

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: Mesures terrestres de déformation = Terrestrische Deformationsmessungen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939996>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 28.03.2026

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

Les méthodes de mesure mentionnées ci-dessus sont également utilisées pour la surveillance de parties critiques de glaciers. De plus, les changements de forme de masses de glace risquant de se détacher sont en partie contrôlés par photogrammétrie. Les mesures de déformation par photogrammétrie sont aussi peu à peu mises en œuvre pour la surveillance de masses rocheuses instables (voir chapitre 5). Les photos qui en résultent contiennent des informations supplémentaires pour l'appréciation de la sécurité. L'état de zones de terrains peut être documenté de manière particulièrement efficace à l'aide de photos aériennes périodiques. Au cas où un danger est identifié, des restitutions photogrammétriques ultérieures peuvent être effectuées.

Du fait que ce n'est que par la répétition des mesures qu'on peut déterminer de manière fiable si le système de mesures est approprié, en particulier en ce qui concerne le choix des points fixes, une deuxième série de mesures devrait suivre une première au plus tard après un an. Pour la surveillance proprement dite, c'est-à-dire dès que l'origine et le mécanisme de l'instabilité sont suffisamment connus, les mesures doivent être répétées au moins tous les cinq ans. Des systèmes de mesures simplifiés sont recommandés pour des mesures plus fréquentes à l'aide desquelles des variations saisonnières ou des accélérations extraordinaires des mouvements doivent être saisies. On peut envisager d'implémenter des mesures simplifiées automatiques dans le cas de mouvements extraordinaires ou dans des terrains inaccessibles (voir annexe 1).

3. Mesures terrestres de déformation

Kurt Egger

3.1 Introduction

La géodésie terrestre est une des disciplines de la métrologie. C'est le procédé utilisé habituellement en mensuration nationale jusqu'à ce jour pour obtenir des coordonnées et des altitudes dans un système unique.

Depuis les années 1920, les méthodes de la géodésie classique servent aussi à déterminer le comportement des barrages et de leurs environs.

La mesure de directions ou d'angles horizontaux permet grâce au calcul d'intersection de déterminer les mouvements horizontaux de points de contrôle choisis sur le parement aval du barrage. Depuis 1973, on dispose aussi de la mesure de distances précises au moyen d'appareils électro-optiques. Les mouvements verticaux sont déterminés par nivellement de précision ou par la mesure d'angles verticaux (angles de hauteur ou distances zénithales).

Par ces méthodes, toujours plus précises au cours des années, on parvient à décrire le comportement des barrages par l'intermédiaire d'un plus ou moins grand nombre de points de contrôle, selon les besoins des autorités de surveillance, des experts et des ingénieurs constructeurs.

3.2 La conception du réseau

Avec l'exploitation, la conception du réseau de mesure (ci-après appelée le projet) constitue l'aspect le plus important des mesures terrestres de déformation. Le projet prévoit pour une longue période, de 50 ans ou plus, quelles déformations planimétriques et altimétriques devront

wenn möglich, wie die Bohrungen in das äussere Messnetz integriert werden.

Die erwähnten Messverfahren kommen auch zur Überwachung von kritischen Gletscherpartien zum Einsatz. Die Formänderungen der Oberflächen absturzgefährdeter Eismassen werden teilweise zusätzlich photogrammetrisch kontrolliert. Die photogrammetrische Deformationsmessung hat sich inzwischen auch bei speziellen Überwachungen von Lockergesteinsmassen durchgesetzt (siehe Kapitel 5). Die dabei anfallenden Photos enthalten zusätzliche Informationen für die Sicherheitsbeurteilung. Mit periodischen Luftaufnahmen kann der Zustand von Geländepartien besonders gut dokumentiert werden. Falls eine Gefährdung erkannt wird, sind nachträgliche messtechnische Auswertungen möglich.

Weil die Eignung der Messanlage, besonders die Richtigkeit der Festpunktannahmen, oft nur durch Wiederholung der Messung zuverlässig festgestellt werden kann, sollte der ersten Messung spätestens nach einem Jahr eine zweite folgen. Zur reinen Überwachung, d.h. sobald Ursache und Mechanismus der Instabilität genügend bekannt sind, sind die Messungen mindestens alle fünf Jahre zu wiederholen. Für häufigere Messungen, mit denen saisonale Schwankungen oder ausserordentliche Beschleunigungen der Bewegungen erfasst werden sollen, sind vereinfachte Messungen anzustreben. Denkbar ist, dass bei ausserordentlichen Bewegungen oder in unzugänglichem Gelände automatisierte, vereinfachte Messungen zum Einsatz kommen müssten (siehe Anhang Nr. 1).

3. Terrestrische Deformationsmessungen

Kurt Egger

3.1 Einleitung

Die terrestrische Geodäsie ist ein Zweig der Metrologie. Sie ist das in der Landesvermessung gebräuchliche Verfahren, welches man bis heute verwendet hat, um in einem einheitlichen System Koordinaten und Höhen zu bestimmen.

Seit etwa 1920 dienen die Methoden der klassischen Geodäsie auch der Bestimmung des Verformungsverhaltens von Stauanlagen und ihrer Umgebung.

Die Messung von horizontalen Winkeln oder Richtungen ermöglicht mittels Vorwärtseinschnitt die Feststellung von horizontalen Bewegungen ausgewählter Kontrollpunkte an der Luftseite der Stauanlage. Dazu kommt seit etwa 1973 die Messung von genauen Distanzen mit Hilfe von elektrooptischen Distanzmessgeräten. Vertikale Bewegungen werden mittels Präzisionsnivellement oder der Messung von Vertikalwinkeln (Höhenwinkeln oder Zenitdistanzen) ermittelt.

Mit diesen im Laufe der Jahrzehnte immer genaueren Messmethoden gilt es, das Verhalten der Stauanlagen entsprechend den Bedürfnissen der Aufsichtsbehörde, der Experten und der Bauingenieure anhand einer kleineren oder grösseren Zahl von Kontrollpunkten zu erfassen.

3.2 Das Projekt

Das Projekt der Messanlage stellt zusammen mit der Auswertung den wichtigsten Bestandteil der terrestrischen Deformationsmessung dar. Das Projekt legt für eine lange Zeitdauer von 50 oder mehr Jahren fest, welche Lage-

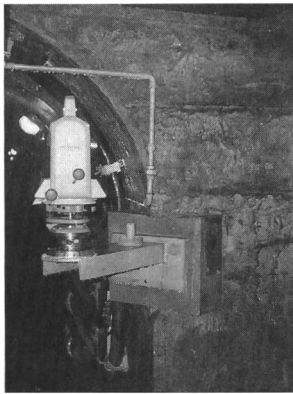
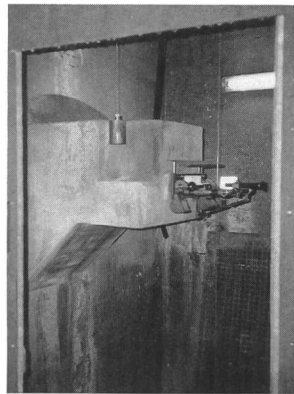


Figure 3.1. Console avec T2002, points de lecture d'une pendule avec coordiscopie et transfert d'altitude.

Bild 3.1. Konsole mit T2002, Lotablesestelle mit Koordiskop, Höhenübertragung.



être déterminées géodésiquement, et avec quelle précision. Il est toutefois possible de compléter ou d'étendre en tout temps des mesures terrestres de déformation, qui sont très flexibles et peuvent en principe être facilement adaptées à de nouvelles circonstances (voir aussi 3.7 Perspectives). On doit pourtant s'efforcer dès le départ de concevoir le projet le plus global possible.

La conception d'un réseau terrestre de déformation exige une collaboration étroite entre l'ingénieur constructeur et l'ingénieur géomètre. C'est là que se décide la relation adéquate entre les instruments de mesure installés dans le barrage (pendules, extensomètres, etc.) et les points de contrôle géodésiques. C'est de là aussi que ré-

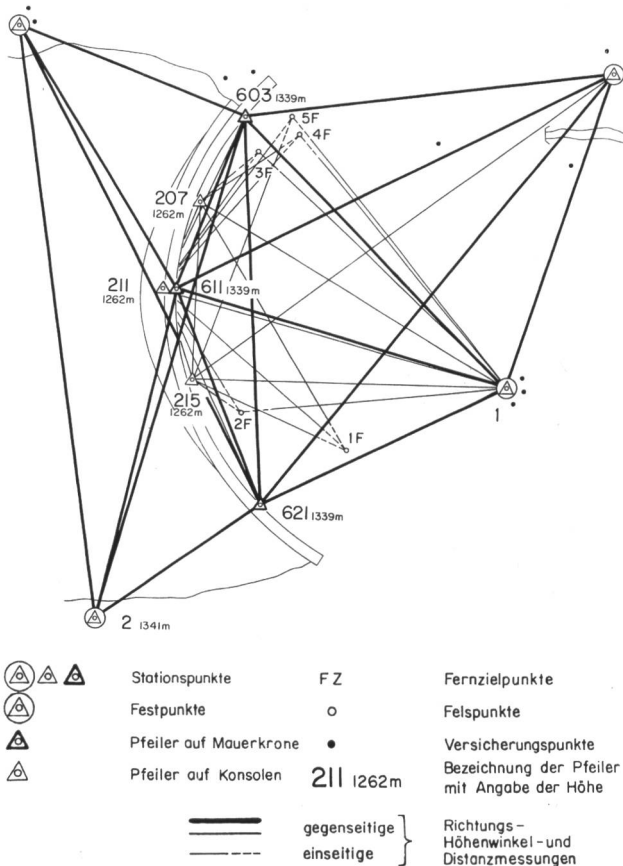


Figure 3.2. canevas du réseau de Gigerwald (voir figure 2.6).
Bild 3.2. Netzplan Gigerwald (siehe auch Bild 2.6).



Figure 3.3. Point de contrôle: cheville centrale avec réflecteur.

Bild 3.3. Kontrollpunkt: Zentrumsbolzen mit Reflektor.



Figure 3.4. Point de contrôle: console avec cible et réflecteur.

Bild 3.4. Kontrollpunkt: Konsole mit Zielmarke und Reflektor.

und Höhenänderungen geodätisch und mit welcher Genauigkeit erhoben werden sollen. Es ist zwar möglich, terrestrische Deformationsmessungen jederzeit zu ergänzen und zu erweitern. Die Methode der terrestrischen Deformationsmessungen ist äusserst flexibel und kann sich neuen Gegebenheiten (siehe dazu auch 3.7 Zukunft) in der Regel leicht anpassen. Trotzdem sollte am Anfang danach getrachtet werden, das Projekt der terrestrischen Deformationsmessung möglichst umfassend darzustellen.

Das Projekt einer terrestrischen Deformationsmessung erfordert die enge Zusammenarbeit zwischen dem verantwortlichen Bauingenieur und dem Geodäten. Dabei wird das Zusammenspiel zwischen den in der Stauanlage eingebauten Messinstrumenten (Lote, Extensometer usw.) und den geodätischen Kontrollpunkten festgelegt. Daraus ergibt sich die Redundanz des gesamten Überwachungssystems und damit auch dessen Zuverlässigkeit.

Es kann nicht genügend betont werden, dass das Messprojekt der terrestrischen Deformationsmessung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt, am besten aber bei der Projektierung der Stauanlage, erfolgen muss. Es ist aber auch denkbar, dass bereits im Stadium des Vorprojektes der Stauanlage auch ein Vorprojekt der terrestrischen Deformationsmessung erstellt wird. Das Konzept der terrestrischen Deformationsmessung kann einen Einfluss auf das Projekt der Stauanlage haben. So sind z. B. die Lage und Ablesestellen der Lote (Bild 3.1) und die Anordnung der Polygonzüge in einer Stauwand voneinander abhängig.

Das Projekt nimmt auf zukünftige Entwicklungen der Messtechnik, soweit bekannt oder voraussehbar, Rücksicht.

Das Projekt legt den Ort und die Zahl der Fest- und Kontrollpunkte einer Messanlage fest, und zwar sowohl an und auf der Stauanlage als auch in der Stauanlage und ihrer Umgebung.

Das Projekt sorgt für die genügende Bestimmung der Kontrollpunkte und die Überprüfung der Festpunkte in einem einheitlichen Koordinatensystem.

Zum Projekt gehören auch die Angaben über die zu erreichenden Genauigkeiten der Verschiebungen (Lage- und Höhenänderungen) unter Berücksichtigung der Versicherung der Fest- und Kontrollpunkte und der zum Einsatz gelangenden Instrumente.

Die folgenden Abschnitte 3.2.1 bis 3.2.6 geben dazu weitere Informationen.



Figure 3.5. T2000 et ME 5000.
Bild 3.5. T2000 und ME 5000.

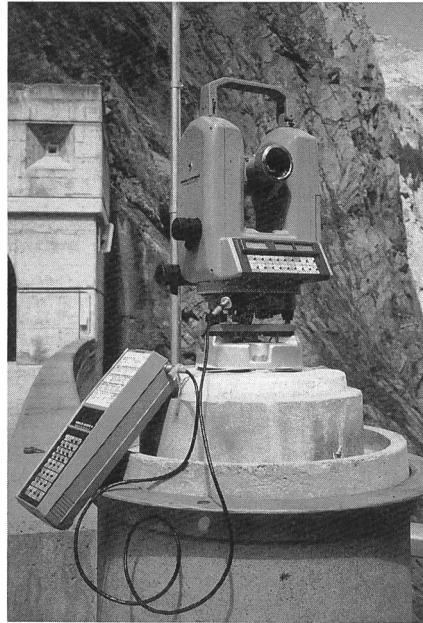
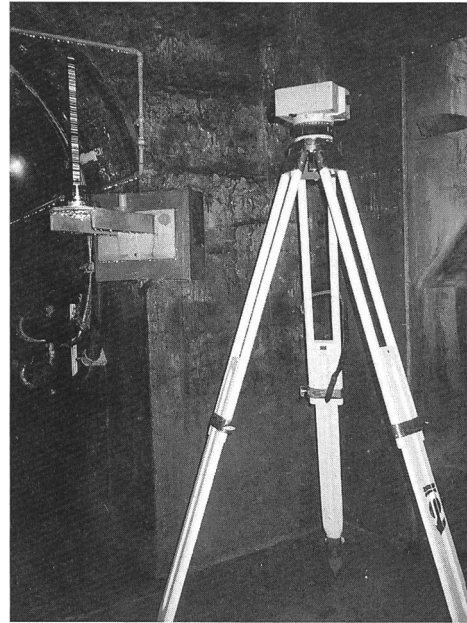


Figure 3.6, à droite. NA 3000.
Bild 3.6, rechts. NA 3000.



sulte le niveau de redondance globale du système de surveillance et par conséquent sa fiabilité.

On n'insistera jamais assez sur la nécessité de concevoir le dispositif des mesures terrestres de déformation le plus tôt possible, de préférence lors de la conception du barrage lui-même. On peut même imaginer qu'un avant-projet pour les mesures terrestres de déformation soit conçu déjà au stade de l'avant-projet du barrage, car celui-ci peut être influencé par le premier. Par exemple, les points de lecture des pendules (figure 3.1) et la disposition des cheminements polygonométriques à l'intérieur du barrage sont mutuellement dépendants.

Le projet doit prendre en compte les évolutions futures de la technique de mesure, pour autant qu'elles soient connues ou prévisibles.

Le projet prévoit le nombre et le lieu des points fixes et des points de contrôle du dispositif aussi bien sur le barrage lui-même que sur l'ensemble de la retenue et de ses environs.

Le projet doit aussi veiller à une détermination précise des points de contrôle et au contrôle des points fixes dans un système de coordonnées unique.

Le projet doit encore fixer la précision nécessaire avec laquelle les déplacements altimétriques et planimétriques doivent être déterminés compte tenu de la matérialisation des points fixes et de contrôle et des instruments à utiliser.

Les paragraphes suivants 3.2.1 à 3.2.6 donnent d'autres informations à ce sujet.

3.2.1 Le réseau des points fixes

Pour un choix soigneux des points fixes, la collaboration du géologue est conseillée, voire nécessaire. On les choisit en principe à proximité du barrage, mais à l'extérieur de sa zone d'influence (zone de pression). Il ne faut pas oublier qu'à cause des liaisons visuelles réciproques nécessaires aux observations terrestres, la topographie de l'endroit joue un rôle déterminant (figure 3.2). Les besoins pour l'implantation du futur barrage peuvent influencer la position des points fixes et par conséquent le moment de la construction des piliers.

Pour limiter la propagation des erreurs sur les points de contrôle du barrage, les points fixes sont situés de préfé-

3.2.1 Festpunktnetz

Für die sorgfältige Auswahl der Festpunkte ist die Zusammenarbeit mit dem Geologen zweckmässig, wenn nicht sogar zwingend nötig. Sie liegen in der Regel in der näheren Umgebung der Stauanlage, jedoch ausserhalb deren Einflussbereichs (Druckzone) der Stauanlage. Dabei darf nicht verkannt werden, dass wegen der gegenseitigen Sichtverbindungen, die bei der terrestrischen Deformationsmessung gegeben sein müssen, die Topographie des Geländes eine ausschlaggebende Rolle spielt (Bild 3.2).

Die Bedürfnisse für die Absteckung der zu erstellenden Talsperre kann für die Lage der Festpunkte mitbestimmend sein. Der Zeitpunkt der Errichtung der Pfeiler kann dadurch beeinflusst werden.

Festpunkte liegen, wegen der Fehlereinflüsse auf die Kontrollpunkte bei der Stauanlage, mit Vorteil luft- und wasserseits der Stauanlage. Die Zahl der Festpunkte ist nach oben offen. Es muss immer damit gerechnet werden, dass der eine oder andere Festpunkt, auch wenn er sorgfältig ausgesucht und versichert wurde, nicht fest ist oder im schlimmsten Fall durch Lawinen, Hochwasser, Rutschungen usw. zerstört wird. Eine Zahl von 4 Festpunkten scheint das untere Minimum.

Der ganzjährigen Zugänglichkeit zu den Festpunkten ist grosse Beachtung zu schenken. In alpinen Verhältnissen steht das geodätische Netz im Winter aber unter Umständen nur beschränkt zur Verfügung. Auch das Wetter schränkt allenfalls die Verfügbarkeit in kleinem Masse ein.

3.2.2 Kontrollpunkte

Als Kontrollpunkte oder Messpunkte werden diejenigen Punkte bezeichnet, die Informationen (Lage- und/oder Höhenänderungen usw.) über das Verformungsverhalten der Stauanlage und ihrer Umgebung liefern (Bilder 3.3 und 3.4). Kontrollpunkte mit nur nivellistisch bestimmten Höhenänderungen, ohne Lageänderungen, bezeichnet man oft auch als Nivellementsunkte. Kontrollpunkte in der Umgebung, an und auf der Stauanlage sind in das geodätische Netz eingebunden. Dazu dienen die bekannten klassischen Messverfahren.

Kontrollpunkte in den Kontrollgängen einer Stauanlage, in der Regel Polygonzüge, liefern hochgenaue relative

rence à l'amont et à l'aval de celui-ci. Leur nombre n'est pas limité. On doit toujours s'attendre à ce que l'un ou l'autre des points fixes soit instable, ou détruit par des avalanches, des glissements ou des hautes eaux, même s'ils ont été choisis et matérialisés avec soin. Quatre points fixes constituent un minimum absolu. On cherchera à garantir un accès aux points fixes pendant toute l'année. Toutefois, en milieu alpin, un réseau géodésique peut n'être, selon les circonstances, que partiellement utilisable en hiver. Le temps lui-même peut en limiter l'usage.

3.2.2 Les points de contrôle

Les points de contrôle ou de mesure sont ceux qui livrent les informations (déplacements planimétriques et/ou altimétriques) sur le comportement de l'ouvrage et de son environnement (figures 3.3 et 3.4). Les points de contrôle dont on ne détermine que les variations altimétriques sont souvent appelés points de nivellement. Les points de contrôle situés dans les environs et ceux situés contre ou sur le barrage sont rattachés au réseau géodésique. Ils sont déterminés par les méthodes de mesure classiques.

Les points de contrôle situés dans les galeries de contrôle d'un barrage – il s'agit en principe de points de polygone – livrent des déplacements planimétriques et altimétriques relatifs très précis, décrivant bien la déformation de l'ouvrage. Par un rattachement au réseau géodésique, par des pendules fixes ou par la prolongation des cheminements polygonométriques dans la montagne grâce aux galeries de sondage, les mouvements relatifs sont transformés en mouvements absolus. Ils se rapportent aux points fixes.

En ce qui concerne l'accès aux points de contrôle au voisinage du barrage, les remarques sous 3.2.1 sont valables. Par contre, les points de contrôle situés à l'intérieur du barrage ne sont pas soumis à ces restrictions. Ils sont accessibles toute l'année et utilisables par n'importe quel temps.

3.2.3 Les exigences de précision

Il est très rare que le maître de l'ouvrage ou l'ingénieur constructeur fixent eux-mêmes la précision des coordonnées ou des déplacements. C'est donc en principe pendant la phase de conception que doit être effectuée une préanalyse de la précision (calcul a priori) ou une estimation des précisions qu'il est possible d'atteindre. Le propriétaire de l'ouvrage devrait être informé sur l'ordre de grandeur des ellipses d'erreur ou des intervalles de confiance des déplacements planimétriques et altimétriques. La précision exigée a une grande influence sur la matérialisation des points fixes et de contrôle (par ex. chevilles de centrage), sur l'instrumentation nécessaire et sur le volume des mesures, et, par conséquent, sur le coût d'une mesure terrestre de déformation.

3.2.4 Les équipements

Le dispositif d'observation, les méthodes choisies et la précision à atteindre déterminent les équipements à mettre en œuvre. Pour des mesures terrestres de déformation, il s'agit en principe de théodolites, de distancemètres électro-optiques et de niveaux, et, pour les cheminements polygonométriques, éventuellement d'un instrument pour la mesure de distances avec un fil ou un ruban d'invar (figures 3.5 et 3.6). A cela s'ajoute une grande quantité d'accessoires (cibles, réflecteurs, adaptateurs, plombs optiques, mires de nivellement en invar, fils d'invar, etc).

Au cours des dix dernières années, l'automatisation des instruments a accompli des progrès remarquables. Les

Lage- und Höhenänderungen, die bereits ein gutes Verformungsbild des Bauwerks ergeben. Durch den Anschluss an das geodätische Netz sei es über die fest eingebauten Lote oder, weniger empfehlenswert, durch Ausgänge an die Luftseite der Stauanlage oder durch die Verlängerung der Polygonzüge mittels Sondierstollen in das Gebirge hinein, werden aus relativen Bewegungen absolute Bewegungen. Sie beziehen sich auf die Festpunkte.

Bezüglich Zugang und Verfügbarkeit der Kontrollpunkte in der Umgebung der Stauanlage gelten die Ausführungen unter 3.2.1. Kontrollpunkte in der Stauanlage unterliegen diesen Beschränkungen nicht. Sie sind ganzjährig zugänglich und auch bei schlechten Witterungsverhältnissen verfügbar.

3.2.3 Genauigkeitsanforderungen

Es ist ganz selten, dass der Bauherr oder der Bauingenieur eine zu erreichende Genauigkeit der Koordinaten oder der Verschiebungen vorgeben. Daher gehört zum Projekt in der Regel eine Präanalyse der Genauigkeit (A-priori-Berechnung) oder eine Schätzung der erreichbaren Genauigkeiten. Dem Werkeigentümer sollten Angaben über die Grössenordnung der Fehlerellipsen und allfälliger Konfidenzbereiche der Lage- und Höhenänderungen gegeben werden. Die geforderte Genauigkeit hat einen grossen Einfluss auf die Versicherung der Fest- und Kontrollpunkte (z. B. Zentrierung), auf das eingesetzte Instrumentarium und auf den Umfang der Messungen und damit auf die Kosten einer terrestrischen Deformationsmessung.

3.2.4 Instrumentarium

Die Messanlage, die eingesetzten Messmethoden und die Genauigkeitsanforderungen bestimmen das einzusetzende Instrumentarium. Es besteht bei der terrestrischen Deformationsmessung in der Regel aus Winkelmessgeräten (Theodoliten), elektro-optischen Distanzmessgeräten (EDM), Nivellierinstrumenten und bei Polygonzügen evtl. einem Instrument für die Messung von Invardraht/band-Distanzen (Bilder 3.5 und 3.6). Dazu kommen eine grosse Zahl von zusätzlichen Geräten (Zielmarken, Reflektoren, Adaptern, Ablotgeräte, Invarnivellierlatten, Invardrähte usw.).

Im Laufe der letzten 10 Jahre hat die Automatisierung der Instrumente beachtliche Fortschritte erzielt. Theodolite zeigen die beobachteten Winkelwerte digital an und registrieren sie – sofern vorhanden – in einem Datenregistriergerät. Damit entfallen Ables-, Schreib- und Übertragungsfehler. Nivellierinstrumente sind heute in der Lage, an einer Strichodelatte selbst Ablesungen zu tätigen – und zu registrieren.

Folgende Beobachtungsgenauigkeiten sind mit den heutigen Instrumenten erreichbar:

Richtungen		±2'' (10'' entsprechen 1 mgon)
Höhenwinkel		±3''
Distanzmessung	Mekometer	±(0,1 mm + 0,7 ppm) oder ca. ±0,8 mm/km
	Distinvar	±0,02 mm
Nivellierinstrumente		±0,1 mm/Aufstellung

Diese Genauigkeiten können bei guten Bedingungen und erfahrenen Beobachtern unterschritten werden.

Das Instrumentarium für die terrestrische Deformationsmessung einer grossen Staumauer kann sehr umfangreich sein, und nicht alle Hilfsmittel sind Standardartikel. Die Entwicklung von neuen Instrumenten für neue Messmethoden geht weiter (siehe auch 4. und 5.). Damit erge-

théodolites affichent les angles observés sous forme digitale et les enregistrent – le cas échéant – dans un carnet électronique de terrain. On évite ainsi les fautes de lecture, d'écriture et de transfert. Les niveaux actuels sont capables d'effectuer eux-mêmes les lectures sur une mire à code barre et de les enregistrer.

Les précisions d'observation suivantes sont à la portée des instruments actuels:

Directions		$\pm 2''$ ($10''$ correspondent à 1 mgon)
Angles de hauteur		$\pm 3''$
Distances	Mekometer	$\pm (0,1 \text{ mm} + 0,7 \text{ ppm})$ ou env. $\pm 0,8 \text{ mm/km}$
	Distinvar	$\pm 0,02 \text{ mm}$
Niveaux		$\pm 0,1 \text{ mm/station}$

Dans de bonnes conditions, des observateurs expérimentés peuvent encore améliorer ces valeurs.

L'équipement pour la mesure terrestre de déformation d'un grand barrage peut être très conséquent, et certaines de ses composantes ne sont pas d'usage courant. Le développement de nouveaux instruments et de nouvelles méthodes de mesure se poursuit (voir aussi ch. 4 et 5). Il en résulte de nouvelles possibilités. Leur intégration critique et réaliste dans des dispositifs de mesure existants constitue précisément l'un des aspects les plus intéressants de l'activité de l'ingénieur géomètre, dont l'esprit d'innovation peut se développer pratiquement sans limites.

3.2.5 Mesures réduites

Le projet devrait aussi explorer la possibilité d'effectuer des mesures réduites. Il n'est pas toujours nécessaire en effet de procéder à une mesure de déformation complète. Diverses réductions du dispositif de mesure sont envisageables. On parlera alors de mesures réduites, voire de mini-mesures.

La conception montrera les réductions possibles. Il peut suffire, dans certains cas, de ne mesurer qu'une partie des points de contrôle, par exemple pour vérifier le comportement des points d'ancrage des pendules. A cet effet, l'observation de quelques points sur le couronnement du barrage ou d'un cheminement polygonométrique à l'intérieur du barrage peuvent suffire.

Les mesures réduites offrent de gros avantages du point de vue économique, au prix toutefois d'une perte d'information, de précision et de fiabilité. Les mesures réduites doivent être adaptées en fonction de l'évolution des circonstances.

3.2.6 Les mesures automatisées

L'automatisation des mesures géodésiques a déjà accompli de grands progrès. Le professeur Kahmen avait effectué les premiers pas avec un GEOROBOT pour la surveillance géodésique de grandes parois dans les gisements de houille de la Ruhr. Au moyen de théodolites équipés de moteurs pas à pas et d'un dispositif de pointé assisté par un processeur, il était déjà possible en 1983 d'observer des distances électro-optiques vers des réflecteurs fixes et de déterminer ainsi des déplacements planimétriques unidimensionnels [3]. Cette méthode fut à nouveau utilisée dans le Val Maggia (Campo et Cerentino).

Il s'agissait toujours de distances. Jusqu'à récemment, le pointé automatique d'un repère pour les mesures angulaires n'avait pas la précision souhaitée. Ce n'est qu'avec la mise en œuvre de caméras CCD (charged coupled device) qu'on semble parvenir à automatiser les mesures angulaires horizontales et verticales avec grande préci-

ben sich neue Möglichkeiten, und gerade die kritische und wirtschaftliche Integration neuer Instrumente in bestehende Messanlagen bildet einen interessanten Aspekt der Tätigkeit des Geodäten. Der Innovation des Geodäten sind fast keine Grenzen gesetzt.

3.2.5 Reduzierte Messungen

Das Projekt sollte auch die Möglichkeit von reduzierten Messungen aufzeigen. Es ist nicht immer nötig, eine vollständige terrestrische Deformationsmessung vorzunehmen. Es sind verschiedene Reduktionen der Messanlage denkbar. Man spricht dann von reduzierten Messungen und eventuell von Mini-Messungen. Das Projekt zeigt mögliche reduzierte Messungen auf. Es mag in gewissen Fällen genügen, einen Teil der Kontrollpunkte zu messen, z. B. das Verhalten der Aufhängepunkte der Lote/Ankerpunkte der Schwimmlote zu überprüfen. Dazu genügt allenfalls die Beobachtung von wenigen Punkten auf der Krone der Stauanlage, oder es genügt die Messung eines Polygonzuges in der Stauanlage.

Reduzierte Messungen bieten grosse wirtschaftliche Vorteile, die allerdings mit einem Verlust an Information, Genauigkeit und Zuverlässigkeit erkauft werden. Reduzierte Messungen sind späteren veränderten Gegebenheiten anzupassen.

3.2.6 Automatisierte Messungen

Die Automatisierung von geodätischen Messvorgängen ist bereits heute weit fortgeschritten. Erste Schritte mit einem Georobot unternahm Prof. H. Kahmen bei der geodätischen Überwachung der riesigen Hänge beim Braunkohlenabbau im Ruhrgebiet. Durch die Ausrüstung von Theodoliten mit Schrittmotoren und einer prozessorientierten Anzielung war es schon im Jahre 1983 möglich, elektro-optische Distanzen zu festen Reflektoren zu messen und damit eindimensionale Lageänderungen festzustellen [3]. Die Methode wurde für die Bedürfnisse im Val Maggia (Campo und Cerentino) weiterentwickelt.

Immer waren es Distanzmessungen. Die automatische Erfassung eines Zielpunktes für die Winkelmessung erreichte bis vor kurzem nicht die erwünschte Genauigkeit. Erst mit dem Einsatz von CCD- (charged coupled device) Kameras scheint es gelungen zu sein, auch Horizontal- und Vertikalwinkel mit hoher Genauigkeit automatisch zu messen. Zusammen mit der automatischen Distanzmessung ergeben sich damit neue Möglichkeiten der kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken oder Rutschhängen vom Büro aus ([4], [5], [6] und Anhang Nr. 1).

Die Kosten solcher kontinuierlicher Überwachungen, sowohl die Einrichtung der Anlagen wie auch der Unterhalt, sind hoch. Aber sie können in Einzelfällen durchaus gerechtfertigt sein.

3.3 Installation der Messanlage

Die Installation der Fest- und Kontrollpunkte richtet sich nach der voraussichtlichen Dauer der Überwachung. Für die temporäre Messung eines Bauzustandes gelten andere Gesichtspunkte als für eine permanente Messanlage einer grossen Stauanlage.

Der Installation ist grösste Aufmerksamkeit zu schenken, und sie ist nur beschränkt der Bauleitung oder Bauunternehmung zu überlassen. Es hat sich als empfehlenswert erwiesen, die Zentriervorrichtungen auf den Pfeilern und die Bolzen der Kontrollpunkte mindestens unter Aufsicht des Geodäten zu versetzen.

Die Versicherung der Festpunkte erfolgt in der Regel durch doppelwandige Pfeiler mit einer genauen Zentrier-

sion. Combinées avec la mesure automatique des distances, on dispose ainsi de nouvelles possibilités pour la surveillance continue d'ouvrages ou de glissements de terrain à partir du bureau ([4], [5], [6], et annexe n° 1).

Le coût de ces surveillances continues, comme celui de la mise en place des équipements nécessaires et de leur entretien, est élevé. Mais il est tout à fait justifié dans certains cas.

3.3 L'installation du dispositif de mesure

La matérialisation des points fixes et de contrôle dépend de la durée probable de la surveillance. Pour l'observation temporaire d'un ouvrage, on respectera d'autres critères que ceux pour le dispositif d'observation permanente d'un grand barrage.

On doit vouer la plus grande attention à l'installation, qui ne sera confiée qu'avec prudence à la direction du projet ou à l'entrepreneur. Pour la mise en place des dispositifs de centrage sur les piliers et des cibles des points de contrôle, la surveillance par l'ingénieur géomètre est une précaution minimale.

On matérialise en principe les points fixes par un pilier à double paroi et un dispositif de centrage forcé. Ces piliers doivent être ancrés assez profondément pour éviter tout mouvement propre (prévoir éventuellement des repérages excentriques). On peut imaginer d'autres types de matérialisation (console, trépieds, chevilles, etc.). Les observations sont exécutées sur ces piliers (figure 3.7). Aux endroits exposés, il faut prévoir des protections pour les observateurs (par exemple balustrades, toits). L'accès devrait être possible toute l'année sans difficulté. On prévoira aussi les visibilité nécessaires à d'éventuelles observations GPS (voir aussi 4). On veillera enfin à ce que la forme des piliers (hauteur, diamètre) permette une observation confortable. Ces détails ont une grande influence sur l'efficacité du dispositif. Pour la matérialisation des points fixes, on prévoit souvent des cibles de sécurité rapprochées, qui permettent de mettre en évidence de petits déplacements éventuels des piliers par rapport à leur environnement.

Les points de contrôle doivent restituer le mouvement du terrain ou de l'ouvrage à contrôler, quelles que soient les circonstances. Selon leur situation, les points de contrôle peuvent être matérialisés de manière très différente (chevilles contre la paroi aval – figure 3.8 – piliers sur le couronnement, chevilles dans le rocher des appuis,



Figure 3.8. Cheville de centrage, anneau de protection et couvercle.
Bild 3.8. Zentrumsbolzen, Schutzring und Deckel.

vorrichtung. Sie sind so im Untergrund zu verankern, dass sie keine Eigenbewegungen ausführen (evtl. Rückversicherungen). Andere Versicherungsarten (Konsolen, Stative, Bolzen usw.) sind denkbar. Auf diesen Pfeilern wird beobachtet (Bild 3.7). An exponierten Stellen sind daher allenfalls Schutzmassnahmen (z. B. Geländer, Dächer) für die Beobachter vorzusehen. Der ganzjährige Zugang sollte ohne Schwierigkeiten möglich sein und die GPS-Tauglichkeit ist im Auge zu behalten (siehe auch 4.). Im weiteren sollte darauf geachtet werden, dass die Ausgestaltung der Pfeiler (z. B. Höhe, Umfang) ein möglichst bequemes Messen erlaubt. Diese Kleinigkeiten haben einen grossen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Messanlage. Zur Versicherung der Festpunkte gehören oft auch sogenannte Nahversicherungen. Sie dienen dazu, allfällige kleine, lokale Bewegungen der Pfeiler gegenüber der näheren Umgebung festzustellen.

Kontrollpunkte sollten unter allen Umständen die Bewegung des zu kontrollierenden Untergrundes oder Bauwerks wiedergeben. Kontrollpunkte können je nach deren Lage ganz verschieden versichert sein (Mauerbolzen – Bild 3.8 – an der Luftseite, Pfeiler auf der Krone, Bolzen am Fels der Widerlager, Polygonpunkte, Nivellements-punkte usw.). Die zweckmässige Versicherung ist durch den Geodäten von Fall zu Fall festzulegen. Die Zugänglichkeit der Kontrollpunkte bestimmt u. a. die einzusetzenden Messmethoden und Instrumente (Vorwärtseinschnitte auf Mauerbolzen an der Luftseite, Vektoren auf zugängliche Kontrollpunkte). Das Anbringen von festen Reflektoren ohne Zugang ist z. B. wegen der Verschmutzung keine dauerhafte Lösung.



Figure 3.7. Un pilier.
Bild 3.7. Pfeiler.

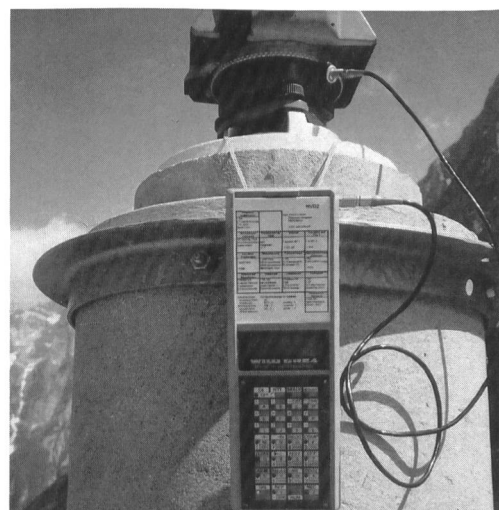


Figure 3.9. Carnet de terrain électronique Wild GRE 4.
Bild 3.9. Datenerfassungsgerät Wild GRE 4.

points de polygone, points de nivellement, etc.). C'est l'ingénieur géomètre qui choisira de cas en cas la matérialisation adéquate. L'accessibilité ou non aux points de contrôle détermine le choix des méthodes et des instruments (intersections pour les cibles du parement aval, vecteurs vers les points de contrôle accessibles). Par exemple, l'installation de réflecteurs permanents sans accès, à cause de leur salissure progressive, n'est pas une solution durable.

3.4 Les observations

Les observations s'organisent selon un canevas préétabli contenant toutes les mesures à effectuer. Il s'est avéré utile lors de la première observation de mesurer tout ce qui était possible ou presque et de réduire les observations au strict nécessaire dès la deuxième ou troisième observation. Les observations doivent aussi respecter d'autres critères tels que la précision par type (angles, distances, etc.). Pour le reste, les observations se déroulent selon les règles éprouvées de la géodésie classique.

D'un dispositif à l'autre, les points suivants prennent une importance particulière:

- hauteur des instruments, des cibles et des réflecteurs au-dessus de la plaque d'embase
- saisie des paramètres atmosphériques (température, pression) et de diverses caractéristiques (intempéries, niveau du lac, etc.)
- éventuelles excentricités des instruments, des cibles et des réflecteurs
- évitement ou élimination d'autres erreurs systématiques

Il est conseillé, si c'est possible, de réutiliser les mêmes instruments sur les mêmes piliers et points de contrôle.

L'exécution d'une mesure terrestre de déformation exige, en plus de la maîtrise des instruments, de l'expérience et une rigueur de travail sans faille. L'organisation des mesures doit permettre la détection et l'élimination immédiate et in situ de fautes éventuelles. Etant donné l'évolution des contraintes agissant sur le barrage (niveau du lac, température), une mesure complémentaire ultérieure n'est généralement plus possible.

Ces contraintes devraient rester constantes pour une époque observée qui peut durer quelques jours. Il faut donc prendre des dispositions avec le service d'exploitation pour le maintien du lac à un niveau constant. Des déformations du barrage pendant les mesures doivent être prises en compte. Le contrôle de la situation du barrage peut exiger la lecture journalière des pendules, voire même l'observation temporaire continue de certaines données (niveau des eaux, température, etc.).

Il est en outre indiqué, au moment d'une mesure terrestre de déformation, d'observer tous les autres dispositifs de mesure, ce qui permet d'obtenir, pour cet instant, une image très complète du comportement du barrage et de confronter les résultats théoriques à la réalité.

Aujourd'hui, la plupart des observations sont enregistrées sur des carnets de terrain électroniques. Il est important d'effectuer un sauvetage journalier de ces données et de contrôler leur structure formelle et leur contenu (fig. 3.9).

3.5 L'exploitation

L'exploitation des mesures terrestres de déformation permet de calculer, à partir des observations géodésiques, les déplacements planimétriques et altimétriques des points de contrôle. Elle a donc une fonction essentielle.

3.4 Messung

Die Messung richtet sich nach einem vor der ersten Messung aufgestellten Netzplan. Darin sind die zu messenden Visuren angegeben. Es hat sich als zweckmässig erwiesen bei der ersten Messung alles – oder fast alles – was möglich ist, zu messen und erst ab der 2. oder 3. Messung den Umfang der Beobachtungen auf das Nötige zu reduzieren. Weitere Randbedingungen für die Beobachtung sind die aufgestellten Genauigkeitskriterien für die einzelnen Beobachtungen (Winkel, Distanzen usw.). Die Messung erfolgt im übrigen nach den bewährten Regeln der klassischen Geodäsie.

Folgende Punkte erhalten je nach Messanlage besondere Bedeutung:

- Höhe der Instrumente, Zielmarken und Reflektoren über dem Instrumentenaufleger
- Erfassung der Atmosphäre (Temperatur, Luftdruck) und der Randbedingungen der Messung (Wetter, Seespiegel)
- allfällige Exzentrizitäten von Instrumenten, Zielmarken und Reflektoren
- Vermeidung oder Elimination anderer systematischer Fehler

Es ist empfehlenswert, wenn immer möglich, das gleiche Instrumentarium auf den gleichen Pfeilern und Kontrollpunkten wieder zu verwenden.

Die Beobachtung einer terrestrischen Deformationsmessung erfordert, neben der Beherrschung der Instrumente, Erfahrung und eine peinlich genaue, sorgfältige Arbeitsweise. Die Messung muss so angelegt sein, dass allfällige Fehler sofort an Ort und Stelle entdeckt und behoben werden können. Wegen der wechselnden Belastungen, die auf die Stauanlage wirken (Wasserspiegel, Temperatur), ist eine spätere Nachmessung in der Regel nicht mehr möglich.

Diese Belastungen sollten für eine Messung, die einige Tage dauern kann, gleich sein. So sind mit dem Betrieb Massnahmen für die Konstanzhaltung des Seespiegels vorzusehen. Verformungen der Staumauer während der Messung sind zu erfassen. Zur Kontrolle der Lage der Stauanlage ist evtl. eine tägliche Ablesung des oder der Lote anzuordnen, oder es ist sogar eine vorübergehende, kontinuierliche Messung von Daten (Wasserstand, Temperatur usw.) angezeigt.

Es ist überdies zweckmässig, zum Zeitpunkt einer terrestrischen Deformationsmessung alle anderen Messeinrichtungen zu beobachten, so dass für diese Zeit ein möglichst vollständiges Gesamtbild des Verhaltens der Stauanlage vorliegt und Vergleiche zwischen Theorie und Wirklichkeit möglich werden.

Viele Messungen werden heute mit Hilfe von Datenerfassungsgeräten registriert. Die tägliche Sicherung dieser registrierten Daten, ihre formale und eigentliche Kontrolle ist von entscheidender Bedeutung (Bild 3.9).

3.5 Auswertung

Mit der Auswertung terrestrischer Deformationsmessungen werden aus geodätischen Beobachtungen in der Regel Lage- und Höhenänderungen der Kontrollpunkte berechnet. Die Auswertung hat daher einen hohen Stellenwert. Sie bedient sich heute der Datenverarbeitung und komplexer Softwaresysteme [8], [9], [16].

Das Kapitel 6 dieser Publikation gibt über die Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit terrestrischer Deformationsmessungen genauer Auskunft.

De nos jours, elle s'appuie sur le traitement des données et sur des systèmes logiciels complexes [8], [9], [16].

Le chapitre 6 de cette publication apporte plus d'informations sur l'exploitation, la précision et la fiabilité des mesures terrestres de déformation.

3.6 Résultats et rapport

La représentation des résultats et le rapport correspondant doivent respecter les exigences du propriétaire de l'ouvrage et/ou des experts. L'objectif fondamental reste toujours l'établissement d'un rapport objectif et complet. Il est déjà souvent arrivé qu'un résultat incohérent et difficile à expliquer soit en réalité le premier signe d'un comportement anormal.

En principe, les déplacements planimétriques et altimétriques sont représentés graphiquement sous la forme de plans (profils, coupes, etc.) et numériquement sous la forme de tableaux. Ceux-ci contiennent toujours les erreurs moyennes ou les ellipses d'erreur permettant leur analyse. Dans certains cas, une représentation des déformations en fonction du temps peut être utile.

Le contenu du rapport doit répondre aux besoins de nombreux lecteurs, par exemple à ceux du propriétaire de l'ouvrage (et à ses collaborateurs administratifs, techniques et juridiques), à ceux de l'ingénieur constructeur, des experts et de l'ingénieur géomètre. Le rapport doit contenir les indications permettant à chacun de remplir sa tâche, ce qui peut conduire à la rédaction de plusieurs textes poursuivant des buts spécifiques. C'est pourquoi une récapitulation est très utile. Le rapport doit contenir entre autres:

- a) le moment de la mesure
- b) les conditions extérieures telles que la cote du lac, la température, les intempéries
- c) l'état des équipements, la dégradation des repères, des extensions, etc.
- d) les instruments utilisés et le nom des observateurs
- e) le volume des mesures et leur déroulement dans le temps
- f) la méthode d'exploitation
- g) les résultats et leur précision
- h) l'analyse géodésique de ces résultats
- i) les annexes

Les données sous d, e et f sont les plus importantes pour l'ingénieur géomètre et facilitent l'exécution de la mesure suivante.

3.7 Perspectives

Les barrages et les dispositifs mis en place pour leur surveillance sont des ouvrages durables. En cinquante ans, le domaine des instruments, des techniques de mesure et des méthodes d'exploitation ont évolué et évolueront encore.

L'attitude réservée et prudente de l'ingénieur géomètre face aux nouveautés s'est souvent révélée utile. Il a fallu attendre plus de dix ans pour que la mesure électronique des distances atteigne la précision nécessaire à la surveillance des barrages.

De nouvelles techniques ne sont acceptables que si on connaît avec sûreté le comportement de leurs erreurs accidentelles et systématiques.

La technique GPS est aujourd'hui admise, mais l'automatisation des mesures réalisera aussi des progrès et son emploi dans le cadre de surveillances permanentes de dangers potentiels augmentera [5]. Par exemple, les développements dans le domaine des pointés automatiques à l'aide de caméras CCD sont rapides [6], [7]. Les

3.6 Resultate und Bericht

Die Darstellung der Resultate und die dazugehörige Berichterstattung richtet sich nach den Anforderungen des Werkeigentümers und/oder des Experten. Aber immer gilt der Grundsatz einer objektiven, vollständigen Berichterstattung. Schon oft hat sich ein zuerst unpassendes und nicht erklärbares Resultat später als erstes Anzeichen eines anomalen Verhaltens erwiesen.

In der Regel werden die Lage- und Höhenänderungen sowohl grafisch in Form von Plänen (Grundriss, Aufriss, Profile usw.) und/oder analytisch in Form von Tabellen dargestellt. Dazu gehören immer auch die mittleren Fehler oder Fehlerellipsen für deren Beurteilung. Gelegentlich ist eine zeitabhängige Darstellung (Verformungen in Funktion der Zeit) erwünscht.

Die Berichterstattung hat die Wünsche verschiedenster Leser zu erfüllen, z. B. des Werkeigentümers (administrative, juristische und technische Mitarbeiter), des Bauingenieurs und Experten und des Geodäten. Jedem sollte der Bericht die für die Erfüllung seiner Aufgabe relevanten Angaben liefern. Das kann zur Abfassung verschiedener Berichte mit verschiedenen Zielsetzungen führen. Recht geeignet erweist sich die Zusammenfassung. Der Bericht umfasst unter anderem:

- a) den Zeitpunkt der Messung
- b) die äusseren Bedingungen wie Staukote des Seespiegels, evtl. Wetter, Temperaturen usw.
- c) den Zustand der Messanlage, Beschädigungen von Fest- und Kontrollpunkten, Erweiterungen usw.
- d) die verwendeten Instrumente und evtl. deren Beobachter
- e) den Umfang und allenfalls den zeitlichen Ablauf der Messung
- f) das Auswerteverfahren
- g) die Resultate und deren Genauigkeit
- h) die geodätische Beurteilung der Resultate
- i) die Beilagen

Die Angaben zu d, e und f sind hauptsächlich für den Geodäten wichtig und erleichtern die nächste Messung.

3.7 Zukunft

Stauanlagen und die zu deren Überwachung erstellten Messsysteme sind langlebige Bauwerke. Im Zeitraum von 50 Jahren hat sich und wird sich auf dem Gebiet der Instrumente, der Messverfahren, aber auch der Auswerteverfahren einiges ändern.

Die von Geodäten bisher eingenommene eher vorsichtige Haltung gegenüber Neuerungen hat sich in der Vergangenheit bewährt. Es bedurfte eines Zeitraums von mehr als 10 Jahren, bis die elektro-optische Distanzmessung die für die terrestrische Deformationsmessung an Stauanlagen nötige Genauigkeit erreichte.

Neue Verfahren sind nur dann tauglich, wenn zuverlässige Aussagen über deren zufällige und systematische Fehler möglich sind.

Bereits heute gelangt das GPS-Verfahren zum Einsatz. Aber auch die Automatisierung wird Fortschritte machen, und die Fälle kontinuierlicher, terrestrischer Überwachungen von latenten Gefahren werden zunehmen [5]. Dabei zeigen die Entwicklungen auf dem Gebiet der Zielerkennung durch CCD-Kameras beachtliche Fortschritte [6], [7]. Auch die Auswerteverfahren werden dazulernen. Andere mathematische Modelle werden erprobt, und Expertensysteme stehen vor der Türe.

méthodes d'exploitation progresseront aussi. On teste déjà de nouveaux modèles mathématiques et les systèmes-experts sont à notre porte.

Mais on doit veiller à ne pas abandonner à ces méthodes automatisées des compétences de décision. Il faut au contraire laisser à l'ingénieur géomètre qualifié le soin d'analyser le résultat de ses mesures, qu'elles soient conventionnelles ou automatisées. C'est lui qui assume la responsabilité de ses résultats, qui participent à la sécurité de nos barrages.

4. Mesure de déformation à l'aide de satellites

Dieter Schneider et Adrian Wiget

4.1 Introduction

Les satellites artificiels sont utilisés depuis plus de 20 ans dans la mensuration pour la détermination de la position des points. Nous disposons aujourd'hui du système de navigation par satellites *Navstar / Global Positioning System (GPS)* [10, 14] du Département américain de la défense, pouvant être utilisé également dans la mensuration technique et industrielle. Un des avantages essentiels de la mensuration par satellites est que l'intervisibilité entre les points du réseau devient caduque. Pour cette raison, le GPS se révèle judicieux pour la surveillance des barrages où la topographie et la forêt empêchent souvent l'extension du réseau. Sans la contrainte d'intervisibilité, nous pouvons choisir avec certitude des points fixes situés en dehors de la zone d'influence du barrage et sur un sol géologiquement stable.

La question essentielle est désormais de savoir si la précision et la fiabilité du GPS sont suffisantes pour l'intégrer dans la surveillance des barrages. La mesure terrestre des déformations permet d'atteindre la précision en position (1 Sigma) de l'ordre de grandeur de 0,3 à 2 mm pour autant que l'on s'appuie sur des points stables. L'exigence pour GPS est ainsi établie.

Divers tests montrent que la précision demandée peut être atteinte avec les précautions nécessaires. Il semble aussi que la solution hybride, c'est-à-dire la combinaison

Aber es sei davor gewarnt, diesen automatisierten und automatischen Verfahren Entscheidungskompetenzen zuzugestehen. Es ist dafür zu sorgen, dass immer – wenigstens bis auf weiteres – der verantwortungsbewusste und qualifizierte Geodät/Ingenieur die kritische Beurteilung seiner konventionellen und automatisierten Bemühungen vornimmt. Er übernimmt ja auch die volle Verantwortung für seine Resultate, die massgeblich zur Sicherheit unserer Stauanlagen beitragen.

4. Satellitengestützte Deformationsmessung

Dr. Dieter Schneider und Adrian Wiget

4.1 Einleitung

Künstliche Erdsatelliten werden seit mehr als 20 Jahren in der Vermessung zur Bestimmung von Lage und Höhe eingesetzt. Mit dem Satelliten-Navigationssystem *Navstar / Global Positioning System (GPS)* [10, 14] des U.S. Verteidigungsdepartements steht heute ein System zur Verfügung, das auch in der Ingenieurvermessung eingesetzt werden kann. Einer der Hauptvorteile der satellitengestützten Vermessung ist, dass zwischen den Punkten des Messnetzes keine Sichtverbindung benötigt wird. Genau deshalb ist GPS geeignet, in der Talsperrenüberwachung eingesetzt zu werden, denn oft begrenzen die Topographie oder vorhandene Wälder die Ausdehnung des Messnetzes. Ist man nicht auf Sichtverbindungen angewiesen, können die Festpunkte so gewählt werden, dass sie mit Sicherheit ausserhalb des Einflussbereichs der Stauhaltung und auf stabilem geologischem Untergrund liegen.

Die Kernfrage ist nun, ob die erreichbare Genauigkeit und Zuverlässigkeit ausreicht, um GPS in die Talsperrenüberwachung zu integrieren. In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass die terrestrische Verformungsmessung, wenn sie sich auf stabile Festpunkte abstützen kann, Lagegenauigkeiten (1 Sigma) in der Grössenordnung von 0,3 bis 2 mm erreicht. Damit ist die Anforderung an GPS festgelegt.

Verschiedene Testversuche zeigen, dass die vorstehende Zielvorgabe erfüllt werden kann, wenn angemessen gearbeitet wird. Es scheint auch, dass die hybride Lösung, d.h. die Kombination zwischen satellitengestützter und terrestrischer Deformationsmessung, die zweckmässigste Lösung darstellt.

Das Bundesamt für Landestopographie (L+T) begann bereits Mitte der achtziger Jahre mit Tests und praktischen Anwendungen der satellitengestützten Vermessung mit Hilfe von GPS. Anlässlich der Netzerweiterungen 1989 der geodätischen Überwachungsnetze der Staumauern in den Schlagen (Etelzwerke) und Schiffenen (Entreprises Electriques Fribourgeoises, EEF) hat die L+T in Zusammenarbeit mit den Kraftwerken und den verantwortlichen Experten die satellitengestützte Messmethode erstmals in der Schweiz für die Überwachung von Stauanlagen eingesetzt [17]. Dabei wurden die bisherigen terrestrischen Messungen aber nicht ersetzt, sondern durch GPS-Messungen ergänzt. In der Zwischenzeit liegen im Netz Schiffenen bereits Resultate von mehreren Wiederholungsmessungen über drei Jahre vor, welche eine Beurteilung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Anwendung erlauben. In den folgenden Jahren hat die L+T auch in den Überwachungsnetzen Montsalvens und Rossens (beide EEF) sowie Griessee und Lago del Naret (beide Maggia Kraftwerke AG) Erweiterungen mit GPS erfolg-

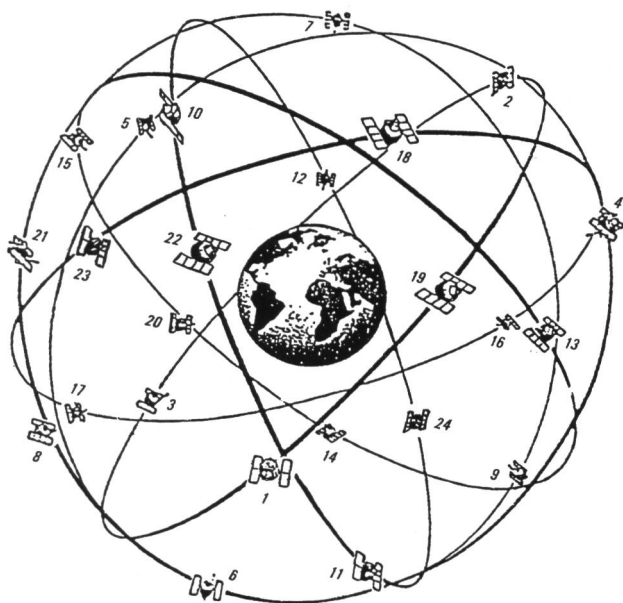


Figure 4.1. Constellation des satellites GPS (achèvement 1993).
Bild 4.1. Konstellation der GPS-Satelliten (Endausbau 1993).