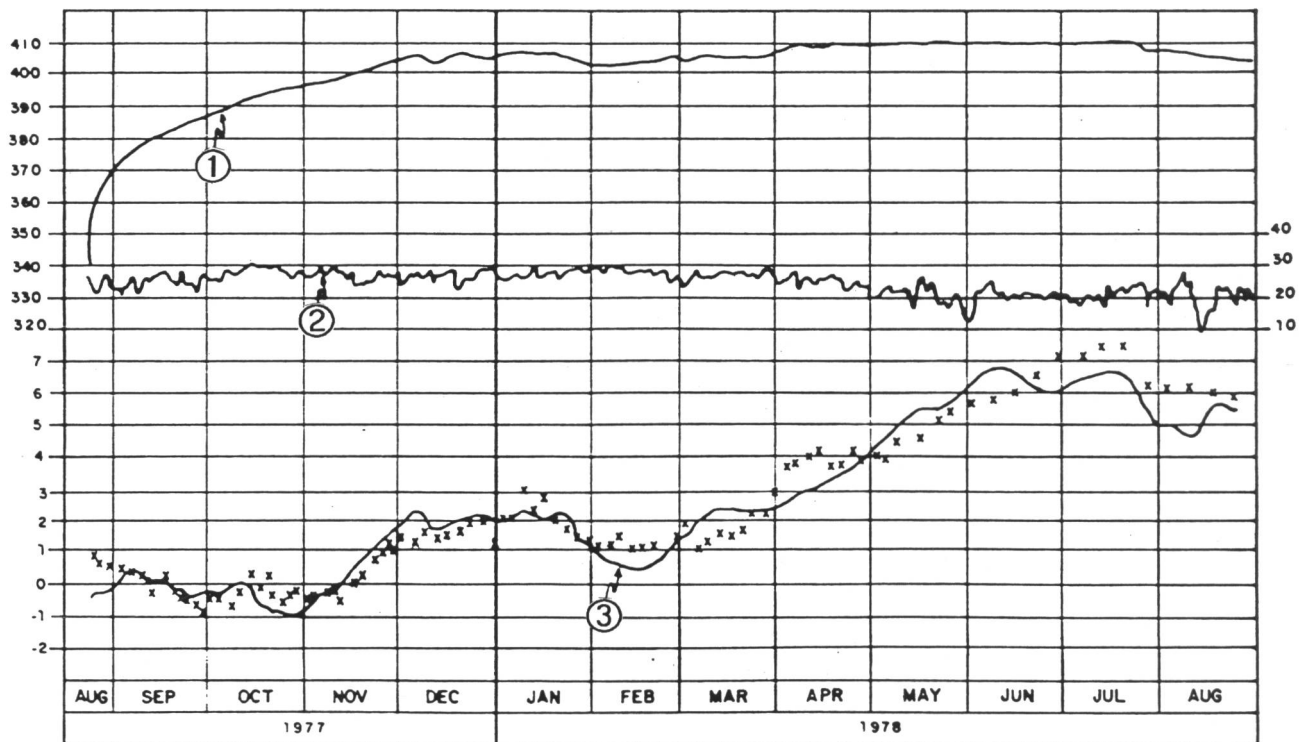


Figure 6.4. Barrage de São Simão (Brésil) [26].

1 Niveau de la retenue (m s. m.)
 2 Température moyenne journalière de l'air (°C)
 3 Déplacement estimé δ (mm)
 X Déplacement mesuré (mm)
 (Déplacement aval positif)

Bild 6.4. Staumauer São Simão (Brasilien) [26].

1 Seestand NA (m ü. M.)
 2 Mittlere tägliche Lufttemperatur (°C)
 3 Berechnete Deformation δ (mm)
 X Gemessene Deformation (mm)
 (luftseitige Deformation positiv)

$$\delta = 1,637 \times 10^{-5} H^3 - 7,094 \times 10^{-1} T_{115} + 16,101 \quad (H = NA - 328,48)$$

tats fiables est parfois plus importante qu'une précision extrême.

Les mesures terrestres de déformation présentent un haut degré de redondance. On dispose en général d'un nombre important d'observations surabondantes. Cette circonstance peut être exploitée dans le cas d'une exploitation in situ pour une optimisation des observations. L'exploitation est organisée en phases successives.

6.7.1 Contrôle des valeurs mesurées

La première phase sert à contrôler les observations exécutées, car des fautes grossières (lecture incorrecte, faute de transfert, erreur d'identification) ne peuvent pas être exclues, même si elles ne se produisent que rarement. Sur le terrain, on utilise aujourd'hui des «carnets électroniques» pour la saisie et le traitement immédiat des observations (moyennes, calcul de variances, réductions). On détecte ainsi la plupart des fautes et on peut répéter immédiatement les observations nécessaires. Ensuite, la meilleure méthode est la compensation sans contraintes (réseau libre), car ainsi les erreurs résiduelles obtenues ne dépendent que des observations de la dernière époque et en aucun cas d'hypothèses sur la stabilité des points fixes. Ces erreurs résiduelles suivent une distribution de probabilité connue (distribution normale avec espérance mathématique nulle) et un test statistique (le test des erreurs résiduelles normées) permet de détecter d'éventuelles fautes grossières sur les observations.

On peut aussi effectuer un test global du modèle (sur le quotient des variances a priori et a posteriori) avec la distribution de Fisher. Mais en général, ce test est moins sensible.

se Tatsache kann im Falle einer An-Ort-Auswertung für eine Optimierung der Beobachtungen ausgenutzt werden. Die Auswertung ist in Phasen unterteilt, die sukzessiv abgewickelt werden.

6.7.1 Überprüfung der neuen Messwerte

Die erste Phase hat als Ziel, die ausgeführten Messungen zu prüfen, da grobe Messfehler (falsche Ablesungen, Fehler in der Datenübertragung, Punktverwechslungen usw.) nicht im voraus ausgeschlossen werden können, obschon sie eher selten auftreten.

Im Feld werden heute die Messungen elektronisch erfasst und mit einem Feldrechner sofort aufbereitet (Mittelbildung, Varianzschätzung, Reduktionen). Dadurch können die meisten Messfehler sofort aufgedeckt werden und allfällige Messungswiederholungen finden sofort statt. Danach ist eine zwangsfreie Netzausgleichung (freies Netz) die geeignete Methode, um die Gesamtheit der Beobachtungen zu überprüfen, da die so ermittelten Beobachtungsverbesserungen nur von den Messungen der letzten Epoche und 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 entdecken zu können.

Man kann ebenfalls einen globalen Modelltest (am Quotient der Varianzen a priori und a posteriori) mit der Fisher-Verteilung durchführen. Er ist aber in den meisten Fällen weniger empfindlich als der Test der standardisierten Verbesserungen.

6.7.2 Test des hypothèses sur la stabilité des points fixes

La deuxième phase sert à tester les hypothèses sur la stabilité des points fixes. On peut mettre en évidence des déplacements locaux (petits glissements, piliers endommagés, etc.) grâce à des repérages excentriques. D'autres déplacements sont détectés par la comparaison des nouvelles coordonnées issues de la compensation libre avec les résultats des époques précédentes. Mathématiquement, cette compensation se fait par une transformation de Helmert, qui amène les nouvelles coordonnées en meilleure coïncidence possible avec les anciennes, sans déformation. L'analyse des écarts résiduels sur les coordonnées permet de tirer des conclusions sur d'éventuelles modifications planimétriques. On peut ainsi décider quels points de référence peuvent être effectivement considérés comme stables et lesquels doivent être redéterminés en même temps que les points de contrôle.

6.7.3 Les points-objets

Le calcul des coordonnées (planimétrie et altimétrie) des points-objets et d'éventuels points auxiliaires indispensables se fait par une compensation selon la méthode des moindres carrés. Pour atteindre la précision maximale, on considère comme constantes les coordonnées des points reconnus comme fixes.

Il faut donc considérer les coordonnées calculées et leur précision comme des grandeurs relatives par rapport à ces points fixes. La compensation livre en outre de nombreuses informations très utiles à l'analyse des déformations:

- les ellipses d'erreur moyenne (précision)
- les rectangles de fiabilité
- l'estimation de la précision atteinte pour chaque type d'observation (analyse de variance pour les directions, les distances, les observations GPS, etc.).

6.8 L'analyse des différences relatives de position et d'altitude

Pour déterminer une éventuelle déformation ou le déplacement de certains points survenus entre deux époques (par exemple une déformation du terrain), on compare les résultats des compensations correspondant à chacune de ces époques. Mais il faut prendre certaines précautions, dont certaines ont déjà été signalées. Les fautes grossières doivent avoir été éliminées, et on ne doit comparer que des résultats correctement ajustés l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire sur la base d'un certain nombre de points de référence communs, dont la stabilité a été vérifiée.

Ensuite, la comparaison point par point des coordonnées des deux époques donne en principe une idée de la déformation de l'ensemble de l'ouvrage. Mais on a vu que les coordonnées sont entachées d'incertitudes, représentées par les ellipses d'erreur moyenne. A plus forte raison, des différences de coordonnées seront aussi entachées d'incertitude. Tout le problème revient à décider pour chaque déplacement apparent, quelle partie n'est que la conséquence, non significative, des erreurs inévitables des mesures, et quelle partie constitue un déplacement réel du point, de manière un peu analogue à la problématique «signal-bruit» en électronique.

Les techniques actuelles nous offrent plusieurs possibilités pour répondre à ces questions. L'une d'elles consiste à calculer pour chaque point, dans une compensation globale, l'«ellipse d'erreur relative entre deux époques». Elle

6.7.2 Test der Festpunkthypothesen

In der zweiten Phase wird die Festpunkthypothese geprüft. Lokale Verschiebungen (kleine Rutschungen, Beschädigung der Pfeiler usw.) können mit Hilfe der exzentrischen Punktversicherungen ermittelt werden. Andere Festpunktbebewegungen werden aus dem Vergleich der neu bestimmten Koordinaten aus der zwangsfreien Ausgleichung mit den Resultaten der früheren Epochen erkannt. Mathematisch vergleicht man die neuen und die früheren Koordinaten mit einer Helmert-Transformation, die ohne Verzerrung die neuen Koordinaten in möglichst gute Übereinstimmung mit den alten bringt. Aus der Analyse der übrigbleibenden Koordinatendifferenzen können Schlussfolgerungen über allfällige Lageänderungen gezogen werden. So kann man entscheiden, welche Referenzpunkte tatsächlich als Festpunkte betrachtet werden können und welche zusammen mit den Objektpunkten (= Kontrollpunkte) neu zu bestimmen sind.

6.7.3 Die Objektpunkte

Die Berechnung der Koordinaten (Lage und Höhe) der Objektpunkte und der eventuell erforderlichen Hilfspunkte wird nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen. Um die höchste Genauigkeit zu erreichen, werden die Koordinaten der als fix erkannten Punkte als gegebene Konstanten betrachtet. Die berechneten Koordinaten und die Genauigkeiten sind daher als relative Angaben bezüglich dieser Festpunkte zu sehen. Die Ausgleichung liefert neben den gesuchten Punktkoordinaten eine Vielzahl an Zusatzinformationen, die für die Analyse der Deformation von grosser Bedeutung sind:

- die mittleren Fehlerellipsen (Genauigkeit)
- die Zuverlässigkeitsrechtecke
- die Schätzung der erreichten Genauigkeit der verschiedenen Beobachtungstypen (Varianzkomponentenschätzung für Richtungen, Distanzen, Satellitenbeobachtungen usw.).

6.8 Analyse von relativen Lage- und Höhendifferenzen

Um festzustellen, ob sich Netzknoten im Laufe der Zeit in der Lage oder in der Höhe verschoben haben (z.B. Geländedeformation), vergleicht man die ausgeglichenen Resultate zeitlich auseinanderliegender Messepochen. Auch wenn das Prinzip eines Vergleichs von neuen mit älteren Koordinaten auf den ersten Blick einfach erscheint, so ist bei einer Analyse trotzdem Vorsicht geboten; einige Gründe dafür sind schon genannt worden. So dürfen zum Beispiel keine groben Fehler mehr in den Beobachtungen vorliegen und nur richtig aufeinander abgestimmte Resultate verwendet werden, das heisst, die Epochen müssen auf den gleichen Festpunkten gelagert sein, deren Stabilität geprüft wurde.

Ein Vergleich von zwei zu einem Punkt gehörenden Punktkoordinaten, welche in zwei verschiedenen Messepochen erhoben worden sind, lässt schliesslich auf eine allfällige Deformation des gesamten Netzes schliessen. Dabei gilt es aber zu beachten, dass die Koordinaten jedes Punktes mit Fehlern behaftet sind; diese Unsicherheit der Resultate wird mit den mittleren Fehlerellipsen zum Ausdruck gebracht. Dies gilt ebenfalls für die Differenzen der Punktkoordinaten. Bei der Betrachtung von Koordinatendifferenzen stellt sich das Problem, zu entscheiden, welche «Verschiebungen» nicht signifikant sind, also von unvermeidlichen Beobachtungsfehlern herrühren, und welche einer realen Verschiebung entsprechen. Eine

a la même signification que l'ellipse d'erreur classique, mais au lieu de se rapporter à la position absolue du point, elle se rapporte au déplacement relatif du point entre les deux époques. Par un agrandissement adéquat, on peut la transformer en une ellipse de confiance au niveau 95% ou 99%. Si le déplacement apparent sort d'un tel domaine, alors il peut être considéré comme significatif, à ce niveau de confiance.

L'analyse des composantes principales (statistique multivariée) offre une autre solution, encore peu répandue: lorsque deux réseaux identiques sont ajustés l'un sur l'autre, la somme des carrés des résidus sur les points d'ajustage a un comportement décrit par la distribution chi-carré. Utilisant ce fait, un test dit «global» permet de conclure s'il faut ou non admettre l'hypothèse d'une déformation quelque part dans le réseau. Si oui, on procède alors à une «analyse des composantes principales», qui permet de localiser par itérations successives tous les points affectés d'un déplacement significatif.

6.9 Perspectives

Les progrès constants dans les moyens de calcul, les nouvelles techniques et algorithmes ouvrent plusieurs perspectives dans le domaine des mesures géodésiques de déformation.

La séparation classique en compensation planimétrique (2-dim.) puis altimétrique (1-dim.) peut être remplacée par une *compensation tridimensionnelle* globale, déjà opérationnelle dans d'autres applications géodésiques. En intégrant la totalité des observations sans hypothèses simplificatrices des modèles fonctionnel et stochastique, un tel calcul offre une meilleure modélisation qui prend mieux en compte les relations réciproques entre toutes les mesures.

Les derniers développements qui ont influencé la technique de traitement des mesures géodésiques sont les *compensations «robustes»*. Elles sont moins sensibles que la méthode des moindres carrés à la présence de fautes grossières dans les mesures et conduisent à des résultats quasi-corrects même si quelques fautes n'ont pas été détectées. Leur grand avantage est de permettre d'arriver au résultat définitif plus rapidement que la méthode ordinaire.

La répétition des observations à différentes époques introduit évidemment la notion du temps. En relation avec les capteurs fonctionnant en mode continu (température, déplacement relatif, verticalité, pression, etc.), certains spécialistes préconisent l'emploi de la technique des *séries temporelles* (Zeitreihen) pour modéliser les déformations en fonction des grandeurs influentes (figure 6.3), [27].

On a pu, par exemple, modéliser avec une grande fidélité des déplacements (mesurés pour contrôle) par une fonction des valeurs observées du niveau de la retenue et de la température moyenne de l'air (figure 6.4), [26].

Dans les faits, on est généralement amené à *analyser le comportement de l'ouvrage sur plus de deux époques*, pouvant s'étendre sur de nombreuses années. Les incertitudes sur la stabilité réelle des repères dits «stables», leur éventuel remplacement suite à une dégradation, mais aussi l'évolution de la configuration du réseau des mesures (visibilités perdues ou créées), et la précision variable des époques (en général croissante grâce au progrès des instruments et des méthodes), tout cela complique une telle analyse. On peut alors traiter ces situations complexes grâce à une *analyse multivariée*. En simplifiant, on peut dire que le principe est semblable à celui de

Analogie dazu finden wir in der Elektronik, wo bei elektrischen Signalen zwischen einem «Grundrauschen» und einem echten Signal unterschieden werden muss.

Zur Lösung der dargestellten Problematik stehen uns verschiedene Methoden und Ansätze zur Auswahl. Ein Ansatz besteht darin, für jeden Punkt, in einer globalen Ausgleichung, die relative Fehlerellipse zwischen den zwei Messepochen zu ermitteln. Diese Fehlerellipse hat die gleiche Bedeutung, wie die klassische Fehlerellipse, aber statt sich auf die absolute Lage eines Punktes zu beziehen, bezieht sie sich auf die relative Verschiebung eines Punktes zwischen zwei Messepochen. Multipliziert man die erhaltenen Ellipsenachsen mit einem bestimmten Vergrößerungsfaktor, so erhält man eine Ellipse mit einem Vertrauensintervall von 95% oder 99%; wenn nun die ermittelte Verschiebung einen gewissen Wert übersteigt (Wert ausserhalb der Ellipse), so kann die Verschiebung für das gewählte Vertrauensintervall als signifikant angenommen werden.

Ein noch nicht sehr verbreiteter Lösungsansatz ist die Hauptkomponentenanalyse der Verschiebungen (Multivariate Statistik): Wenn zwei identische Netze miteinander verglichen werden, so ist die Summe der Quadrate der Lagedifferenzen der Lagerungspunkte Chi-Quadrat verteilt. Macht man sich diese Tatsache zu Nutzen, so erlaubt ein «globaler» Test die Entscheidung, ob die Hypothese einer Netzdeformation an irgendeiner Stelle des Netzes angenommen werden soll oder nicht. Falls mit einer Netzdeformation gerechnet werden muss (laut dem globalen Test), werden die Hauptkomponenten näher analysiert. Dieses Vorgehen erlaubt ein iteratives Lokalisieren aller Punkte, welche von einer signifikanten Verschiebung betroffen sind.

6.9 Perspektiven

Der rasante Fortschritt moderner EDV-Anlagen, neue Technologien und neue Algorithmen lassen einen optimistischen Ausblick auf die Möglichkeiten von zukünftigen geodätischen Deformationsmessungen zu. Die klassische Trennung der zweidimensionalen Lage- von der eindimensionalen Höhenausgleichung, kann durch eine globale, *dreidimensionale Ausgleichung* ersetzt werden, was bereits bei anderen geodätischen Anwendungen gebräuchlich ist. Ein Zusammenfassen aller Messungen in ein ganzes System ohne grobe Vereinfachungen im funktionalen und stochastischen Modell trägt auch zu einer Verfeinerung der gegenseitigen Beziehungen zwischen den Beobachtungen bei, was letztendlich zu einer besseren, zuverlässigeren Ausgleichung führt.

Die jüngsten Fortschritte in der Bearbeitung von geodätischen Messungen sind mit der *robusten Ausgleichung* erzielt worden. Diese Methode ist auf grobe Fehler in den Beobachtungsdaten weniger anfällig als die Methode der kleinsten Quadrate, zudem führt sie zu «quasi-korrekten» Resultaten, auch wenn einige Beobachtungen grobe, nicht aufgedeckte Fehler aufweisen. Die definitiven Resultate werden mit der Methode der robusten Ausgleichung schneller ermittelt als mit der gebräuchlichen Methode, dies ist mitunter einer ihrer grössten Vorteile.

Mit sich wiederholenden Beobachtungen ein und derselben Grösse zu verschiedenen Zeiten fliesst ein weiterer Parameter in die geodätische Berechnung mit ein: die Zeit. Mit verschiedenen permanenten Sensoren, welche laufend Daten erheben (Temperatur, Luftdruck, relative Verschiebungen, Rotationen usw. sind denkbare Messgrössen), versuchen einige Spezialisten sogenannte *Zeit-*

crit à la fin du paragraphe 6.8: on compare la «précision interne» obtenue pour chaque époque séparément sur la base des mesures, à la «précision externe» résultant de l'ajustage global et simultané de toutes les époques (sur la base des erreurs résiduelles des coordonnées). Lors de cette comparaison, un test statistique global permet d'abord de décider si oui ou non il faut accepter l'hypothèse de déformations «quelque part et dans l'une ou l'autre époque». Si oui, un processus itératif permet dans une deuxième étape de localiser les déformations, à commencer par les plus significatives.

Toutes ces méthodes sont déjà pratiquées avec succès par certains instituts-pilotes ou administrations, en Suisse, en Allemagne, au Brésil ou ailleurs. L'avenir dira lesquelles constituent finalement le compromis économique et technique le plus intéressant.

reihen von Einflussgrößen in die geodätischen Berechnungen von Deformationsmodellen einzubinden (Bild 6.3), [27].

In der Praxis prüft man in der Regel das *Verhalten eines Bauwerkes über längere Zeit*. Veränderungen können so über einige Jahre hinweg verfolgt werden. Die Unsicherheiten bezüglich der «Stabilität» der als fest angenommenen Festpunkte, ihre mögliche Verschiebung, aber auch die laufende Veränderung der Netzkonfiguration und Messanordnung (Sichtbarkeit von Punkten: verdeckt oder neu geschaffen) sowie die sich laufend verbessernde Genauigkeit von Messinstrumenten (und allgemein die verbesserten Technologien, welche in der Vermessung zur Anwendung kommen), all das erschwert eine solche Analyse. Solch komplexe Systeme lassen sich dank einer *multivariaten Analyse* lösen. Vereinfacht kann man sagen, dass das Prinzip dabei dem am Schluss von Paragraph 6.8 beschriebenen Vorgehen gleicht: Die «innere Genauigkeit» jeder einzelnen Messepoche wird mit der «äusseren Genauigkeit» (berechnet aus der Gesamtheit der Messungen aller Messepochen) auf der Basis der verbleibenden Widersprüche der einzelnen Koordinaten verglichen. Bei diesem Vergleich von innerer und äusserer Genauigkeit erlaubt ein globaler statistischer Test vorab eine Aussage darüber, ob die Hypothese einer Verschiebung der Punkte «an eine beliebige Stelle im Netz und während irgendeiner Messepoche» angenommen werden muss oder nicht. Lautet die Antwort «Ja», so werden in einem zweiten Schritt iterativ die Verformungen, beginnend mit den signifikantesten, eruiert.

Die hier beschriebenen Methoden sind bereits mit grossem Erfolg bei verschiedenen Pilotprojekten an Hochschulen und diversen Institutionen eingesetzt worden, in der Schweiz, in Deutschland, in Brasilien usw. Die Zukunft wird zeigen, welche Methode sich schliesslich bezüglich des Kompromisses von Wirtschaftlichkeit und Technologie durchsetzen kann.

Annexe n° 1

1. Mesures automatiques

Dr Heinz Aeschlimann

1.1 Les mesures comme base de la surveillance

La surveillance des barrages et de leurs alentours sert, en fin de compte, à distinguer entre comportement normal et comportement exceptionnel. La détection précoce et fiable d'un comportement exceptionnel est essentielle pour l'analyse de l'état d'un ouvrage.

Les barrages, comme le terrain, ne sont pas surveillés intégralement, mais par l'intermédiaire d'un système réduit de points choisis à cet effet. La surveillance est constituée par les mesures géodésiques entre les points de cet ensemble et par la mesure ponctuelle de grandeurs physiques. La seule méthode autorisant la mesure intégrale de grandeurs géodésiques est la photogrammétrie, mais pour des raisons de précision, elle reste limitée à des cas particuliers.

L'ensemble de l'information sur le comportement des points du système réduit est contenu dans les séries enregistrées des différentes grandeurs observées. Du point de vue mathématique, ces observations constituent des séries temporelles. L'interprétation des résultats calculés sur la base de ces séries temporelles suppose que l'on

Anhang Nr. 1

1. Automatische Messungen

Heinz Aeschlimann

1.1 Messungen als Grundlage von Überwachungen

Die Überwachung von Talsperren und ihrer Umgebung dient letzten Endes der Unterscheidung des Normalverhaltens vom ausserordentlichen Verhalten. Sicheres und frühzeitiges Erkennen eines ausserordentlichen Verhaltens ist für die Beurteilung des Zustandes eines Objektes wesentlich.

Sowohl die Talsperren als auch das Gelände werden nicht integral, sondern durch ein in Einzelpunkte aufgelöstes Ersatzsystem erfasst. Die Überwachung stützt sich sowohl auf geodätische Messungen zwischen den Punkten des Ersatzsystems als auch auf die punktuelle Messung von physikalischen Grössen. Als einzige Messmethode für geodätische Grössen erlaubt die Photogrammetrie eine integrale Erfassung, allerdings wegen der Genauigkeit beschränkt auf Spezialfälle.

Die gesamte Information über das Verhalten des Ersatzsystems ist in den Messreihen der verschiedenen Messgrössen enthalten. Sie stellen im mathematischen Sinn Zeitreihen dar. Die Interpretation der aus den Zeitreihen für das Ersatzsystem berechneten Resultate setzt