

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
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: 07.03.2026

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

*Comité national suisse des
grands barrages
Groupe de travail observation des
barrages*

*Mesures de déformation
géodésiques et
photogrammétriques
pour la surveillance des
ouvrages
de retenue*

*Préparé pour les journées d'études des 16 et 17
septembre 1993, Broc (FR)*

*Schweizerisches Nationalkomitee
für grosse Talsperren
Arbeitsgruppe
Talsperrenbeobachtung*

*Geodätische und
photogrammetrische
Deformationsmessung
für die Überwachung der
Stauanlagen*

*erarbeitet für die Fachtagung
vom 16. und 17. September 1993 in Broc (FR)*

Groupe de travail/Arbeitsgruppe

Dr. Aeschlimann, Heinz
Veramess Engineering, 5000 Aarau

Ammann, Eduard
AG Ingenieurbüro Maggia, 6601 Locarno

Dr. Biedermann, Rudolf
Bundesamt für Wasserwirtschaft, 3001 Bern

Prof. Carosio, Alessandro
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie,
ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Dupraz, Hubert
Département du génie rural et géomètres,
EPFL Ecublens, 1015 Lausanne

Egger, Kurt
Ingenieurbüro Schneider AG, 7000 Chur

Flotron, André
Ingenieurbüro A. Flotron AG, 3860 Meiringen

Dr. Frei, Erwin
Leica Heerbrugg AG, 9435 Heerbrugg

Meier, Urs
Vermessungsbüro U. Meier, 6648 Minusio

Müller, Rudolf W.
Bundesamt für Wasserwirtschaft, 3001 Bern

Ryf, Adrian
Vermessungsbüro U. Meier, 6648 Minusio

Dr. Schneider, Dieter
Bundesamt für Landestopographie, 3084 Wabern

Venzin, Christian
Nordostschweizerische Kraftwerke AG, 5401 Baden

Wiget, Adrian
Bundesamt für Landestopographie, 3084 Wabern

Contenu

	Page
1 Introduction	183
2 Surveillance des retenues	184
2.1 Généralités	184
2.2 Surveillance des déformations du barrage, de ses fondations et de ses environs	187
2.3 Surveillance des zones de terrain critiques	193
3 Mesures terrestres de déformation	195
3.1 Introduction	195
3.2 La conception du réseau	195
3.3 L'installation du dispositif de mesure	200
3.4 Les observations	201
3.5 L'exploitation	201
3.6 Résultats et rapport	202
3.7 Perspectives	202
4 Mesure de déformation à l'aide de satellites	203
4.1 Introduction	203
4.2 Mensuration exacte avec GPS	204
4.3 Concept des réseaux de surveillance des barrages; projet de canevas	205
4.4 Planification et réalisation des mesures GPS	207
4.5 Calcul GPS et analyse des résultats	208
4.6 Compensation globale des mesures GPS et terrestres	209
4.7 Résumé et perspectives	210
5 Mesure photogrammétrique des déformations	211
5.1 Introduction	211
5.2 Bases géométriques et données techniques relatives aux appareils	211
5.3 Particularités de la technique de mesure photogrammétrique	211
5.4 Méthodes de mesure photogrammétriques et leur précision	212
5.5 La photogrammétrie utilisée pour la surveillance des ouvrages de retenue	214
6 Exploitation, précision et fiabilité	216
6.1 Principes et buts des mesures géodésiques de déformation et de leur analyse	216
6.2 Evolution des méthodes d'exploitation	217
6.3 Modèles mathématiques	217
6.4 La méthode des moindres carrés	218
6.5 Précision et fiabilité	219
6.6 Préanalyses lors de la conception de dispositifs géodésiques	221
6.7 Compensation époque par époque	221
6.8 L'analyse des différences relatives de position et d'altitude	223
6.9 Perspectives	224
Annexes	
No. 1 Mesures automatiques	225
Nr. 2 GPS – mesure rationnelle dans un domaine de précision centimétrique	234
Nr. 3 Prévention et correction des influences d'erreurs systématiques du GPS	238
Nr. 4 Exemples de mesures GPS	240
Littérature	242
Adrian Ryf: Der Einsatz von GPS zur Talsperrenüberwachung am Beispiel Naret	243

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	183
2 Überwachung der Stauanlagen	184
2.1 Allgemeines	184
2.2 Überwachung des Verformungsverhaltens der Talsperre, ihres Untergrunds und des Umgeländes	187
2.3 Überwachung kritischer Geländepartien	193
3 Terrestrische Deformationsmessung	195
3.1 Einleitung	195
3.2 Das Projekt	195
3.3 Installation der Messanlage	199
3.4 Messung	201
3.5 Auswertung	201
3.6 Resultate und Bericht	202
3.7 Zukunft	202
4 Satellitengestützte Deformationsmessung (GPS)	203
4.1 Einleitung	203
4.2 Genaue Vermessung mit GPS	204
4.3 Einsatzkonzept für Überwachungsnetze von Stauanlagen; Netzentwurf	205
4.4 Planung und Durchführung der GPS-Messungen	207
4.5 GPS-Auswertungen und Beurteilung der Resultate	208
4.6 Gesamtausgleichung von GPS und terrestrischen Messungen	209
4.7 Zusammenfassung und Ausblick	210
5 Photogrammetrische Deformationsmessung	211
5.1 Einleitung	211
5.2 Geometrische und geodätische Grundlagen	211
5.3 Eigenheiten der photogrammetrischen Messtechnik	212
5.4 Photogrammetrische Messmethoden und ihre Genauigkeit	212
5.5 Die Photogrammetrie als Messmethode zur Talsperrenüberwachung	214
6 Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit	216
6.1 Grundzüge und Ziele der geodätischen Deformationsmessung und -analyse	216
6.2 Entwicklung der Auswertungsmethoden	217
6.3 Mathematische Modelle	217
6.4 Methode der kleinsten Quadrate	218
6.5 Genauigkeit und Zuverlässigkeit	219
6.6 Präanalysen in der Planung geodätischer Messanordnungen	221
6.7 Auswertung nach jeder Messung	221
6.8 Analyse von relativen Lage- und Höhendifferenzen	223
6.9 Perspektiven	224
Anlagen	
Nr. 1 Automatische Messungen	225
Nr. 2 Rationelles Vermessen mit dem GPS im Zentimeterbereich	234
Nr. 3 Vermeidung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen bei GPS	238
Nr. 4 Beispiele von GPS-Messungen	240
Literatur	242
Adrian Ryf: Der Einsatz von GPS zur Talsperrenüberwachung am Beispiel Naret	243

1. Introduction

Rudolf Biedermann

Lorsque le contrôle systématique du comportement des barrages a débuté dans les années 1920, le suivi de la déformation d'un barrage n'était pratiquement possible qu'à l'aide de la géodésie. La mesure des déformations à l'aide de la géodésie a tout d'abord perdu de son importance avec le développement d'appareils de mesure mécaniques (tel que le pendule par exemple) parce qu'elle est complexe et ne peut être réalisée que par des spécialistes. Son utilisation à intervalles réguliers, par exemple mensuellement, n'est pratiquement pas possible. Le fait qu'elle soit mal adaptée aux conditions hivernales, ce qui peut conduire à une interruption des mesures de six mois en montagne, a également contribué au déclin de son utilisation.

Alors que la mesure des déformations à l'aide de la géodésie n'est toujours pas très répandue à l'étranger, elle n'a jamais été abandonnée en Suisse et elle est même fortement encouragée depuis 20 ans car elle permet de réaliser un système de mesures étendu. Cela permet d'établir aussi bien les déformations «absolues» que d'intégrer le comportement des environs immédiats. Cet aspect sera traité de manière plus détaillée au chapitre 2.

La précision des mesures a pu être fortement améliorée grâce aux développements dans le domaine des mesures de déformation terrestres et à l'introduction des mesures de distance électro-optiques. Ce que cela implique est présenté au chapitre 3. On est cependant toujours restreint par le fait que les mesures de distance électro-optiques nécessitent une relation visuelle entre les points fixes et les points de contrôle. La topographie et la présence de forêts empêchent souvent un déploiement optimal du réseau de mesures. La mesure des déformations par satellites (GPS) peut être utilisée avantageusement dans ce cas, la précision atteinte étant actuellement du même ordre de grandeur que celle des mesures de déformation terrestres. Cette nouvelle possibilité, qui permet le déploiement de réseaux de mesures hybrides, est décrite au chapitre 4.

La mesure des déformations à l'aide de la géodésie peut également être engagée dans la surveillance de la déformation de pentes instables ou de blocs rocheux ainsi que de glaciers critiques (section 2.3). Des mesures de déformation par photogrammétrie peuvent également être utilisées dans ces cas. Cette technique est de ce fait également traitée au chapitre 5.

Le développement dans le domaine informatique a contribué à l'augmentation de la précision des mesures de déformation par géodésie et par photogrammétrie, de manière similaire à la contribution due au développement d'appareils de mesure de distances très précis. Des calculs de compensation inconcevables dans le passé sont aujourd'hui possibles grâce à l'utilisation d'ordinateurs performants. C'est pourquoi ce rapport traite également de la question de l'interprétation des mesures au chapitre 6.

L'automatisation des mesures de déformation par géodésie n'est jusqu'à présent pas une pratique courante. Jusqu'à récemment, cela n'aurait en fait pas été réalisable. Cela pourrait changer dans le futur au vu des progrès effectués, en particulier en ce qui concerne la surveillance de pentes critiques. C'est pourquoi les mesures automatisées sont mentionnées dans l'annexe 1.

Finalement, rappelons que le rapport du Comité national «Dispositif d'auscultation des barrages» [1] traite également des mesures géodésiques de déformation.

1. Einleitung

Rudolf Biedermann

Die Überwachung des Verformungsverhaltens von Talsperren war, als in den 1920er Jahren mit der systematischen Verhaltenskontrolle begonnen wurde, praktisch nur mit Mitteln der Vermessung möglich. Mit der Entwicklung mechanischer Messgeräte (wie z. B. Lote) verlor die geodätische Deformationsmessung vorerst etwas an Bedeutung, weil sie aufwendig ist und nur von Spezialisten ausgeführt werden kann. Ein Einsatz in kurzen Zeitabständen, wie z. B. monatlich, ist kaum realisierbar. Ein weiterer Grund war sicher auch die schlechte Wintertauglichkeit, die im Gebirge bis zu einem halbjährigen Messunterbruch führen kann.

Während die geodätische Deformationsmessung im Ausland nach wie vor nicht sehr verbreitet ist, ist sie in der Schweiz nie aufgegeben worden und wird seit 20 Jahren sogar stark gefördert, weil mit ihrer Hilfe räumliche Messsysteme aufgebaut werden können. Dies erlaubt sowohl die Bestimmung «absoluter» Verformungen als auch den Einbezug des Verhaltens des Umgeländes. Darauf wird in Kapitel 2 näher eingetreten.

Dank der intensiven Auseinandersetzung mit der terrestrischen Deformationsmessung und der Einführung der elektrooptischen Distanzmessung gelang es, die Messgenauigkeit sehr stark zu verbessern. Was es dazu braucht, wird in Kapitel 3 dargelegt. Eingeschränkt ist man aber nach wie vor durch den Umstand, dass die terrestrische Deformationsmessung Sichtverbindung zwischen den Festpunkten und den Kontrollpunkten benötigt. Das Messnetz kann wegen der Topographie und vorhandener Wälder deshalb oft nicht optimal gestaltet werden. Diesbezüglich kann die satellitengestützte Deformationsmessung (GPS) Abhilfe schaffen, nachdem die erreichbare Genauigkeit jetzt in der gleichen Grössenordnung wie jene der terrestrischen Deformationsmessung liegt. Diese neue Möglichkeit, die den Aufbau von hybriden Messnetzen erlaubt, wird in Kapitel 4 beschrieben.

Weil nötigenfalls auch instabile Talhänge oder Felspartien sowie kritische Gletscher hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens zu überwachen sind, kann die geodätische Deformationsmessung auch diesbezüglich Unterstützung bieten (Abschnitt 2.3). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die photogrammetrische Deformationsmessung einzusetzen. Es wird deshalb in Kapitel 5 auch dieses Verfahren behandelt.

Analog wie die Entwicklung hochpräziser Distanzmessgeräte hat auch die Entwicklung im Informatikbereich Anteil an der Steigerung der Genauigkeit der geodätischen und photogrammetrischen Deformationsmessung. Dank leistungsfähigen Rechnern sind heute Ausgleichsrechnungen möglich, die früher undenkbar waren. Der Bericht geht deshalb in Kapitel 6 auch auf die Frage der Auswertung ein.

Bisher hat sich eine Automatisierung geodätischer Deformationsmessungen nicht aufgedrängt. Es wäre dies bis vor kurzem auch kaum zu verwirklichen gewesen. Dank der gemachten Fortschritte ist es aber durchaus denkbar, dass sich dies ändern könnte, wobei in erster Linie an Einsätze zur Überwachung kritischer Geländepartien gedacht wird. In Anhang 1 wird deshalb auch auf das automatische Messen eingetreten.

Schliesslich sei noch darauf hingewiesen, dass im Bericht des Nationalkomitees über «Messanlagen zur Talsperrenüberwachung» [1] die geodätische Deformationsmessung ebenfalls behandelt wird.

2. Surveillance des retenues

R. Biedermann (2.1 et 2.2) et Christian Venzin (2.3)

2.1 Généralités

La surveillance fait partie du concept de sécurité. A cet égard, il est tout d'abord indispensable que le dimensionnement du barrage soit correct et prenne en compte les dangers spécifiques pour tous les cas de charge et d'exploitation. De cette manière, le risque sera minimisé de façon optimale, tout en restant économiquement justifié (figure 2). Exclure entièrement le risque n'est pas pensable. C'est la raison pour laquelle le recours à des mesures complémentaires est nécessaire pour maîtriser le mieux possible le risque résiduel. Dans ce sens, des contrôles adaptés et des préparatifs pour les cas d'urgence sont requis: des contrôles adaptés dans le but de mettre en évidence une menace le plus rapidement possible, des préparatifs pour les cas d'urgence afin de pouvoir agir de manière prompte et appropriée face à une menace avérée.

Comme des menaces peuvent avoir des origines distinctes¹, on a recours à différentes méthodes pour mettre en évidence tout danger potentiel. Elles font appel tant aux contrôles visuels qu'aux essais de fonctionnement

¹ Dégâts significatifs au barrage ou à ses ouvrages annexes, défaut relatif à la sécurité constructive, déformations et déplacements anormaux au niveau de la structure ou du soubassement, augmentation des pressions intersticielles ou des sous-pressions, accroissement des venues d'eau, pente, rocher ou glacier instables dans la zone de la retenue.

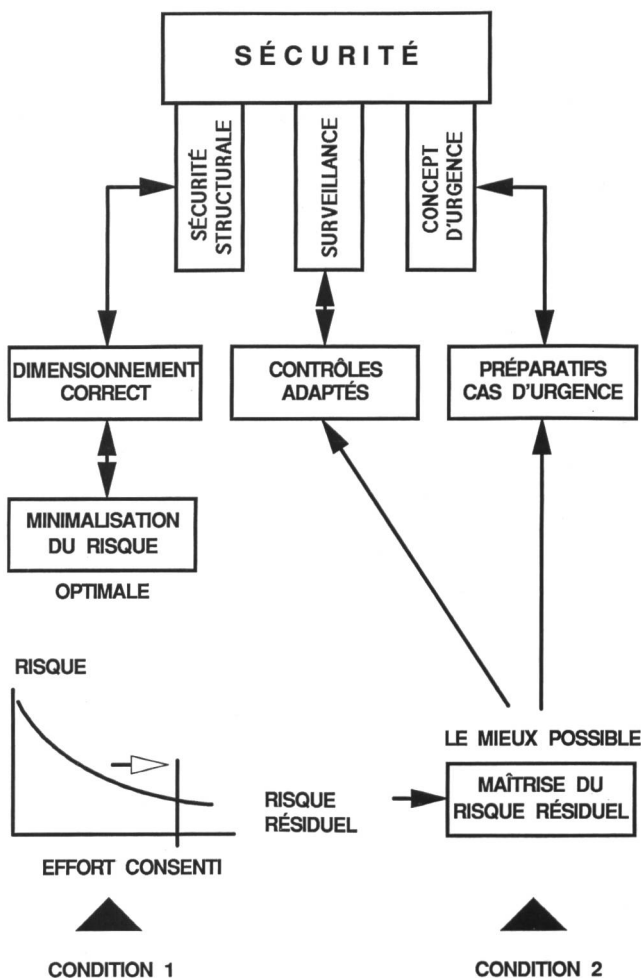


Figure 2.1. Concept pour la sécurité des barrages.

2. Überwachung der Stauanlagen

R. Biedermann (2.1 und 2.2) und Christian Venzin (2.3)

2.1 Allgemeines

Die Überwachung ist Teil des Sicherheitskonzepts. Dieses verlangt vorerst einmal, dass das Absperrbauwerk unter Beachtung des speziellen Gefahrenpotentials für alle möglichen Last- und Betriebsfälle korrekt bemessen ist. Damit wird das Sicherheitsrisiko der Stauanlage so weitgehend minimiert, als dies wirtschaftlich noch verantwortbar ist (Bild 2.1). Ganz ausschliessen kann man es nicht. Es muss deshalb durch zusätzliche Massnahmen dafür gesorgt werden, dass das verbleibende Restrisiko bestmöglich beherrscht werden kann. Dies verlangt zielkonforme Kontrollen und Notfallvorbereitungen: zielkonforme Kontrollen im Hinblick auf ein frühestmögliches Erkennen einer Gefährdung der Sicherheit, Notfallvorbereitungen im Hinblick auf die sach- und zeitgerechte Beherrschung einer erkannten Gefährdung.

Weil Gefährdungen unterschiedliche Ursachen haben können¹, braucht es unterschiedliche Methoden, um alle potentiellen Gefährdungen erkennen zu können. Sie reichen von visuellen Kontrollen über Funktionsproben bis

¹ Bedeutendere Schäden an der Talsperre oder an Nebenanlagen, Mangel bezüglich der konstruktiven Sicherheit, anomale bleibende Verformung oder Verschiebung entweder der Struktur oder des Untergrunds, Anstieg der Porenwasserspannungen oder der Auftriebsdrücke, verstärkte Durchsickerung, instabiler Hang, Fels oder Gletscher im Bereich der Stauhaltung.

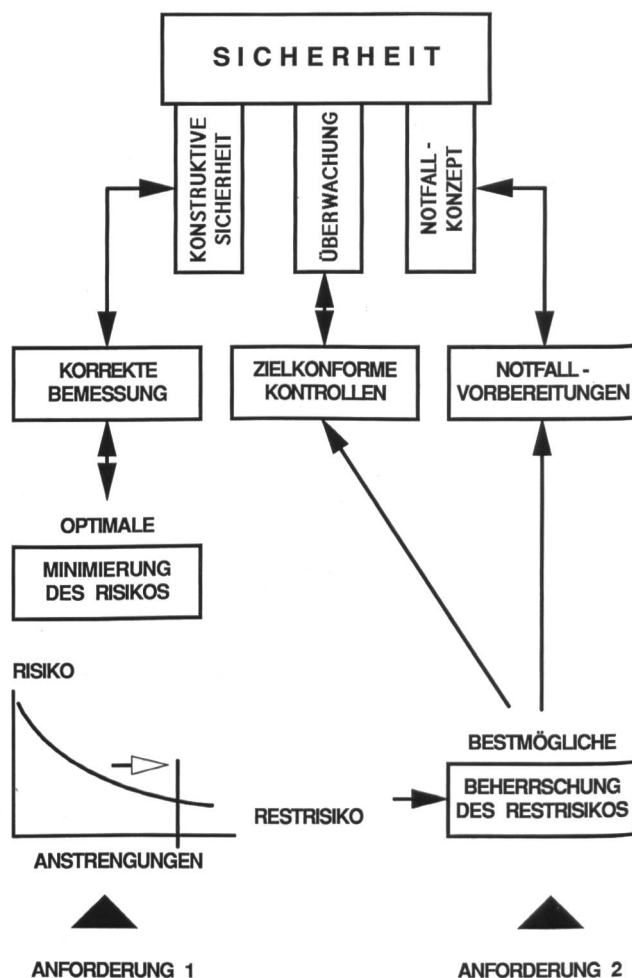


Bild 2.1. Sicherheitskonzept für die Talsperren.

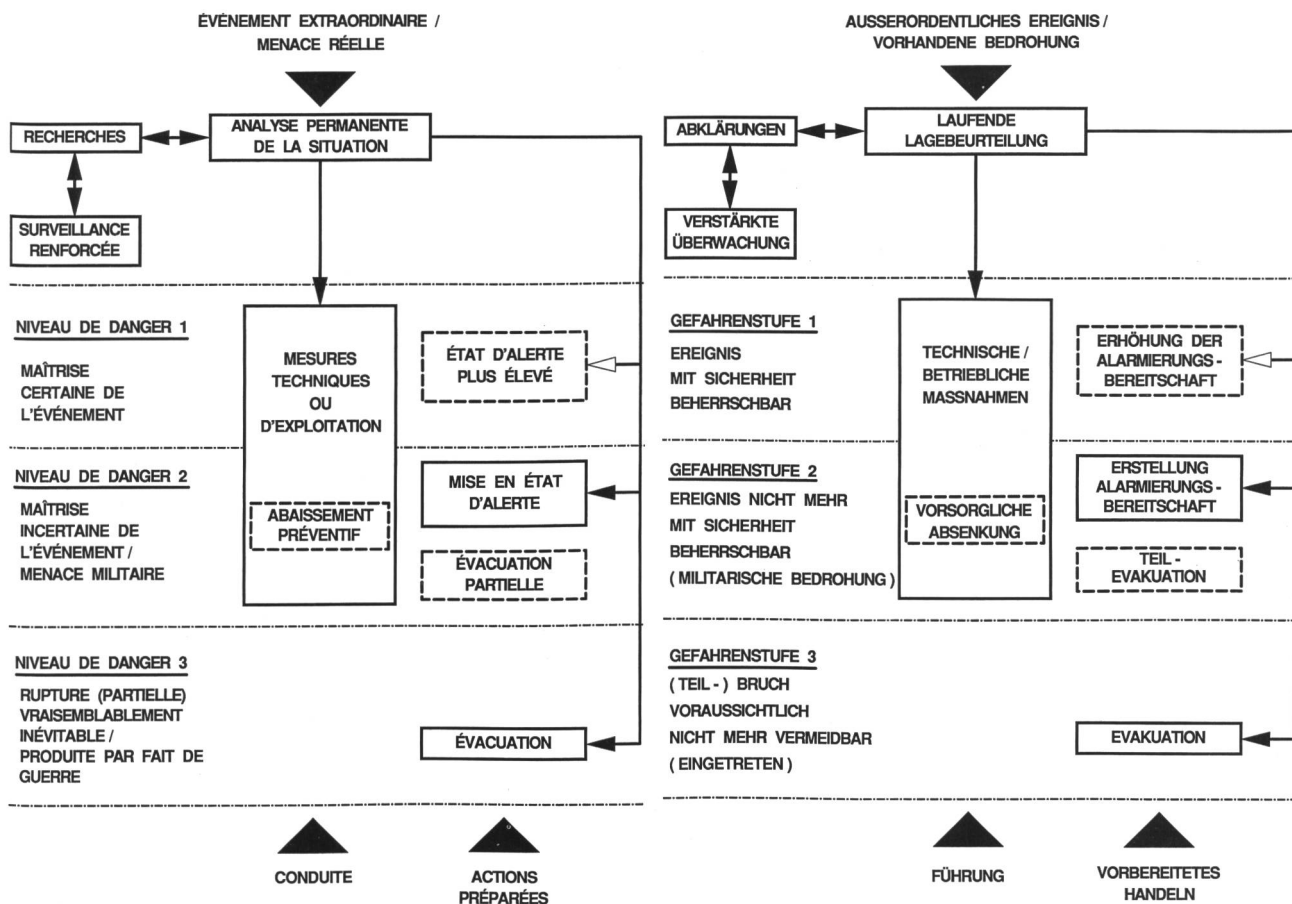


Figure 2.2. Niveaux de danger et leur traitement lors du déclenchement d'un événement extraordinaire.

Bild 2.2. Gefahrenstufen und ihre Behandlung bei Eintritt eines ausserordentlichen Ereignisses.

des vannes, aux mesures des paramètres de comportement, ainsi qu'à l'examen de la sécurité structurale. La fréquence des mesures doit aussi être fixée de manière adéquate et va, le cas échéant, de la mesure quotidienne (saisie des paramètres de comportement les plus importants) jusqu'à une cadence de 5 ans (examen de la sécurité).

Si, lors de la surveillance, une menace devait être mise en évidence, il s'agit de mettre en œuvre le plus rapide-

zum Messen von Verhaltensgrössen und zur Überprüfung der konstruktiven Sicherheit. Auch die Frequenz der Ausführung ist zielkonform festzulegen und reicht von möglicherweise täglich (Erfassung der wichtigsten Verhaltensindikatoren) bis zu einer Kadenz von 5 Jahren (Vornahme der Sicherheitsüberprüfung).

Wird anhand der Überwachung eine Gefährdung erkannt, ist raschestmöglich für Abhilfe zu sorgen. Dafür muss die Ursache bekannt sein, weil nur bei genauer Kenntnis der Ursache sach- und zeitgerecht gehandelt werden kann. Ebenso wichtig ist es, zu wissen, in welcher der drei unterschiedenen Gefahrenstufen man sich befindet (Bild 2.2), weil erhöhte Gefahren besondere Massnahmen erfordern wie die partielle oder totale Absenkung des Stauspiegels, die Erstellung der Alarmierungsbereitschaft oder – als letzte aller Möglichkeiten – die Evakuierung der bedrohten Bevölkerung.

Ist eine Verhaltensanomalie festgestellt, werden sowohl für die Ursachenabklärung als auch für die laufende Lagebeurteilung (Bild 2.2) Messdaten benötigt, und zwar erheblich mehr als für das Erkennen der Anomalie. Die Messkonzepte müssen dieser Sachlage Rechnung tragen. Einerseits müssen sie jene Messeinrichtungen umfassen, die die repräsentativen Verhaltensgrössen auf möglichst einfache und trotzdem zuverlässige Art zu erfassen vermögen. Andererseits müssen sovieler zusätzliche Messdaten erfassbar sein, dass das Verhalten der Sperre, ihres Untergrunds und des Umfelds genügend differenziert analysiert werden kann, um die Ursache einer festgestellten Anomalie erkennen zu können.

Genügt für die laufende Beurteilung des Verformungsverhaltens einer Staumauer im wesentlichen die Kenntnis

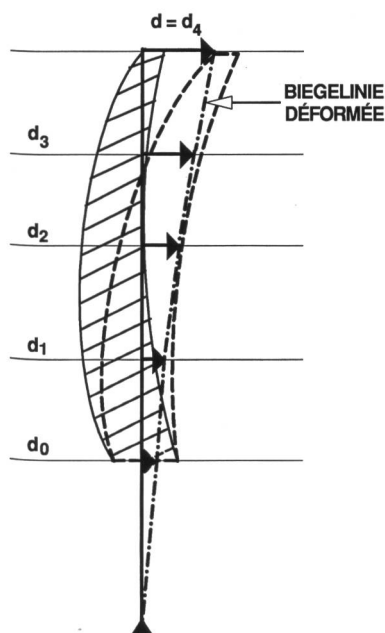


Figure 2.3. Déformation d'un barrage-voûte chargé. Détermination de la déformée sur la base des mesures des déplacements d_0 à d_4 à différentes élévations.

Bild 2.3. Verformung einer Bogenmauer unter Belastung. Ermittlung der Biegelinie aufgrund der Verschiebungsmessungen d_0 bis d_4 auf verschiedenen Höhenlagen.

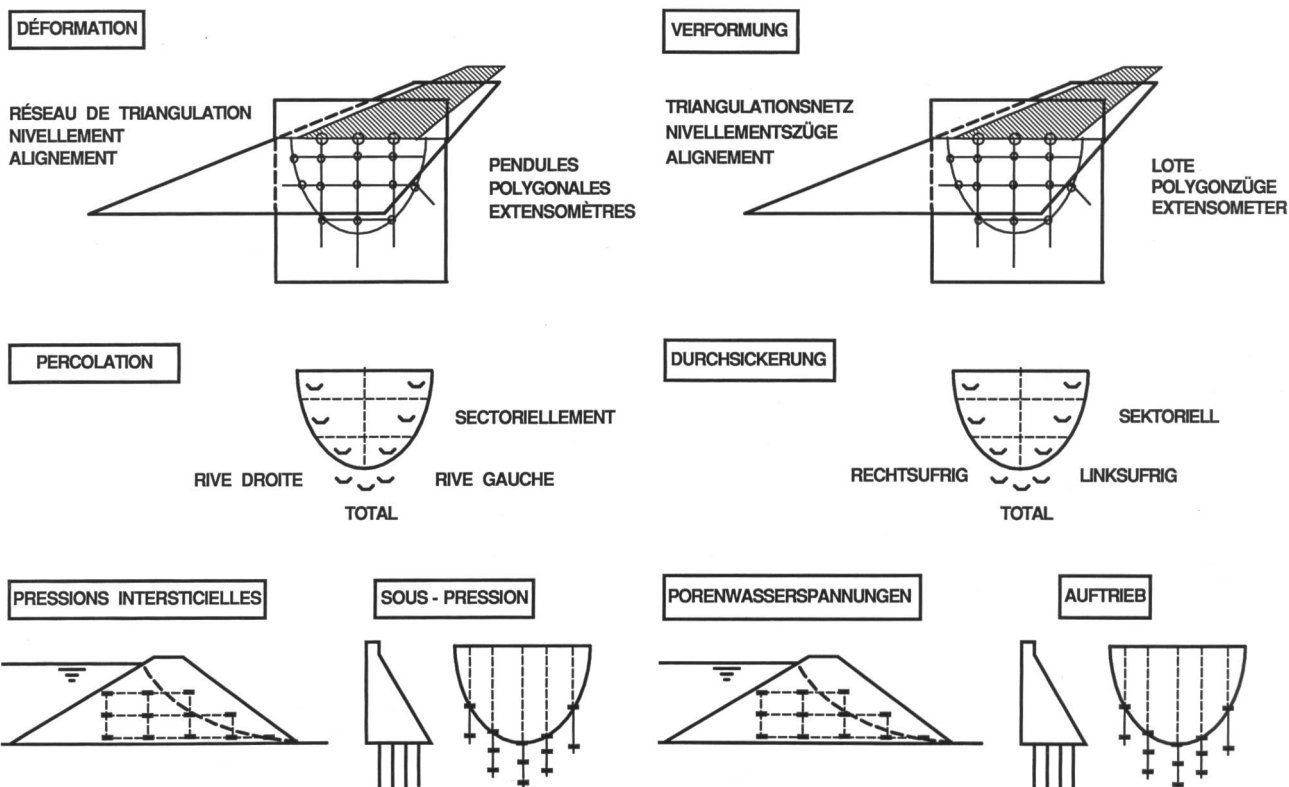


Figure 2.4. Les dispositifs d'auscultation des barrages doivent être conçus de telle manière que les déformations, les débits de percolation et les pressions d'eau puissent être obtenus dans le barrage et dans sa fondation.

Bild 2.4. Messeinrichtungen zur Talsperrenüberwachung müssen so konzipiert sein, dass sie Verformungen, Durchsickerungen und Wasserdrücke in der Talsperre und ihrer Fundation erfassen können.

ment possible les mesures adéquates pour maîtriser l'événement. Pour cela, la cause doit être connue, car il n'est pas possible d'agir de manière prompte et appropriée sans en avoir une bonne connaissance. Il est aussi important de savoir face auquel des 3 niveaux distincts de danger on se trouve (figure 2.2), car des menaces de degré plus élevé exigent des mesures particulières, comme l'abaissement partiel ou total de la retenue, la mise en place de l'état d'alerte du système alarme-eau ou – comme tout dernier recours – l'évacuation de la population menacée.

Si un comportement anormal est constaté, il est essentiel de disposer de résultats de mesure en vue de rechercher l'origine de la menace d'une part et de procéder à l'analyse permanente de la situation d'autre part (figure 2.2); ces éléments doivent être disponibles en plus grand nombre que ceux nécessaires pour la seule détection d'une anomalie. Par conséquent, le dispositif d'auscultation doit être conçu de manière adéquate. D'une part, il doit englober tout système de mesure qui permette de saisir les paramètres représentatifs du comportement de façon simple mais toutefois fiable. D'autre part, suffisamment de données complémentaires doivent pouvoir être rassemblées afin que le comportement du barrage, de ses appuis et de ses environs puissent être analysés de manière détaillée.

Pour le suivi régulier des déformations d'un barrage, il est suffisant de connaître les déplacements radiaux en un ou plusieurs points au niveau du couronnement (figure 2.3). Par contre, lors de l'analyse d'un comportement anormal, il est de plus utile de connaître une ou plusieurs déformées. Ceci implique de placer les stations de mesure à plusieurs niveaux. Si un éventuel déplacement (radial, tangentiel), un basculement ou un tassement du barrage, de même que des déformations dans ses environs

der radialen Verschiebung der Krone d an einer oder mehreren Stellen (Bild 2.3), wird für die Ursachenabklärung und die Behandlung eines ausserordentlichen Ereignisses im Minimum auch die Biegelinie benötigt. Dies bedeutet, dass Messmöglichkeiten auf verschiedenen Höhen eingerichtet sein müssen. Sollen auch eine allfällige Verschiebung (radial, tangential), Kippung oder Setzung der Talsperre sowie Verformungen im Umland erkennen sein, braucht es letztlich ein dreidimensionales Messsystem, wie dies in Bild 2.4 oben dargestellt ist.

Ähnliches gilt bezüglich der Durchsickerung. Für die laufende Verhaltensüberwachung genügt in der Regel das Total der Sickerwassermenge, und zwar einschliesslich allfälliger Drainagewassermengen. Zeigt dieses Total unerwartete Abweichungen, muss das Drainagewasser separat und das Sickerwasser sektoriell gemessen werden können. Nur so wird feststellbar, wo sich das Verhalten geändert hat.

Nicht in dieses Schema passt die Erfassung von Porenwasserspannungen. Weil diese Drücke sehr stark von lokalen Gegebenheiten abhängig sind, gibt es keine repräsentativen Indikatoren. Es müssen folglich bereits bei der laufenden Überwachung alle Messdaten erhoben werden.

Die Messeinrichtung einer Talsperre sollte folglich etwa so konzipiert sein, wie dies in Bild 2.4 schematisch dargestellt ist. Wichtige Verhaltensinformationen liefern auch talseitige Quellen. Sie sind deshalb ebenso in das Messkonzept einzubeziehen, wie die Grössen, die die Belastungen erfassen. Schliesslich müssen auch instabile Hänge, Felspartien oder Gletscherzungen, die in die Stauhaltung fallen könnten, mittels Messeinrichtungen geeignet überwacht werden.

Wenn bezüglich der Messeinrichtungen von Stauanlagen auch klar zwischen Einrichtungen zur laufenden Verhal-

devaient être mis en évidence, il est essentiel de disposer d'un dispositif de mesure spatial, tel qu'il est représenté dans la partie supérieure de la figure 2.4.

La même philosophie est valable pour la percolation. Pour la surveillance permanente de son évolution, la connaissance du débit total des infiltrations, englobant aussi toutes les eaux éventuelles de drainage est suffisante. Si l'on devait constater une variation inhabituelle de ce total, les eaux de drainage doivent pouvoir être mesurées de façon individuelle et les infiltrations de façon sectorielle. De cette seule manière, il est possible de localiser la modification du débit.

L'observation des pressions interstitielles ne s'inscrit pas dans ce schéma. Comme ces pressions dépendent fortement des conditions locales, il n'y a pas de paramètre représentatif. En conséquence, toutes les mesures doivent être effectuées dans le cadre de la surveillance permanente.

Le dispositif d'auscultation d'un barrage doit donc être conçu comme l'indique schématiquement la figure 2.4. Les sources à l'aval donnent aussi des informations importantes. Elles doivent par conséquent être englobées dans le concept de mesure de même que les valeurs relatives aux charges. Enfin, les pentes, les zones rocheuses et les langues de glaciers instables, qui pourraient glisser dans la retenue, doivent également être surveillées par des moyens adéquats.

Si, au niveau du dispositif d'auscultation, l'on doit faire une nette distinction entre l'installation prévue pour la surveillance permanente et celle nécessaire pour l'explication de l'origine d'une anomalie constatée, cela ne signifie pas que cette dernière ne doit pas être utilisée tant que le barrage se comporte normalement. Une telle attitude serait erronée pour deux raisons. Premièrement, dans le cas d'un comportement anormal constaté (ou supposé), il faut pouvoir faire des recoupements avec le comportement normal qui prévalait antérieurement. Ceci fixe la périodicité de toutes les mesures disponibles (soit au moins 1 fois tous les 5 ans). Deuxièmement, il serait regrettable d'ignorer l'ensemble des données qui peuvent être saisies. Elles permettent une analyse plus détaillée du comportement, à effectuer périodiquement, c'est-à-dire pour le moins à l'occasion de chaque expertise quinquennale.

2.2 Surveillance des déformations du barrage, de ses fondations et de ses environs

Comme la géodésie permet de déterminer la position et l'altitude de points et ceci dans un système de coordonnées défini, elle peut donc être employée pour la surveillance des déformations d'ouvrages ou de zones de terrains. En particulier, grâce à son aide, il est possible de mettre en place des dispositifs de mesure à deux ou trois

tensüberwachung und solchen zur Ursachenabklärung im Falle einer festgestellten Anomalie unterschieden wird, heisst dies nicht, dass die Einrichtungen zur Ursachenabklärung solange nicht benützt werden, als sich die Talsperre normal verhält. Ein solches Verhalten wäre aus zwei Gründen falsch. Zum einen müssen im Falle einer festgestellten (oder vermuteten) Verhaltensanomalie Querbezüge zum vorher ungestörten Verhalten gemacht werden können. Dies setzt periodische Messungen aller erfassbaren Messgrössen voraus (und zwar wenigstens einmal pro 5 Jahre). Zum anderen wäre es unverantwortbar, die zusätzlich erfassbaren Messdaten völlig unbeachtet zu lassen. Sie ermöglichen eine wesentlich detailliertere Verhaltensbeurteilung, was wenigstens von Zeit zu Zeit, d.h. anlässlich der Fünfjahresexperten, genutzt werden sollte.

2.2 Überwachung des Verformungsverhaltens der Talsperre, ihres Untergrunds und des Umgeländes

Weil mit Hilfe der Vermessung die Lage und die Höhe von Punkten bestimmt werden kann, und zwar bezogen auf ein vorgegebenes Koordinatensystem, ist sie geeignet, bei der Überwachung des Verformungsverhaltens von Bauten oder Geländepartien eingesetzt zu werden. Insbesondere können mit ihrer Hilfe die benötigten ein-, zwei- und dreidimensionalen Messsysteme aufgebaut werden, die die Aussagekraft der Überwachung erheblich steigern und überdies hochwillkommene Redundanzen enthalten. Man tut deshalb gut daran, die Möglichkeiten der Vermessung zu nutzen. Oft ist dies sogar unumgänglich, und zwar immer dann, wenn mechanische Messeinrichtungen nicht oder nur mit unverhältnismässig hohen Installationskosten einsetzbar sind, wie dies bei Staudämmen, aber auch bei Staumauern der Fall ist, die über keine Kontrollgänge und -schächte verfügen. Nachteilig ist allerdings, dass das Erreichen einer annehmbaren Genauigkeit hohe Aufwendungen und grosse Erfahrung voraussetzt. Präzisionsmessungen können deshalb (in der Regel) vom Personal des Werkeigentümers nicht selber ausgeführt werden. Sie sind somit für Messungen wenig geeignet, die häufig auszuführen sind, wie jene, die im Rahmen der laufenden Überwachung vorzunehmen sind. Ist dies aber unumgänglich, müssen die Sachlage akzeptiert und wichtige Messungen ungeachtet der Kosten wenigstens einmal pro Monat ausgeführt werden.

Beachtet man die Aussagen im Abschnitt 2.1, dürfte das optimale Konzept für die Erfassung des Verformungsverhaltens verwirklicht sein, wenn ein Messsystem eingerichtet ist (Bild 2.5), das aus einem Messnetz in der Ebene der Talsperre (=inneres Messnetz) und einem mehr oder weniger horizontalen Messnetz auf der Höhe der Krone

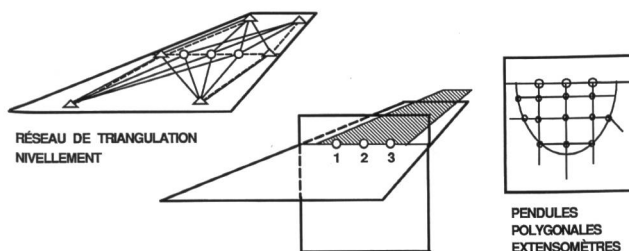


Figure 2.5. Détermination de la déformation d'un barrage à l'aide d'un réseau intérieur (à droite) et extérieur (à gauche), reliés entre eux par quelques points communs (1, 2, 3).

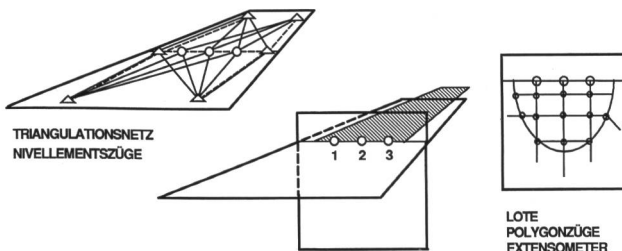


Bild 2.5. Erfassung des Verformungsverhaltens einer Talsperre durch ein inneres (rechts) und ein äusseres Messnetz (links), welche über einige gemeinsame Punkte (1, 2, 3) verknüpft sind.

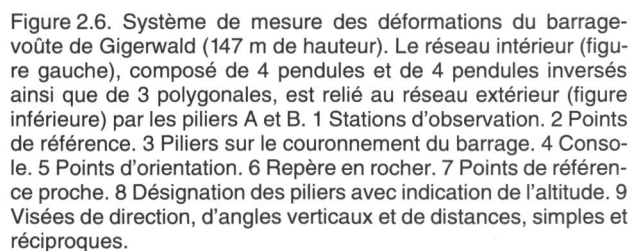


Bild 2.6. Messsystem für die Verformungen der 147 m hohen Bogenstaumauer Gigerwald. Das innere Messnetz (Figur links), bestehend aus 4 Gewichtsloten und 4 Schwimmloten sowie 3 Polygonzügen, ist über die Pfeiler A und B mit dem äusseren Messnetz (Figur unten) verbunden.



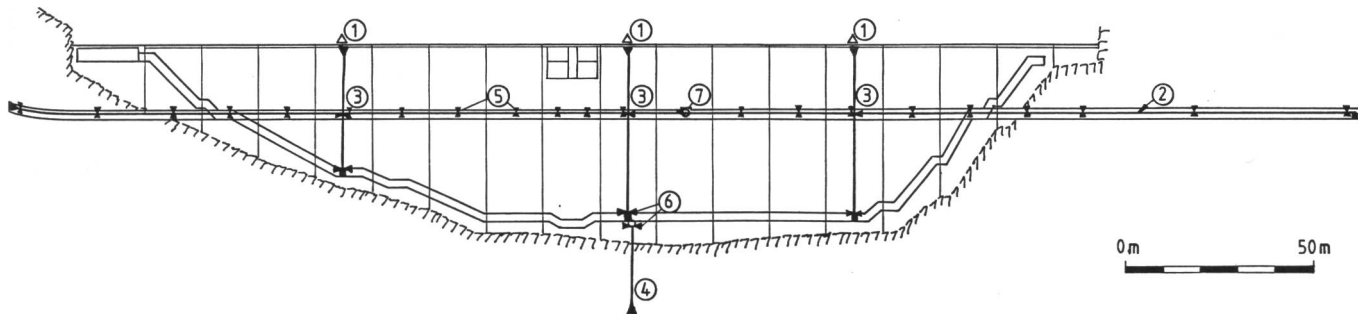


Figure 2.7. Réseau intérieur du barrage poids de Panix. 1 Pilier sur le couronnement destiné à relier le réseau intérieur au réseau extérieur. 2 Alignement par fil, consistant en un fil de 350 mètres tendu d'un appui à l'autre à travers la galerie de contrôle. 3 Pendule. 4 Pendule inversé. 5 Postes de lecture de l'alignement par fil dans chaque plot du mur et aux appuis. 6 Poste de lecture du pendule. 7 Alignement par fil; point d'attache intermédiaire avec flotteur.

dimensions, qui augmentent fortement l'efficacité de la surveillance, en apportant de plus des redondances bienvenues. On est donc bien inspiré d'utiliser les possibilités offertes par la géodésie. Parfois, ceci devient même indispensable, surtout lorsque l'installation d'un système de mesure mécanique ne peut pas être mis en place ou entraîne des frais considérables, comme par exemple dans le cas de digues ou de barrages en béton sans galeries ni puits. Toutefois, atteindre une précision acceptable implique des frais élevés et une grande expérience. Les mesures de précision ne peuvent pas (en règle générale) être exécutées par le personnel du propriétaire. Elles sont par conséquent difficiles à intégrer aux mesures qui doivent être régulièrement exécutées, comme celles prévues dans le cadre de la surveillance permanente. Toutefois, s'il n'existe pas d'autres possibilités, il est indispensable d'accepter ce corollaire et d'effectuer les mesures importantes au moins une fois par mois quel qu'en soit leur coût.

Selon les termes du paragraphe 2.1, la conception optimale pour le suivi des déformations est réalisée (figure 2.5) si le dispositif de mesure est composé d'un réseau dans le plan du barrage (réseau interne) et d'un réseau plus ou moins horizontal au niveau du couronnement (réseau extérieur), des points étant communs aux deux réseaux (points 1, 2 et 3 de la figure 2.5). Si la position et l'altitude des points communs sont déterminées à partir des points fixes appartenant au réseau extérieur, on dispose ainsi d'un système spatial. Par conséquent, on obtient des valeurs absolues des positions et de l'altitude des points du barrage tant que les points fixes restent stables. Ceci permet de déterminer non seulement les déformations, mais aussi le déplacement et la rotation du barrage, de même que les modifications altimétriques absolues. Enfin, le dispositif de mesure extérieur permet de contrôler si les environs sont stables ou s'ils subissent de quelconques déformations.

La solution la plus élégante pour le système interne consiste en des lignes de mesure perpendiculaires, définies par des pendules dans le sens vertical et par de polygonales dans le plan horizontal. C'est dû au fait que les pendules sont particulièrement bien adaptés à une surveillance permanente. En outre, les mesures sont fiables et peuvent être exécutées par le personnel du propriétaire. De plus, la mesure ne devient inexécutable qu'au

Figure 2.8. Réseau «intérieur» et extérieur de la digue de Mattmark (120 m de hauteur). 1 Piliers du réseau extérieur. 2 Points de contrôle sur le parement de la digue.

Bild 2.7. Inneres Messnetz der Gewichtsmauer Panix. 1 Pfeiler auf der Krone zur Herstellung der Verbindung des inneren Messnetzes mit dem äusseren. 2 Drahtalignement, bestehend aus einem durch den Kontrollgang von Felswiderlager zu Felswiderlager gespannten Draht von 350 m Länge. 3 Gewichtslote. 4 Schwimmlo. 5 Ablesestellen des Drahtalignements in jedem Block der Mauer und in den Felswiderlagern. 6 Ablesestellen der Lote. 7 Zwischenaufhängepunkt des Drahtalignements mit Schwimmer.

(= äusseres Messnetz) besteht und in der Schnittlinie über einige gemeinsame Punkte verfügt (Punkte 1, 2 und 3 in Bild 2.5). Werden Lage und Höhe der gemeinsamen Punkte im äusseren Messnetz, d.h. ausgehend von sogenannten Festpunkten, bestimmt, ist ein räumliches Messsystem verwirklicht, das für Punkte der Talsperre solange absolute Werte bezüglich Lage und Höhe liefert, als die Festpunkte fest sind. Damit können ausser Verformungen auch Verschiebungen und Kippungen der Talsperre sowie absolute Höhenänderungen erfasst werden. Schliesslich erlaubt das äussere Messnetz, festzustellen, ob das Umgelände stabil ist oder irgendwelche Verformungen erleidet.

Am elegantesten wird die messtechnische Lösung, wenn das innere Messnetz mit orthogonalen Messlinien, d.h. mit Loten in der Vertikalen und Polygonzügen in der Horizontalen, ausgerüstet werden kann, und zwar deshalb, weil Lote besonders geeignet sind, die laufende Überwachung einfach und zuverlässig sicherzustellen. Die Messungen können vom Personal des Werkeigentümers ausgeführt werden. Ein Messen ist überdies nur vermöglicht, wenn die Talsperre selbst mit dem Helikopter nicht mehr erreichbar ist. Falls erwünscht, ist auch eine automatische Datenerfassung und -fernübertragung möglich. Reichen einzelne Messlinien weit in den Untergrund oder die Widerlager hinein, d.h. in Tiefen, die kaum mehr

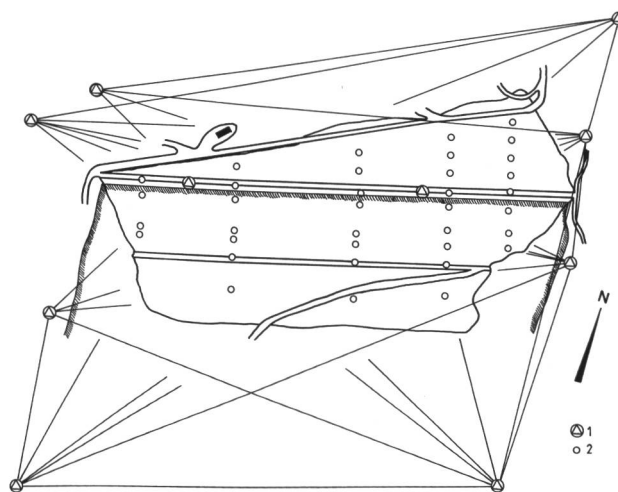


Bild 2.8. «Inneres» und äusseres Messnetz des 120 m hohen Staudammes Mattmark. 1 Pfeiler des äusseren Messnetzes. 2 Kontrollpunkte auf der Dammoberfläche.

Figure 2.9. Réseau «intérieur» du barrage-voûte des Toules (86 m de hauteur). (A) Elévation du parement aval avec points de contrôle. (B) Vue en plan avec piliers de mesure. Les déplacements des points de contrôle du parement aval (par exemple point 11a) sont déterminés par intersection à partir des piliers de mesure P1, P2, P3.

moment où le barrage ne peut plus être atteint même par hélicoptère. Le cas échéant, on peut également recourir à une saisie et transmission automatiques des données. Si quelques lignes de mesure sont prolongées en profondeur dans le soubassement et les appuis, c'est-à-dire dans des zones où les déformations sont insignifiantes, le système interne donne des valeurs quasi-absolues. Dans la mesure du possible, cette disposition est à envisager car ni les mesures de triangulation, ni le nivellement ne peuvent être effectués en hiver avec sûreté.

Aujourd'hui, pratiquement tous les grands ouvrages en béton sont équipés de cette façon. La figure 2.6 montre le dispositif d'auscultation du barrage de Gigerwald.

Dans le cas où les déformations des blocs, non équipés de pendules, d'un barrage-poids (d'une certaine longueur) doivent être régulièrement suivies, la polygonale peut être remplacée dans la galerie supérieure par un alignement par fil (et complété par un nivellement). La mesure des points dans le barrage (au moins un par bloc) peut dans ces conditions être effectuée par le personnel du propriétaire de manière aussi fréquente que la mesure des pendules. A titre d'exemple, la figure 2.7 illustre le système interne du barrage de Panix.

La solution avec pendule et polygonale (ou alignement par fil) n'est envisageable que pour les barrages équipés de galeries et de puits, c'est-à-dire en règle générale de grands ouvrages en béton. En l'absence de galeries et de puits, comme c'est le cas pour les digues et pour la plupart des petits ouvrages en béton, le concept doit être modifié, en ce sens que les points de la grille du système interne doivent être placés sur le parement aval et seront mesurés à partir du réseau extérieur (figures 2.8 et 2.9). Cette façon de faire est valable, en ce qui concerne le suivi du comportement des déformations de la structure et des environs. Par contre, on n'obtiendra pas d'informations relatives au comportement du soubassement. De plus, la mesure hivernale du réseau interne n'est pas très favorable. C'est justement pour ce type de système que le recours aux mesures par satellites (GPS) pourrait éventuellement rendre service. Enfin, la surveillance permanente est rendue plus difficile, car il n'existe pas d'instrument de mesure comparable au pendule. L'alignement par fil constitue la seule exception; il peut être placé dans le parapet d'un barrage-poids rectiligne, comme par exemple au barrage de Rempen des Forces Motrices de Wägital (figure 2.10). Dans tous les autres cas, la période comprise entre deux mesures géodésiques complètes doit être couverte soit par des mesures optiques d'alignement, soit par des simples mesures d'angles. Depuis peu, on dispose d'appareils de précision pour la mesure d'inclinaison qui peuvent être placés le long de lignes à l'aval ou à l'amont (figure 2.11). L'interprétation des résultats obtenus est parfois difficile.

Les alignements optiques ne sont pas très fiables. Une recherche faite en 1990 par l'Institut de Géodésie et de Photogrammétrie de l'EPFZ au barrage de Sella dans le massif du Gotthard [2] a montré qu'un fort gradient thermique entre l'aval et l'amont provoque un effet de réfraction qui entraîne, dans les cas extrêmes, une erreur de direction jusqu'à 30 cc, ce qui signifie un écart de 14 mm à une distance de 300 m. Une amélioration de la fiabilité peut

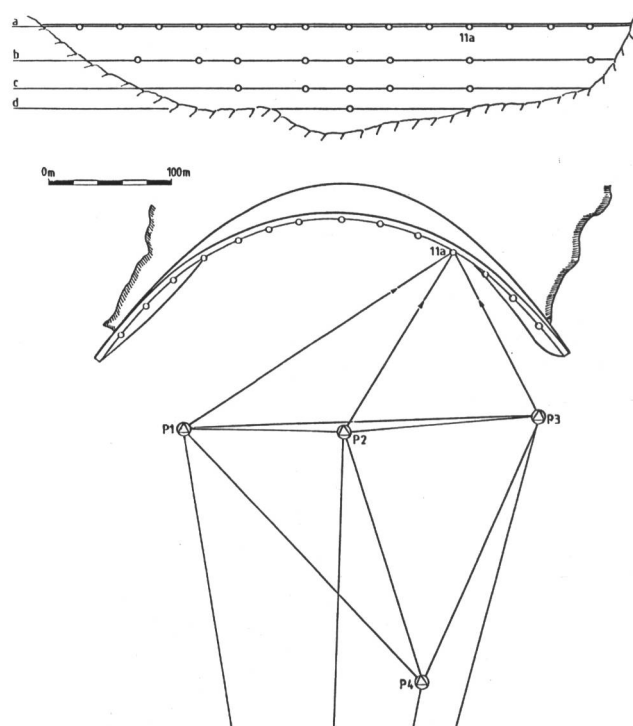


Bild 2.9. «Inneres» Messnetz der 86 m hohen Bogenstaumauer Les Toules. (A) Ansicht der Mauerluftseite mit Kontrollpunkten. (B) Grundriss mit Messpfeilern. Die Verschiebungen der Kontrollpunkte auf der Mauerluftseite (z. B. Punkt 11a) werden mittels Vorwärtseinschnitt von den Messpfeilern P1, P2, P3 bestimmt.

Verformungen erleiden, liefert auch das innere Messnetz nahezu absolute Werte. Dies ist, wenn immer möglich, anzustreben, weil weder das Triangulationsnetz noch die Nivellementszüge vollständig wintertaugliche Messeinrichtungen sind.

Es sind heute fast alle etwas grösseren Staumauern in dieser Weise ausgerüstet. Als Beispiel ist in Bild 2.6 die Messanlage der Staumauer Gigerwald dargestellt.

Soll bei (längeren) Gewichtsmauern auch das Verformungsverhalten derjenigen Blöcke regelmässig überwacht werden, die nicht mit Loten ausgerüstet sind, kann der Polygonzug im obersten Kontrollgang durch ein Drahtalignment (und ergänzend ein Nivellement) ersetzt werden. Die Bestimmung der Lage der Messpunkte längs der Mauer (in der Regel einer pro Block) kann unter dieser Voraussetzung durch Personal des Werkeigentümers und somit gleich häufig wie das Messen der Lote vorgenommen werden. Als Beispiel ist in Bild 2.7 das innere Messnetz der Staumauer Panix dargestellt.

Die Lösung mit Loten und Polygonzügen (respektive einem Drahtalignment) ist nur bei Talsperren realisierbar, die über Kontrollgänge und Schächte verfügen, in der Regel also nur bei grösseren Staumauern. Fehlen Kontrollgänge und Schächte, wie dies bei Staudämmen und meist auch bei kleineren Staumauern der Fall ist, muss das Konzept insofern geändert werden, als die Rasterpunkte des inneren Messnetzes auf dem luftseitigen Parament anzuordnen und vom äusseren Messnetz aus einzumessen sind (Bilder 2.8 und 2.9). Die Lösung ist, was die Erfassung des Verformungsverhaltens der Struktur und der Umgebung anbelangt, vollwertig. Es werden jedoch keine Informationen über das Verhalten des Untergrunds erhalten. Ferner ist die Wintertauglichkeit auch für das «innere» Messnetz nicht besonders gut. Es wäre deshalb gerade für solche Messsysteme von hoher prakti-

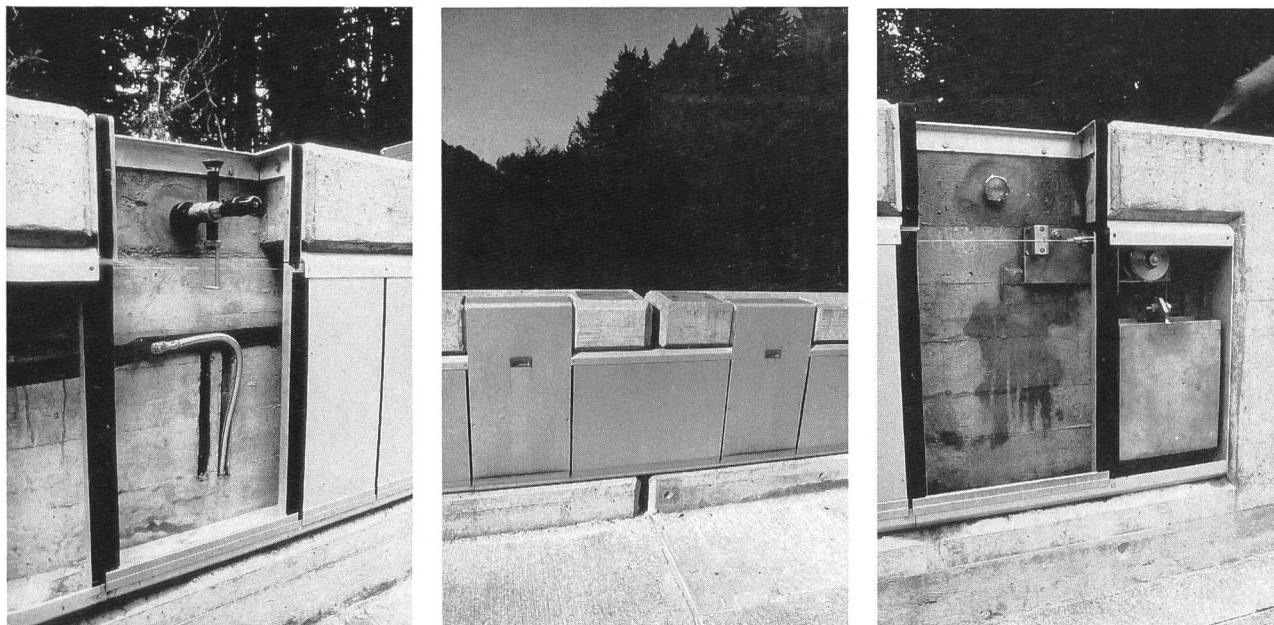


Figure 2.10. Aligement par fil installé dans le parapet massif du barrage-poids de Rempen. Le système de tension garantit une tension constante du fil (photo de droite). Le déplacement du point de mesure par rapport au plan vertical formé par l'alignement est mesuré optiquement (à gauche). Couvercle de protection au droit des points de mesure (au milieu).

Bild 2.10. Drahtalignement, welches in der massiven Brüstungsmauer der Gewichtsstaumauer Rempen eingebaut ist. Die Abspannvorrichtung gewährleistet eine konstante Vorspannung des Drahts (Photo rechts). Die Verschiebung des Messpunktes gegenüber der durch das Aligement gebildeten Vertikalebene wird optisch gemessen (links). Abdeckung des Aligements bei Messpunkten (Mitte).

être atteinte si l'on procède à des mesures par conditions météorologiques favorables (temps nuageux) ou à des heures propices, la nuit n'étant pas le meilleur moment. La détermination trigonométrique (mesures d'angles et/ou de distances – figure 2.14) faite à partir de 2 points extérieurs au barrage peut être un meilleur moyen. Elle implique toutefois une certaine expérience dans le manie- ment des instruments topographiques.

Etant donné la précision réduite des alignements optiques d'une part et des mesures d'inclinaison d'autre part, il est recommandé dans le cas de barrages sans galeries ni puits de rapprocher les mesures géodésiques complètes, c'est-à-dire de les exécuter au moins une fois, voire mieux, plusieurs fois par année.

La conception modulaire du système géodésique offre toute une palette de solutions entre la mesure la plus simple, à savoir la mesure du déplacement d'un point au niveau du couronnement, et la mesure complète, qui englobe la totalité des mesures possibles. Il faut recourir de façon optimale à cette marge de manœuvre, non seulement

scher Bedeutung, wenn die satellitengestützte Vermessung (GPS) zur Verbesserung eingesetzt werden könnte. Schliesslich ist die laufende Überwachung stark erschwert, weil kein dem Lot vergleichbares Messinstrument zur Verfügung steht. Einzige Ausnahme bildet das Drahtalignement, das bei geraden Gewichtsmauern in die Brüstungsmauer eingebaut werden kann, wie dies bei der Staumauer Rempen der Kraftwerke Wägital verwirklicht wurde (Bild 2.10).

In allen übrigen Fällen ist die Zeitspanne zwischen zwei geodätischen Vollmessungen durch den Einsatz entweder eines optischen Aligements oder einer einfachen Winkelmessanlage zu überbrücken. Bei Staumauern kommen in jüngster Zeit auch Präzisions-Neigungsmesser zur Anwendung, die luft- oder wasserseitig längs Linien angeordnet werden (Bild 2.11). Die erhaltenen Daten sind allerdings schwer interpretierbar.

Optische Aligemente (Bild 2.12) sind nicht sehr zuverlässig. Eine Untersuchung des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETHZ im Jahr 1990 bei der Gewichtsstaumauer Sella im Gotthardgebiet [2] hat gezeigt, dass die starken thermischen Gradienten, die zwischen der Luft- und der Wasserseite entstehen (Bild 2.13), Seitenrefraktionen verursachen, die im Extremfall die Richtung bis zu 30 ° verfälschen, was bei 300 m Visurlänge eine seitliche Abweichung von 14 mm bedeutet. Eine Steigerung der Genauigkeit kann erreicht werden, wenn an meteorologisch günstigeren Tagen (bewölktes Wetter) oder zu geeigneteren Stunden gemessen wird, wobei Nachtstunden nicht unbedingt geeigneter sind. Möglicherweise besser ist die trigonometrische Bestimmung, d.h. der Vorwärts-einschnitt ab zwei Festpunkten ausserhalb der Talsperre

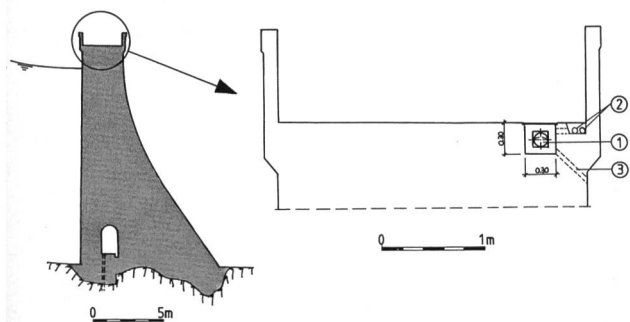


Figure 2.11. Equipement par inclinomètre du barrage-poids de Darbola. 1 Inclinomètre (tiltmètre) monté dans une petite niche au niveau du couronnement. 2 Chemin de câbles pour télé-transmission des mesures. 3 Forage de drainage pour la niche.

Bild 2.11. Ausrüstung der Gewichtsstaumauer Darbola mit Neigungsmessern. 1 Neigungsmesser (Tiltmeter), in einer kleinen Nische in der Mauerkrone montiert. 2 Kabelrohre für die Fernübertragung der Messwerte. 3 Drainagebohrung für die Entwässerung der Nische.

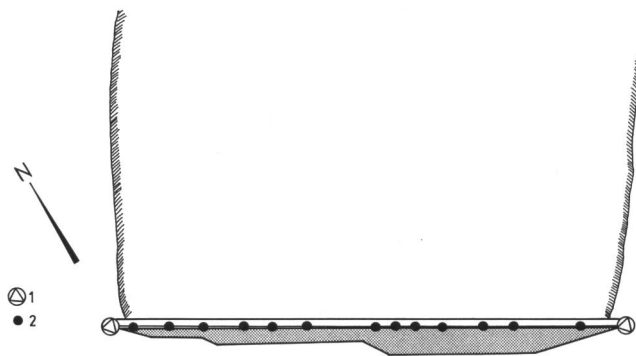


Figure 2.12. Alignement optique du barrage-poids de Sella. 1 Piliers de mesure aux extrémités du couronnement formant le plan vertical de référence. 2 Points de contrôle sur le couronnement, dont le déplacement horizontal par rapport au plan de référence est mesuré.

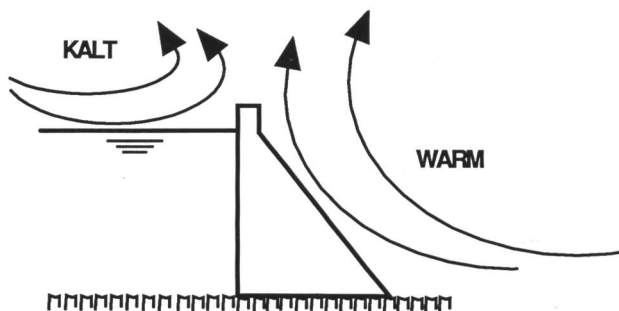


Figure 2.13. Des gradients thermiques importants entre les parements amont et aval d'un barrage peuvent causer des réfractions latérales substantielles et conduire à des résultats de mesure erronés. Une meilleure précision est obtenue en mesurant lors de jours ou d'heures météorologiquement favorables.

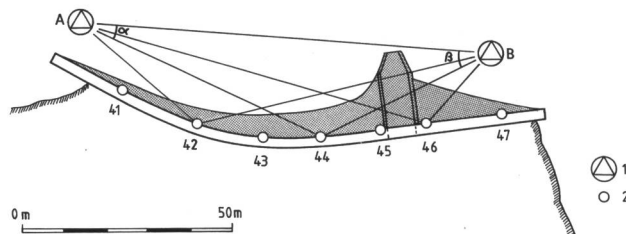


Figure 2.14. Mesure simple d'angles du barrage-poids de Chapfensee. 1 Piliers de mesure (A, B). 2 Points de contrôle au couronnement (41–47), dont le changement de position dans la direction amont-aval est déterminée par le changement d'angle α de l'angle α . Les angles β peuvent également être mesurés du point B à des fins de vérification.

pour répondre au mieux aux objectifs de la surveillance, mais aussi dans le but de limiter les frais. Le programme de mesure doit être revu périodiquement par le spécialiste chargé de la surveillance, en compagnie du géomètre responsable. Deux conditions doivent cependant être remplies dans tout les cas:

- Lors de la surveillance permanente, une mesure au moins une fois par mois des paramètres représentatifs du comportement
- une mesure géodésique complète tous les 5 ans.

Bild 2.12. Optisches Alignement der Gewichtsstaumauer Sella. 1 Messpfiler an beiden Kronenenden der Staumauer, welche die vertikale Bezugsebene bilden. 2 Kontrollpunkte auf der Mauerkrone, deren Horizontalverschiebung bezüglich der Bezugsebene gemessen wird.

Bild 2.13. Starke thermische Gradienten zwischen Luft- und Wasserseite einer Talsperre können erhebliche Seitenrefractionen hervorrufen und zu Verfälschungen der Messergebnisse führen. Eine bessere Genauigkeit wird erreicht, wenn an meteorologisch günstigen Tagen oder Stunden gemessen wird.

Bild 2.14. Einfache Winkelmessung der Gewichtsstaumauer Chapfensee. 1 Messpfiler (A, B). 2 Kontrollpunkte auf der Mauerkrone (41 – 47), deren Lageänderungen in See-Tal-Richtung über die Winkeländerung α der gemessenen Winkel α bestimmt wird. Zur Kontrolle können auch die Winkel β vom Messpfiler B aus gemessen werden.

(Winkelmessung und/oder Distanzmessung – Bild 2.14). Sie setzt aber Erfahrung im Umgang mit Vermessungsinstrumenten voraus.

Angesichts der begrenzten Genauigkeit der optischen Alignements und der Neigungsmessung ist es bei Stauanlagen ohne Kontrollgänge und Schächte angezeigt, die Zeitspanne zwischen zwei geodätischen Vollmessungen kurz zu halten, d. h. sie wenigstens einmal, besser mehrmals jährlich vorzunehmen.

Dank des modularen Aufbaus der geodätischen Messanlagen ist zwischen der einfachsten Messung, d. h. der Erfassung der radialen Verschiebung eines einzigen Kronenpunkts, und der Vollmessung, d. h. der Erfassung aller möglichen Messwerte, jede beliebige Zwischenlösung möglich. Diesen Entscheidungsfreiraum gilt es optimal zu nutzen, und zwar nicht nur im Hinblick darauf, die Zielsetzungen der Überwachung bestmöglich zu erfüllen, sondern auch darauf, dies mit vernünftigen Kosten zu tun. Das Messprogramm sollte deshalb vom beauftragten Talsperrenspezialisten periodisch überdacht werden, und zwar unter Beizug des zuständigen Vermessungsspezialisten. Zwei Anforderungen sollten aber in jedem Fall erfüllt sein:

- Messung der repräsentativen Verhaltensindikatoren, d. h. laufende Überwachung wenigstens einmal pro Monat
- Vollmessung wenigstens alle 5 Jahre.

2.3 Surveillance des zones de terrain critiques

Pour les retenues, les zones de terrain critiques sont les pentes et parois instables des flancs qui, en cas de glissement ou détachement, provoqueraient une vague subsistante dans le bassin ou pourraient endommager l'ouvrage de retenue ou ses organes de service (évacuateur de crue, prise d'eau, vidange de fond) au point que leur fonctionnement correct ne pourrait plus être garanti. Elles sont délimitées par des spécialistes de la construction des barrages, c'est-à-dire par des ingénieurs civils en collaboration avec des géologues sur la base d'une part de signes d'instabilité existante ou possible, et d'autre part du danger potentiel. Dans de telles zones, il s'agit en général de surveiller les déformations, les déplacements et les venues d'eau. Des contrôles visuels et des mesures sont utilisés à cette fin, les deux étant de même importance, comme cela se fait pour la surveillance des barrages.

Des améliorations de la stabilité peuvent, dans la mesure des possibilités de réalisation, être obtenues par drainage, déblai partiel, soutènement ou ancrage et, dans les environs immédiats de la retenue, par une limitation des variations du plan d'eau et en particulier de la vitesse d'abaissement. Un danger accru peut être contrecarré par une augmentation de la revanche, par un abaissement préventif ou par une vidange du bassin.

Le comportement normal de la déformation des ouvrages de retenue est essentiellement élastique, c'est-à-dire que les déplacements se répètent périodiquement au rythme des variations du plan d'eau et de la température, dans une plage de valeurs qui reste la même. Par contre, le comportement «normal» d'une zone de terrain est caractérisé par sa tranquillité «absolue» ou par les déformations résiduelles provoquées par un glissement de vitesse plus ou moins constante. Souvent, des variations dues à des accélérations ou ralentissements saisonniers provenant de variations de la nappe phréatique ou de la saturation du terrain s'additionnent. Au contraire des barrages où le comportement normal est essentiellement connu à l'avance de par sa construction et par des calculs, le comportement normal de zones de terrain critiques ne peut être déterminé qu'après plusieurs années d'observation. La plupart du temps, il faut également déterminer le volume, la surface et l'épaisseur de la zone en mouvement, ainsi que le mécanisme du mouvement à l'intérieur de la masse et en particulier s'il y a glissement sur un ou plusieurs plans ou s'il n'y a pas de plans de glissement prédominants.

Les déformations à surveiller dans les zones de terrain critiques peuvent être nettement plus importantes que celles du barrage lui-même. Dans ce cas, la précision de mesure peut être réduite de manière correspondante.

Les déformations de la surface peuvent sans aucun doute être déterminées de la manière la plus fiable à l'aide des mesures de déformations. Un réseau de mesures en forme de grille orthogonale qui s'appuie sur des points fixes de tous les côtés – similairement au réseau de mesures extérieur des barrages – est une solution optimale. Il est cependant rare de pouvoir réaliser ce réseau idéal. Souvent il n'existe des zones stables que d'un côté, ou bien les mesures font apparaître qu'elles sont instables. De plus, les conditions de visée peuvent être limitées, en particulier dans des zones boisées. Les emplacements des points, stations et piliers de mesure ne peuvent de plus être choisis qu'après avoir pris en compte les actions destructrices d'éboulements de pierres, glissements de plaques de neige, avalanches, etc. ainsi que les dangers en-

2.3 Überwachung kritischer Geländepartien

Als kritische Geländepartien für Stauanlagen werden instabile Zonen der Talhänge oder Talflanken bezeichnet, wenn sie im Falle eines Abrutsches oder Absturzes das Wasser in Staubecken zum Überschwappen bringen oder das Sperrbauwerk bzw. wichtige Betriebseinrichtungen (Überlauf, Triebwasserfassung, Grundablass) derart beschädigen könnten, dass deren sicheres Funktionieren nicht mehr gewährleistet wäre. Sie werden von Fachleuten des Talsperrenbaues, d.h. von Bauingenieuren in Zusammenarbeit mit Geologen, einerseits aufgrund von Anzeichen vorhandener oder möglicher Instabilität, andererseits aufgrund der Gefährdungen abgegrenzt. Zu überwachen sind in solchen Partien in der Regel vor allem Verformungen, Verschiebungen und Wasserzirkulationen. Hiefür kommen wie bei den Sperren visuelle Kontrollen und Messungen, beides in gleicher Wichtigkeit, zum Einsatz.

Stabilitätsverbesserungen können, sofern realisierbar, durch Entwässerungen, Teilabtrag, Stützung oder Verankerung und im Bereich der Stauräume durch Beschränkung der Stauspiegelschwankungen, besonders der Sinkgeschwindigkeit, erreicht werden. Erhöhter Gefahr könnte durch Vergrößerung des minimalen Freibordes, durch vorsorgliches Absenken oder Entleeren des Staubeckens begegnet werden.

Bei den Sperren ist das normale Verformungsverhalten vorwiegend elastisch, d.h. die Verschiebungen wiederholen sich periodisch im Rhythmus der Stau- und Temperaturschwankungen und in einem gleichbleibenden Größenbereich. Bei Geländepartien sind demgegenüber im Normalfall «absolute» Ruhe oder bleibende Verformungen von annähernd konstanter Geschwindigkeit vorherrschend. Oft sind sie zudem von jahreszeitlichen Beschleunigungen und Verlangsamungen infolge Schwankungen des Grundwasserspiegels oder Durchnässungen überlagert. Im Gegensatz zu den Sperren, wo das Normalverhalten durch ihre Konstruktion und aus Berechnungen weitgehend im voraus bekannt ist, kann das Normalverhalten von kritischen Geländepartien nur nach mehrjährigem Messen bestimmt werden. Meistens müssen dabei auch das Volumen, die Oberfläche und die Mächtigkeit, der in Bewegung befindlichen Partie ermittelt werden; ebenso der Bewegungsmechanismus innerhalb der Masse, vor allem, ob sie auf einer oder auf mehreren Gleitflächen oder ohne ausgeprägte Gleitfläche rutscht.

Bei kritischen Geländepartien können die zu überwachenden Verformungen und Verschiebungen bedeutend grössere Beträge als bei den Sperren erreichen. In diesem Fall kann die Erfassungsgenauigkeit angemessen vermindert werden.

Die Verformungen der Oberfläche können ohne Zweifel am zuverlässigsten mit Hilfe von Deformationsmessungen erfasst werden. Optimale Voraussetzung bildet ein rasterförmiges, orthogonales Messnetz, das sich – ähnlich wie das äussere Messnetz der Talsperren – nach allen Seiten auf Festpunkte abstützt. Es ist jedoch selten möglich, derart ideale Netze zu verwirklichen. Oft sind ruhige Zonen für die Festpunkte nur einseitig vorhanden oder sie erweisen sich aufgrund der Messungen als instabil. Ferner können beschränkte Visurmöglichkeiten hinderlich sein, besonders in bewaldetem Gebiet. Hinzu kommt, dass die Standorte für Messpunkte, -stationen und -pfeiler mit Rücksicht auf zerstörerische Einwirkungen von Steinschlag, Rufen, Schneerutschen, Lawinen usw. sowie im Hinblick auf entsprechende Gefährdung

Figure 2.15. Surveillance de pentes critiques. Exemple de l'engagement combiné de systèmes de mesure de déformations. 1 Triangulation pour la détermination de la déformation de la surface. 2 Mesures en forages pour la détermination de la profondeur des plans de glissement. 3 Mesures de distance pour l'exécution fréquente de mesures simplifiées.

courus par le personnel de mesure. De telles difficultés peuvent être maîtrisées de différentes manières. Lorsqu'on dispose de trop peu de points fixes ou de visées, la mesure par satellites (GPS) offre une alternative (voir chapitre 4 et annexe 2). La protection du personnel peut être assurée en reportant la totalité des mesures dans des périodes pas ou peu dangereuses. La surveillance est alors assurée à l'aide de mesures intermédiaires réduites ou simplifiées par lesquelles uniquement les déplacements relatifs de points représentatifs sont déterminés. Il est de toute façon nécessaire d'incorporer de telles mesures dans tout plan de mesure, afin d'assurer la surveillance lors de situations extraordinaires, lorsque des mesures plus fréquentes sont nécessaires. Par exemple les types de mesure suivants peuvent être alors engagés, seuls ou combinés: mesures de distances et d'angles, observations GPS (figures 2.15 et 2.16).

L'épaisseur de la masse en mouvement et la profondeur du plan de glissement peuvent être déterminées par forages, de même que les profils de déformation et de vitesse. Pour cela, on mesure la déflexion des axes du forage et les changements de longueurs de courts segments de mesure consécutifs à l'aide de micromètres coulissants, de clinomètres coulissants ou de déflectomètres (figure 2.15). Les plans de glissement sont reconnaissables dans les profils de déformation par des pics, des sauts ou des escaliers. Afin de pouvoir déterminer si des déformations se produisent en-dessous de la fin du forage ou si des plans de glissement profond peuvent exister, c'est-à-dire afin de pouvoir déterminer de manière fiable la totalité de la masse en mouvement, les forages doivent être intégrés dans le réseau de mensuration en surface et leur position mesurée par rapport aux points fixes du réseau. Les déplacements profonds qui ne sont pas déterminés à l'aide des mesures sur forages sont déduits de la différence des déplacements des points de liaison des deux systèmes obtenus de manière indépendante. Lorsque des tunnels, des galeries ou des puits traversent la masse en glissement, ils peuvent être utilisés avantageusement pour l'évaluation des déformations par mesure d'alignement, d'angles ou par polygonales. Autant que possible, de telles mesures ainsi que les forages doivent être intégrés dans le réseau de mensuration extérieur.

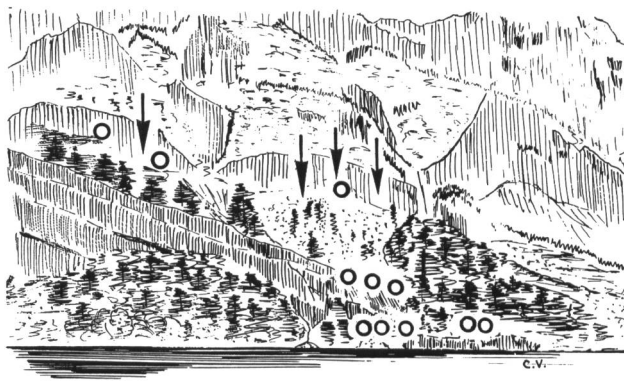


Figure 2.16. Systèmes de mesure de pentes critiques. [○] Points de contrôle du réseau de triangulation. [↓] Profils de mesure de distance pour l'exécution fréquente de mesures simplifiées.

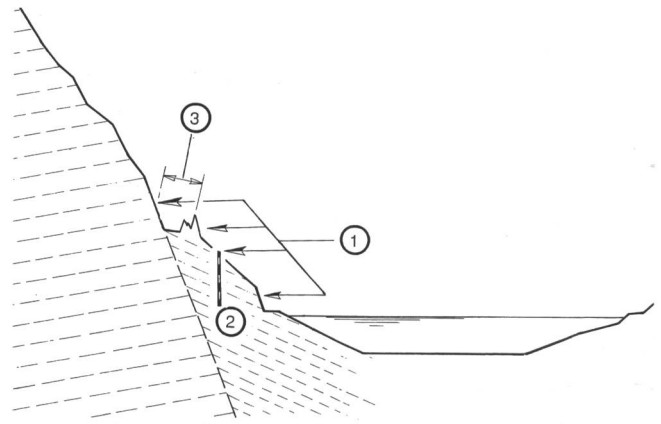


Bild 2.15. Überwachung von kritischen Geländepartien. Beispiel eines kombinierten Einsatzes von Verformungsmesssystemen. 1 Triangulation für die Bestimmung der Verformung der Oberfläche. 2 Bohrlochmessungen für die Ermittlung der Tiefenlage von Gleitflächen. 3 Streckenmessungen für die häufige Durchführung von vereinfachten Messungen.

des Messpersonals nicht frei wählbar sind. Solche Schwierigkeiten kann man auf verschiedene Arten überwinden. Wenn zu wenig Festpunkte oder Visuren zu finden sind, bietet die satellitengestützte Vermessung (GPS) einen Ausweg (siehe Kapitel 4 und Anhang Nr. 2). Zum Schutz des Messpersonals können vollständige Messungen in ungefährliche oder weniger gefährliche Zeiten verlegt werden. Die Überwachung wird dann mit reduzierten oder einfacheren Zwischenmessungen, bei denen nur relative Verschiebungen von repräsentativen Punkten bestimmt werden, sichergestellt. Solche Messungen müssen ohnehin in jedem Messkonzept eingeplant werden, damit die messtechnische Überwachung in ausserordentlichen Lagen, wenn häufigere Messungen nötig werden, gewährleistet ist. Zum Einsatz kommen hierfür z. B. allein oder kombiniert Strecken-, Distanz-, Winkel-, und GPS-Messungen (Bilder 2.15 und 2.16).

Mächtigkeit der bewegten Masse und Tiefenlage von Gleitflächen lassen sich in Bohrungen ermitteln, ebenso Verformungs- bzw. Geschwindigkeitsprofile. Hiefür werden Durchbiegungen der Bohrlochachsen und axiale Längenänderungen differentiell in Ketten von kurzen Messstrecken mittels sogenannter Gleitmikrometer, Gleitklinometer oder Deflektometer gemessen (Bild 2.15). Gleitflächen zeigen sich in den Verformungsprofilen als Spitzen, Stufen oder Treppen. Um festzustellen, ob auch unterhalb vom Bohrlochende Verformungen stattfinden bzw. tieferliegende Gleitflächen vorhanden sein könnten, d.h. zur zuverlässigen Erfassung der bewegten Gesamtmasse müssen die Bohrungen an der Oberfläche in das Vermessungsnetz einbezogen und ihre Lage in bezug auf die kontrollierten Festpunkte dieses Netzes eingemessen werden. Die in den Bohrlochmessungen nicht erfassten, tieferliegenden Verschiebungen, ergeben sich aus der Differenz der mit Hilfe beider Messsysteme voneinander unabhängig ermittelten Verschiebungen der Verknüpfungspunkte. Falls Tunnel, Stollen oder Schächte die Rutschmassen durchqueren, sind auch diese zur Verformungsmessung mittels Alignementen, Nivellementen oder Polygonzügen dienlich. Solche Messungen müssen,

Bild 2.16. Messsysteme zur Überwachung kritischer Geländepartien. [○] Kontrollpunkte des Triangulationsnetzes. [↓] Streckenmessprofile für die häufiger durchgeführten vereinfachten Messungen.

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-

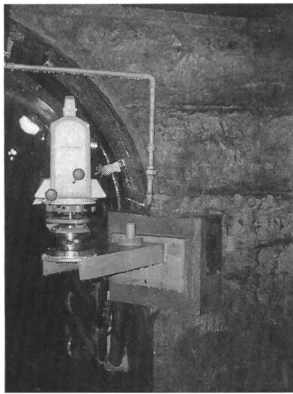
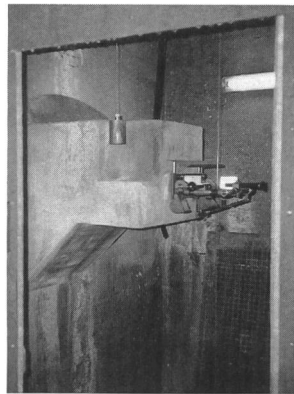


Figure 3.1. Console avec T2002, points de lecture d'une pendule avec coordiscopie et transfert d'altitude.

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-

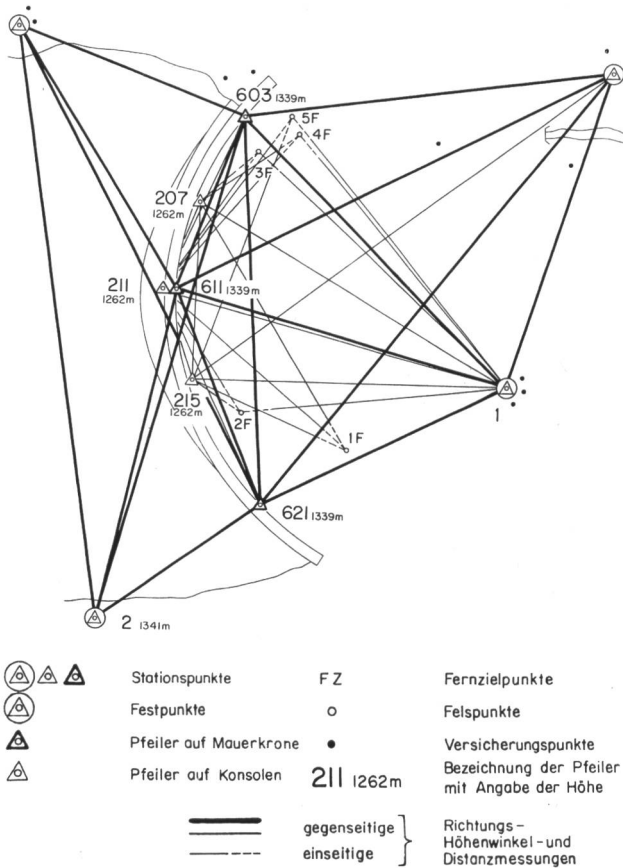


Figure 3.2. canevas du réseau de Gigerwald (voir figure 2.6).
Bild 3.2. Netzplan Gigerwald (siehe auch Bild 2.6).



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.

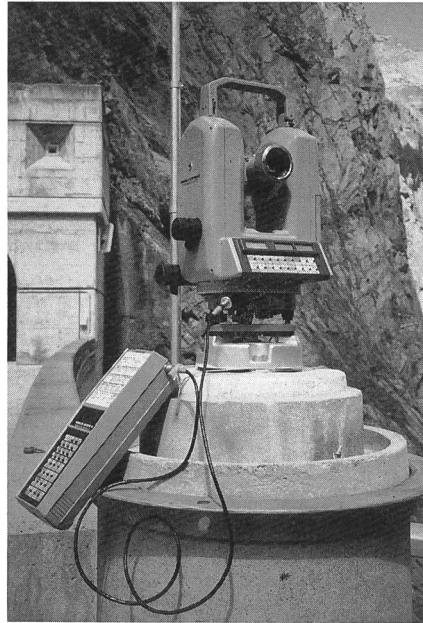
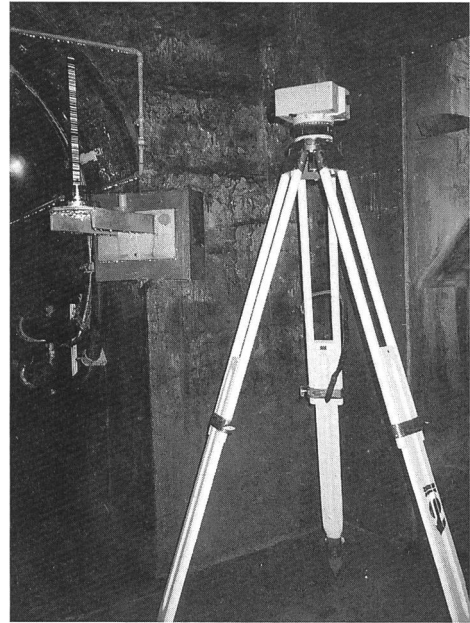


Figure 3.6, à droite. NA 3000.
Bild 3.6, rechts. NA 3000.



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 prozessorgesteuerten 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.

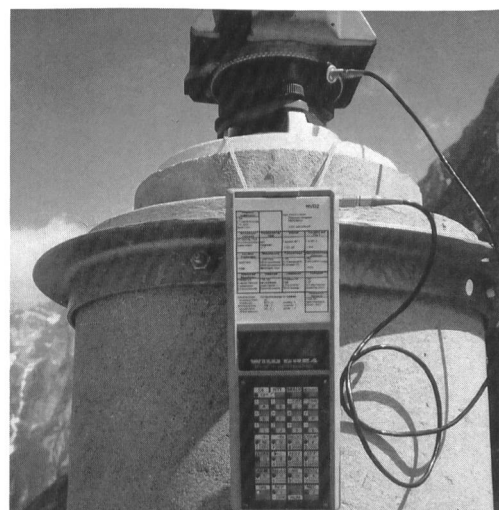


Figure 3.9. Carnet de terrain électronique Wild GRE 4.
Bild 3.9. Datenerfassungsgerät Wild GRE 4.

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 Tür.

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 (Ettelwerke) 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-

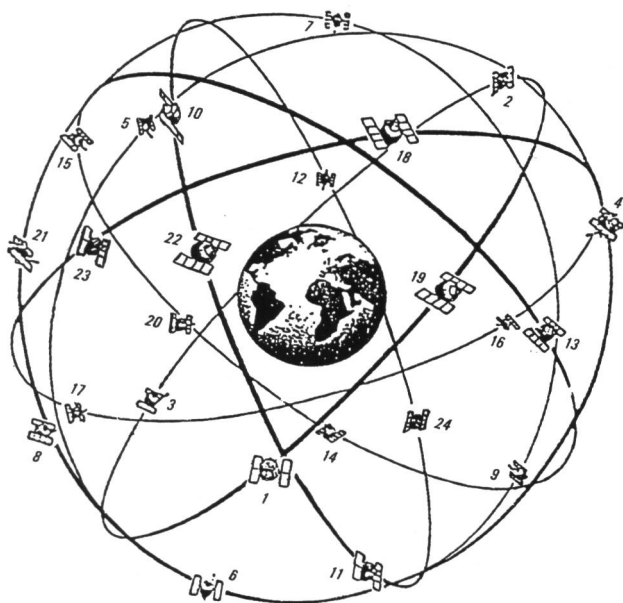


Figure 4.1. Constellation des satellites GPS (achèvement 1993).
Bild 4.1. Konstellation der GPS-Satelliten (Endausbau 1993).

entre la méthode GPS et la mesure de déformation terrestre, présente la solution la plus opportune.

L'Office fédéral de topographie (S+T) a commencé les tests et les applications pratiques de la mensuration avec satellites au milieu des années 80 avec la méthode GPS. Pour la première fois en Suisse, le S+T a utilisé cette dernière en 1989 dans le cadre de l'agrandissement des réseaux des barrages In den Schlagen (Etzelwerke) et Schiffenen (Entreprises Electriques Fribourgeoises, EEF), ceci en collaboration avec les forces motrices et les experts responsables [17]. Les mesures terrestres actuelles ne sont toutefois pas remplacées mais complétées par les mesures GPS. D'ailleurs, les résultats de plusieurs mesures de répétition sur trois ans du réseau Schiffenen permettent de juger la précision et la fiabilité de cette application. Le S+T a en outre ces dernières années mené à bonne fin la conception des réseaux de surveillance de Montsalvens et Rossens (tous deux EEF) ainsi que Griessee et Lago del Naret (tous deux Forces Motrices Maggia SA); ces derniers avec la participation du bureau d'ingénieurs Meier de Minusio. Le bureau Meier a mesuré à nouveau en 1992 les réseaux Griessee et Naret [12] et aussi étendu les réseaux des barrages Cavagnoli et Robiei par les mesures GPS.

4.2 Mensuration exacte avec GPS

4.2.1 Le système de positionnement global (GPS)

Le Département américain de la défense (DoD) développe depuis les années 70 le système militaire de navigation par satellites NAVSTAR/GPS. Ce système doit avant tout résoudre les problèmes de navigation des forces armées américaines. Il peut s'appliquer aussi à la navigation civile et aux problèmes liés à la mensuration. Actuellement en plein développement, il sera achevé vers la fin 1993 avec une constellation de 21 satellites ainsi que 3 satellites de réserve. Les orbites des satellites sont presque circulaires avec un rayon d'environ 26 500 km. Les satellites sont répartis sur 6 orbites (image 4.1) de telle sorte que depuis chaque point de la surface de la terre – sauf obstacles topographiques – des observations simultanées sur 4 satellites puissent être faites. On obtient ainsi, en plus de la grande précision et de la fiabilité, une rentabilité accrue des mesures.

Les satellites GPS émettent des signaux sur deux fréquences porteuses dans la gamme des micro-ondes ($L1 = 1,6 \text{ GHz}$, $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$; $L2 = 1,2 \text{ GHz}$, $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$). Sur les ondes porteuses sont modulés deux codes différents (Code C/A, Code P). Les signaux transmettent aussi les paramètres des orbites (éphémérides) et les paramètres d'horloge des satellites. Le code C/A (seulement sur $L1$) reste constamment à disposition de chaque utilisateur alors que le code P (sur $L1$ et $L2$), encore accessible, ne sera plus connu à l'achèvement du système que par les usagers agréés. L'accès ne sera pas possible aux utilisateurs civils. Cependant, cette restriction n'aura pas d'influence négative sur la précision du positionnement relatif.

Les récepteurs GPS modernes enregistrent les signaux codés de tous les satellites GPS «visibles» simultanément. Les récepteurs mesurent le temps de parcours du signal depuis les satellites jusqu'à l'antenne réceptrice et déterminent les distances spatiales entre celle-ci et les satellites (image 4.2). Les mesures vers plusieurs satellites permettent le calcul d'une position approchée absolue de l'emplacement des antennes et aussi la synchronisation de l'horloge des récepteurs avec le temps de réfé-

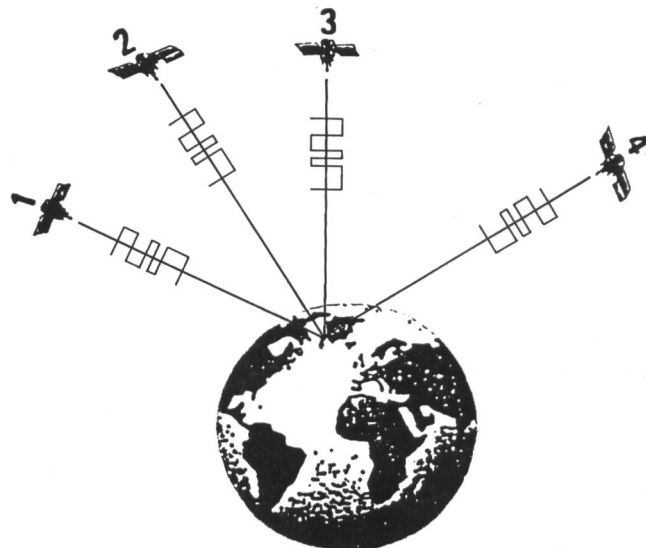


Figure 4.2. Positionnement absolu avec GPS.

Bild 4.2. Absolute Positionierung mit GPS.

reich durchgeführt, die beiden letzteren in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Meier, Minusio. 1992 hat das Büro Meier die Netze Griessee und Naret in eigener Regie nachgemessen [12] sowie diejenigen der Staumauern Cavagnoli und Robiei für GPS-Messungen erweitert.

4.2 Genaue Vermessung mit GPS

4.2.1 Das Global Positioning System (GPS)

Das U.S. Verteidigungsdepartement (DoD) entwickelt seit den siebziger Jahren das militärische Satelliten-Navigationssystem Navstar/GPS. Das System soll primär die Navigationsaufgaben der amerikanischen Streitkräfte erfüllen. Es kann jedoch auch für zivile Navigations- und Vermessungsaufgaben verwendet werden. Das System wird zurzeit rasch ausgebaut und wird im Endausbau (ab etwa Ende 1993) aus einer Konstellation von 21 Satelliten (plus 3 aktiven Reserven) bestehen. Die Satellitenbahnen sind fast kreisförmig mit Radien von etwa 26 500 km. Die Satelliten werden so auf 6 Bahnebenen verteilt sein (Bild 4.1), dass (mit Ausnahme bei Abschattung durch topographische Hindernisse) jederzeit von jedem Punkt der Erdoberfläche gleichzeitig 4 Satelliten beobachtet werden können. Damit kann neben einer hohen Genauigkeit und Zuverlässigkeit auch eine hohe Wirtschaftlichkeit der Messungen erreicht werden.

Die GPS-Satelliten senden auf zwei Trägerfrequenzen im Mikrowellenbereich ($L1 = 1,6 \text{ GHz}$, $\lambda_1 = 19 \text{ cm}$; $L2 = 1,2 \text{ GHz}$, $\lambda_2 = 24 \text{ cm}$) Signale aus. Den Trägerwellen sind zwei verschiedene Codes (C/A-Code, P-Code) aufmoduliert. Die Signale übermitteln zudem auch die Bahn- (sog. Ephemeriden) und Uhrdaten der Satelliten. Der C/A-Code (nur auf $L1$) steht allen Benützern jederzeit zur Verfügung, während der P-Code (auf $L1$ und $L2$), heute an Werktagen noch allgemein zugänglich, nach dem Endausbau des Systems nur noch autorisierten Anwendern bekanntgegeben wird und zivilen Benützern versperrt sein wird. Für die relative Positionierung wird dies jedoch kaum negative Einflüsse auf die Genauigkeit haben.

Moderne GPS-Empfänger empfangen die codierten Signale von allen gleichzeitig «sichtbaren» GPS-Satelliten. Die Empfänger messen die Laufzeiten der Signale von den Satelliten bis zur Empfangsantenne und bestim-

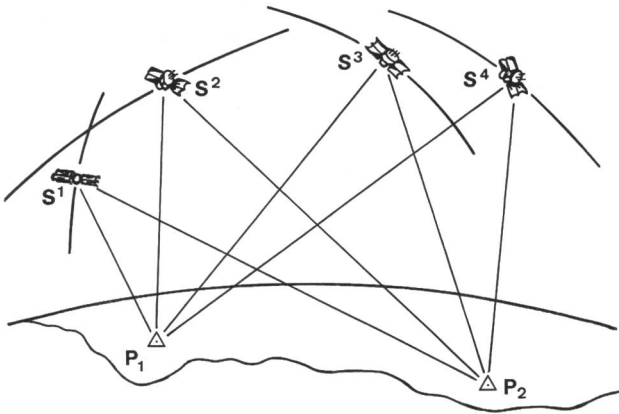


Figure 4.3. Positionnement relatif de différentes stations à l'aide de différences de phase des ondes porteuses GPS de plusieurs satellites.

Bild 4.3. Relative Positionierung mit Phasendifferenzen der GPS-Trägerwellen verschiedener Satelliten von verschiedenen Stationen.

rence des satellites. Le système de référence géodésique global World Geodetic System WGS-84 sert de base à toutes les mesures et calculs GPS.

4.2.2 Positionnement relatif de haute précision avec GPS

Comme grandeur observée pour le positionnement relatif, les récepteurs géodésiques mesurent les phases des ondes porteuses L1 et L2 à des instants bien définis. La résolution des mesures de phase est de 1 à 2 mm. Après un même intervalle de mesure avec plusieurs récepteurs sur des stations éloignées l'une de l'autre, les mesures de phase enregistrées simultanément seront transférées sur PC en vue de leur exploitation. Les différences entre les mesures de phase simultanées de deux récepteurs sont formées, à partir desquelles sont déduites les différences de distances aux positions connues des satellites. La mesure de phase étant sans équivoque à l'intérieur d'une seule longueur d'onde, on doit estimer, par une compensation supplémentaire sur toutes les mesures d'une station, le nombre inconnu des longueurs d'onde porteuse entières, c'est-à-dire l'ambiguïté vers chaque satellite. A partir des différences de phase et du nombre de longueurs d'onde entières, on déterminera finalement le vecteur tridimensionnel entre les points de station.

Lors de l'utilisation GPS dans des réseaux-tests terrestres de haute précision, on peut démontrer que la méthode est judicieuse et rationnelle pour mener à bien des mesures de précision dans de petits secteurs [13]. En effet, on atteint 1 à 2 mm d'erreur moyenne pour les coordonnées relatives d'un réseau de 5 × 5 km lorsqu'on utilise un logiciel d'exploitation performant. L'erreur moyenne d'une dénivelée est cependant 2 à 3 fois plus élevée à cause des effets de variation de la réfraction troposphérique.

4.3 Principe des réseaux de surveillance des barrages; projet de canevas

La liaison visuelle entre les points n'est pas nécessaire avec le GPS. Celui-ci offre une méthode élégante pour intégrer au réseau de contrôle, hors de la zone de déformation, des points géologiquement stables et surveiller à long terme les déplacements dans la région du barrage. Le rattachement à des réseaux géodésiques existants peut être mesuré avec la méthode terrestre conventionnelle ou GPS, les deux réseaux devant se contrôler mu-

men d'après la Raumdistanzen zu den Satelliten (Bild 4.2). Die Messungen zu mehreren Satelliten dienen der Berechnung einer absoluten Näherungsposition des Antennenstandortes und vor allem der Synchronisation der Empfängeruhr mit der übergeordneten GPS-Referenzzeit der Satelliten. Als Koordinatensystem liegt bei GPS allen Messungen und Berechnungen das geodätische Welt-system World Geodetic System WGS-84 zugrunde.

4.2.2 Relative Positionierung hoher Genauigkeit mit GPS

Als eigentliche Beobachtungsgrösse für die relative Positionierung messen die geodätischen Empfänger die Phasen der L1- und L2-Trägerwellen zu genau definierten Zeitpunkten. Die Messauflösung der Phasemessungen beträgt 1 bis 2 mm. Nach der gleichzeitigen Messung mit mehreren Geräten auf voneinander entfernten Stationspunkten werden die simultan registrierten Phasemessungen zur Auswertung auf einen PC übertragen. Dabei werden Differenzen zwischen den simultanen Phasemessungen von Gerätepaaren gebildet und daraus Distanzdifferenzen zu den bekannten Satellitenstandorten ermittelt. Da die Phasemessung nur innerhalb einer Wellenlänge eindeutig ist, muss in einer nachträglichen Ausgleichung über alle Messungen einer Stationierung noch die unbekannte Anzahl der ganzen Trägerwellen, die sog. Phasemehrdeutigkeit (meist auch engl. ambiguity genannt), zu den einzelnen Satelliten geschätzt werden. Aus den Phasendifferenzen und der Anzahl der ganzen Wellen werden schliesslich die Raumvektoren zwischen den Stationspunkten ermittelt.

Bei der Anwendung von GPS in hochpräzisen terrestrischen Testnetzen konnte gezeigt werden, dass die Methode durchaus dazu geeignet ist, Präzisionsvermessungen in kleinen Gebieten rationell durchzuführen [13]. Wird zudem hochentwickelte Auswertesoftware verwendet, so lassen sich in Kleinnetzen (5 × 5 km) mittlere Fehler von 1 bis 2 mm an den relativen Lagekoordinaten erreichen. Der mittlere Fehler der Höhenunterschiede ist je nach Grösse der troposphärischen Refraktionseffekte zwei- bis dreimal grösser.

4.3 Einsatzkonzept in Talsperren-Überwachungsnetzen; Netzentwurf

Bekanntlich sind mit GPS keine direkten Sichtverbindungen zwischen den zu vermessenden Punkten notwendig. Damit bietet GPS eine elegante Methode, um ausserhalb der Deformationszone versicherte, geologisch stabile Punkte in die Kontrollnetze einzubeziehen und Langzeitverschiebungen im Gebiet der Staumauer in Lage und Höhe überwachen zu können. Der Bezug zu bereits existierenden geodätischen Netzen kann mit konventionellen terrestrischen Methoden oder mittels GPS hergestellt werden, wobei sich die Netze gegenseitig stützen und kontrollieren sollen. Unter Umständen ist die bestehende Netzanlage neu zu überdenken. Meist ist eine Kombination der modernen geodätischen Messmittel angezeigt («hybride 3D-Netze»), bei der die Vorteile der jeweiligen Methoden optimal ausgenutzt werden: Bestimmung von Mauerdeformationen und Lageverschiebungen mittels Präzisions-Distanzmessungen, Richtungs- und Höhenwinkelmessungen, eine hohe relative Höhen-genauigkeit mit dem Präzisionsnivellement und schliesslich eine hohe relative Lagegenauigkeit auch zwischen weit-entfernten Punkten ohne Sichtverbindung mit GPS. Als weitere Vorteile von GPS sind die weitgehende Unabhängigkeit von Tages- und Jahreszeit sowie vom Wetter zu

tuellement. Dans certains cas, le réseau conventionnel doit être revu. La combinaison de mesures géodésiques terrestres et GPS (réseau hybride 3D) est recommandée et permet de tirer profit au maximum des avantages de chaque méthode: détermination des déformations du mur et des déplacements au moyen de distances précises, d'angles horizontaux et verticaux; une précision relative altimétrique élevée avec le nivellement de précision, et finalement une précision relative élevée pour les repères les plus éloignés sans liaisons directes, par la méthode GPS. Cette dernière présentant encore l'avantage d'être opérationnelle en tout temps, jour et nuit, et en toute saison. Elle convient en outre pour mener rapidement à bien les mesures d'un réseau de contrôle partout où les conditions et les situations sont défavorables pour les mesures terrestres.

La partie GPS d'un tel réseau hybride en 3D est construite de façon que le réseau de déformation proprement dit du barrage puisse reposer sur un nombre suffisant de points de contrôle GPS (4 au minimum). Le choix des stations GPS est défini avant tout par des critères de stabilité géologique et tectonique ainsi que de sécurité. Les points sont matérialisés durablement comme tous les points fixes et repérés excentriquement. Les conditions géologiques locales devront être documentées. Les points devront aussi être accessibles facilement toute l'année (danger d'avalanche).

Le lieu choisi doit répondre aux exigences minimales du GPS. Pour obtenir une grande précision, il faut que l'horizon

erwähnen. Damit ist GPS geeignet, in Ausnahmesituationen auch bei Bedingungen, die für terrestrische Messungen ungünstig sind, rasch minimale Kontrollmessungen durchführen zu können.

Der GPS-Netzteil eines solchen hybriden 3D-Netzes ist so anzulegen, dass das eigentliche Staumauer-Deformationsnetz durch genügend (mindestens vier) GPS-Kontrollpunkte umschlossen wird und darin gelagert werden kann. Die Auswahl der Standorte der GPS-Stationen richtet sich vor allem nach den Kriterien der (geologischen und tektonischen) Stabilität und der Sicherheit. Die Punkte sind wie alle Festpunkte dauerhaft zu materialisieren und exzentrisch rückzuversichern. Die örtlichen geologischen Verhältnisse sollten erfasst und dokumentiert werden. Der Zugang zu den Punkten soll möglichst einfach und ganzjährig möglich sein (Lawinengefahr).

Daneben hat der Standort aber auch minimalen Anforderungen seitens GPS zu genügen. Um hohe Genauigkeiten zu erreichen, ist darauf zu achten, dass der Horizont ab einer Elevation von ca. 15° bis 20° frei ist, damit weder durch lokale Objekte (Gebäude, Bäume) noch topographische Hindernisse Satelliten abgeschattet werden und auf allen Stationen die gleiche Satellitenkonstellation verfügbar ist. Da die Wellenausbreitung im Frequenzbereich von GPS mit derjenigen des Lichtes vergleichbar ist, können auch Bäume die GPS-Signale teilweise oder ganz abschatten. Deshalb sind GPS-Messungen in lichten Wäldern zwar möglich, für Präzisionsanwendungen sollten sie aber vermieden werden. Im weiteren sind die Stationen

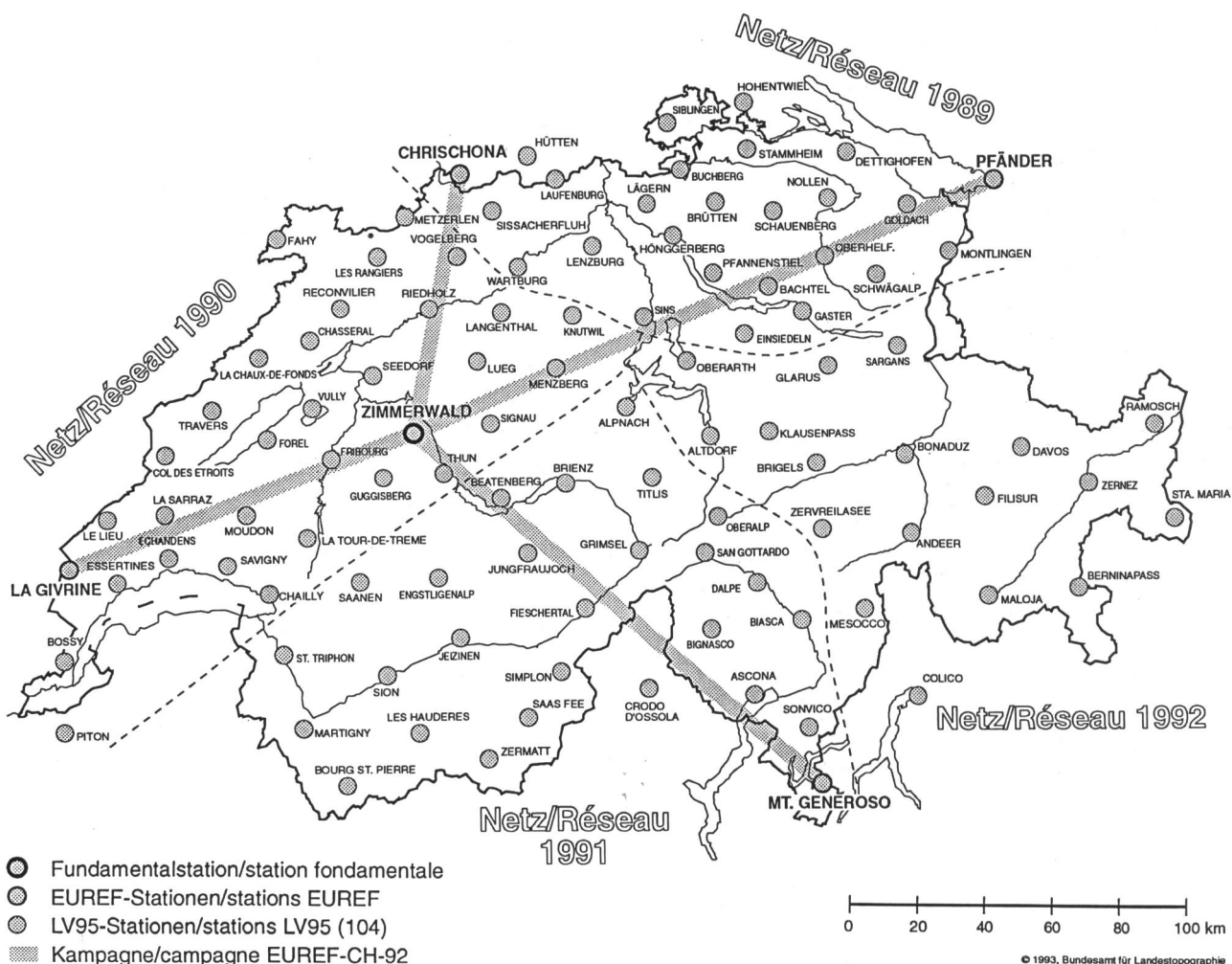


Figure 4.4. Points de référence GPS dans la nouvelle mensuration fédérale LV95.

Bild 4.4. GPS-Referenzpunkte in der neuen Landesvermessung LV95.

zon soit libre à partir d'une élévation d'environ 15° à 20°, que les objets locaux (maisons, arbres) et les obstacles topographiques ne perturbent pas la liaison avec les satellites et que toutes les stations disposent de la même constellation de satellites. Les arbres peuvent aussi interrompre entièrement ou en partie les signaux GPS car la propagation des ondes GPS est comparable dans la gamme de fréquence à celle de la lumière. Les mesures GPS sont toutefois possibles dans les forêts dégagées, mais devraient être exclues pour des applications précises. De plus, les stations devraient être installées à plus de 300 m d'un émetteur pour que ses signaux n'interfèrent ni ne perturbent les signaux GPS. Aucune surface réfléchissante (toit en tôle) pour les micro-ondes ne doit se trouver à proximité d'une station GPS, car ceci pourrait provoquer des réflexions des signaux.

Toutes ces contraintes sont pourtant moins restrictives que les liaisons directes des méthodes conventionnelles et laissent une plus grande liberté pour le choix des stations. Comme il a déjà été mentionné, les réseaux hybrides offrent la meilleure solution dans la pratique. Il est toutefois avantageux que les deux parties du réseau puissent être combinées par des mesures classiques permettant un rattachement optimal du réseau terrestre. Les mesures de distances entre les points GPS servent aussi à déterminer l'échelle du réseau trigonométrique. Des exemples figurent dans l'annexe n° 4 des barrages Montsalvens et Rossens avec les mesures de rattachement terrestres, y c. les visées d'orientation. Par contre, les réseaux de mesures de déformation des barrages ne sont pas reportés.

4.4 Planification et réalisation des mesures GPS

4.4.1 Préparation et organisation des mesures

En plus de la densité et du choix des points du réseau, différents paramètres qui doivent être encore pris en considération pour la planification des campagnes GPS, comme par exemple la précision, le nombre et le type de récepteurs, la configuration des satellites, le programme d'observation, les points fixes de coordonnées connues, la logistique (véhicules, liaisons radio, etc.).

Une des règles principales à observer pour la planification des mesures est de mesurer et restituer des lignes de base aussi courtes que possible car la part d'erreur dépendant de la distance, également pour GPS, prédomine au-dessus de 1 km. De plus, pour les stations calculées ensemble, la constellation de satellites visibles simultanément devrait être optimale. Pour les durées de mesure de 1 à 2 heures, il faut prêter attention à la répartition des satellites sur tout l'hémisphère. Les points devront être stationnés au moins deux fois avec centrage forcé et les hauteurs d'antennes déterminées plusieurs fois de manière indépendante, lorsqu'elles ne sont pas clairement définies par le centrage forcé.

4.4.2 Récepteurs et antennes

Pour éviter le plus possible une erreur d'échelle, les récepteurs géodésiques à deux fréquences, avec une haute résolution de la mesure des phases, sont absolument recommandés pour les applications de précision. Une attention particulière doit être apportée au choix des antennes et à leur calibration. Pour la mesure de petits réseaux, seuls des récepteurs et des antennes de même type devront être utilisés de manière à diminuer l'influence des

nen mindestens 300 m von Sendern entfernt einzurichten, deren Signale mit denjenigen von GPS interferieren und letztere dadurch stören könnten. In unmittelbarer Nähe der GPS-Stationen sollten keine für Mikrowellen reflektierenden Flächen (z. B. Blechdächer) sein, welche Mehrwegausbreitungen der Signale verursachen könnten.

All diese Einschränkungen sind jedoch meist weniger restriktiv als die notwendigen Sichtverbindungen bei konventionellen Methoden und lassen bezüglich der Standortwahl eine grössere Freiheit offen. Da in der Praxis, wie bereits erwähnt, hybride Netze meist die beste Lösung darstellen, ist es vorteilhaft, wenn zu anderen Punkten des Netzes terrestrische Anschlussmessungen möglich sind, damit beide Netzteile kombiniert und der terrestrische Netzteil optimal gelagert werden kann. Distanzmessungen zwischen GPS-Punkten dienen daneben auch der Massstabsbestimmung im trigonometrischen Netzteil. Als Beispiele sind im Anhang Nr. 4 die GPS-Netze der Staumauern Montsalvens und Rossens mit den terrestrischen Anschlussmessungen (inkl. Orientierungsvisuren) dargestellt. Die eigentlichen Deformationsnetze im Bereich der Staumauern sind nicht eingezeichnet.

4.4 Planung und Durchführung der GPS-Messungen

4.4.1 Vorbereitung und Messplan

Neben der Punktdichte und -auswahl bleiben noch verschiedene Parameter, welche bei der Planung von GPS-Kampagnen berücksichtigt werden müssen, wie z. B.: Genauigkeit, Anzahl und Typ der Empfänger, Satellitenkonfiguration, Beobachtungsprogramm, Festpunkte mit bekannten Koordinaten, Logistik (Fahrzeuge, allfällige Funkverbindungen usw.).

Als einer der Grundsätze bei der Messplanung ist darauf zu achten, dass möglichst kurze Strecken (sog. Basislinien) gemessen und ausgewertet werden, da auch bei GPS der distanzabhängige Fehleranteil ab ca. 1 km überwiegt. Im weiteren soll die simultane Satellitensichtbarkeit auf gemeinsam auszuwertenden Stationen maximiert werden. Vor allem bei kurzen Messzeiten (1 bis 2 Std.) ist auf eine gute, über die ganze Hemisphäre verteilte Satellitengeometrie zu achten. Die Punkte sollten zwangszentriert mindestens zweimal stationiert werden und die Antennenhöhen müssen, falls sie nicht durch die Zwangszentrierung eindeutig vorgegeben sind, mehrmals unabhängig bestimmt werden.

4.4.2 Empfänger und Antennen

Für Präzisionsanwendungen von GPS sind geodätische Zweifrequenzenempfänger mit hoher Auflösung der Phasenmessung empfehlenswert, damit Massstabsfehler möglichst vermieden werden können. Besondere Beachtung ist der Auswahl der Antennen und ihrer Kalibrierung zu schenken. Um den Einfluss von systematischen Fehlern zu verringern (vgl. 4.4.3), sollten in kleinen Netzen pro Messkampagne nur Empfänger und Antennen des gleichen Typs verwendet werden. Da jedoch selbst baugleiche Antennen individuelle Restfehler (Abstand des elektronischen Phasenzentrums vom mechanisch definierten Zentrum der Antenne in Lage und Höhe) aufweisen können, sind diese pro Empfänger/Antennen-Paar, bezogen auf die spezifisch vorhandene Satellitenkonstellation, in Antennentests zu bestimmen. Bei der Messung ist es wichtig, dass alle Antennen gleich orientiert werden. Moderne Auswerteprogramme erlauben schliesslich das Anbringen von individuellen Antennenkorrekturen [15].

erreurs systématiques (voir 4.4.3). Du fait que des antennes d'une même série présentent des erreurs résiduelles individuelles (écarts des centres de phases mécanique et électronique de l'antenne en planimétrie et en altimétrie), celles-ci sont à déterminer pour chaque paire récepteur/antenne par un calibrage des antennes lié à la constellation des satellites existants. Il est important que les antennes soient orientées dans la même direction pendant la mesure. Les programmes de restitution modernes permettent d'apporter des corrections d'antenne individuelles [15].

4.4.3 Prévention et correction des influences d'erreurs systématiques

Grâce avant tout au grand nombre de mesures individuelles GPS, les erreurs de mesures *accidentelles* ne jouent plus un grand rôle dans la restitution GPS. Par contre, les erreurs *systématiques* restent un facteur limitant la précision des réseaux GPS. Lors de la conception du réseau et du programme de mesures, on cherchera à diminuer l'influence des erreurs systématiques. En mensuration, le GPS est employé comme méthode de mesure relative (restitution par paires des mesures de phase), et on aspire le plus possible aux mêmes conditions sur toutes les stations. Par contre, la variation des conditions de mesure est souhaitable pour la compensation des influences systématiques pendant les mesures. En principe, l'heure et la durée de la mesure sont choisies de manière à minimiser les effets systématiques ou au moins cerner leur variation. Les données approchées pour les corrections des influences d'erreurs systématiques figurent dans l'annexe n° 3.

En conclusion, il résulte que des mesures de précision de l'ordre du millimètre avec GPS devront être exécutées deux fois dans des conditions atmosphériques différentes et décalées de quelques heures pour bénéficier d'une autre constellation de satellites. On devrait s'en tenir également à une durée minimale de deux heures avec 5 satellites, même lorsque la résolution de tous les nombres de longueurs d'onde porteuse (ambiguïtés) est déjà possible après quelques minutes (voir 4.2.2 et annexe n° 2).

4.5 Calcul GPS et analyse des résultats

4.5.1 Calculs des mesures GPS

Le calcul des mesures GPS comprend essentiellement l'exploitation par paires de mesures simultanées de phases de signaux GPS, en tenant compte des différents paramètres physiques du modèle, qui seront compensés simultanément avec les coordonnées recherchées, par la méthode des moindres carrés. La qualité du logiciel d'exploitation sera déterminée entre autres par ses possibilités de modélisation, de correction et d'élimination des influences d'erreurs systématiques.

Le fabricant du récepteur géodésique GPS livre également son propre software d'exploitation. L'Office fédéral de topographie utilise le «Berner GPS-Software» de l'Institut astronomique de l'Université de Berne (AIUB) [15] pour la restitution GPS des réseaux de haute précision en mensuration technique et industrielle. Ce programme permet, en estimant simultanément plusieurs paramètres physiques (par exemple les paramètres d'horloge, d'orbites de satellites, de la troposphère et de l'ionosphère), une compensation intégrale mathématiquement rigoureuse de toutes les mesures faites en plusieurs stations et au cours de plusieurs sessions.

Lors de l'exploitation des données GPS, la résolution fiable des ambiguïtés de tous les satellites est une condition essentielle. Les modèles standard pour la correction

4.4.3 Vermeidung und Korrektion von systematischen Fehlereinflüssen

Vor allem dank der grossen Zahl von Einzelmessungen, wie sie bei der GPS-Messung anfallen, spielen *zufällige* Messfehler bei der GPS-Auswertung keine grosse Rolle mehr. Begrenzender Faktor für die Genauigkeit der GPS-Netze sind dagegen die *systematischen* Fehler. Bereits beim Netzaufbau und beim Entwurf des Messprogrammes sollen mögliche systematische Einflüsse minimiert werden. Da GPS in der Vermessung als relative Messmethode eingesetzt wird, d.h. die Phasenmessungen paarweise ausgewertet werden, sind auf allen Stationen möglichst *gleiche* Bedingungen anzustreben. Andererseits sind zur Kompensation von systematischen Einflüssen während der Messungen variierende äussere Voraussetzungen durchaus wünschenswert. Grundsätzlich sollen die Messzeit (Tageszeit) und die Messdauer so angelegt werden, dass systematische Effekte minimiert werden oder zumindest in ihrer Variabilität erfasst werden können. Nähere Angaben zur Korrektion von systematischen Fehlereinflüssen sind im Anhang Nr. 3 gegeben.

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass Präzisionsmessungen im Millimeterbereich mit GPS zweimal bei unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen oder zeitlich mindestens einige Stunden verschoben bei anderer Satellitengeometrie durchgeführt werden sollten. Eine minimale Gesamtmessdauer von zwei Stunden (bei 5 Satelliten) sollte eingehalten werden, auch wenn die Auflösung der ganzen Anzahl Trägerwellen (sog. Phasenmehrdeutigkeiten oder ambiguïtés) bereits nach wenigen Minuten möglich ist (vgl. 4.2.2 und Anhang Nr. 2).

4.5 GPS-Auswertungen und Beurteilung der Resultate

4.5.1 Auswertung der GPS-Messungen

Die Auswertung von GPS-Messungen umfasst im wesentlichen eine paarweise Verarbeitung gleichzeitig erhobener Phasenmessungen an GPS-Signalen unter Berücksichtigung verschiedener physikalischer Modellparameter, welche gemeinsam mit den gesuchten Punktkoordinaten nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen werden. Die Qualität der Auswerte-Software wird u.a. an den Möglichkeiten zur Modellierung, Korrektion und Elimination von systematischen Fehlereinflüssen gemessen.

Die Herstellerfirmen geodätischer GPS-Empfänger liefern zusammen mit der Ausrüstung auch eigene Software-Pakete für die Auswertung an. Für GPS-Auswertungen in hochgenauen Netzen der Ingenieurvermessung verwendet das Bundesamt für Landestopographie die sog. «Berner GPS-Software» des Astronomischen Instituts der Universität Bern (AIUB) [15]. Diese erlaubt bei gleichzeitigem Schätzen vielseitiger physikalischer Modellparameter (z.B. Empfängeruhr-, Satellitenbahn-, Troposphären- und Ionosphären-Parameter) eine mathematisch strenge Gesamtausgleichung aller Messungen von mehreren Stationen in mehreren Sessions in einem Guss.

Bei der Auswertung von GPS-Daten ist die zuverlässige Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten zu allen Satelliten eine unbedingte Voraussetzung. Zur Korrektion der ionosphärischen und der troposphärischen Refraktion werden in den handelsüblichen Auswertprogrammen Standardmodelle ohne Einbezug der aktuellen örtlichen Verhältnisse verwendet. Diese sind in kleinräumigen Netzen, wie sie bei Staumauerüberwachungen vorkommen,

de la réfraction ionosphérique et troposphérique utilisés par les programmes vendus dans le commerce ne tiennent pas compte des conditions locales réelles. Leur précision est toutefois suffisante pour des réseaux restreints tels que les réseaux de surveillance de barrages (ordre de quelques ppm). Les autres possibilités du «Berner GPS-Software» sont décrites dans l'annexe 3.

Pour le calcul, on prendra comme fixe (planimétrie et altimétrie) un des points dont les coordonnées approchées dans le système WGS-84 sont connues à moins d'un mètre. Comme résultats de l'exploitation GPS, on obtient les coordonnées WGS-84 des points GPS restants, ainsi que leur matrice de covariance. De fausses coordonnées du point fixe provoquent des erreurs systématiques dans l'orientation et l'échelle du réseau GPS. On obtient les coordonnées exactes du point fixe par exemple par le rattachement du réseau GPS au réseau national LV95 (figure 4.4 [11]), ou par la transformation en coordonnées WGS-84 d'un point fixe connu en coordonnées fédérales.

4.5.2 Transformations d'Helmert

Les précisions internes calculées des solutions GPS sont souvent trop optimistes. Les erreurs moyennes formelles indiquées peuvent, selon la durée et les conditions de mesure, être jusqu'à 10 fois trop petites. Ceci avant tout parce que les erreurs systématiques communes ne sont pas décelées dans la compensation.

A la fin des calculs, les séries de coordonnées GPS par session seront normalement comparées entre elles et avec les mesures complémentaires terrestres. Un premier contrôle rapide de la précision obtenue est donné par les transformations à 7 paramètres (transformations de Helmert) entre les diverses solutions GPS par session. Ceci montre les possibilités de répétabilité des solutions GPS au cours d'une ou deux campagnes distinctes. Aussi, les erreurs systématiques communes ne sont pas décelables, surtout entre deux jours consécutifs.

Une autre possibilité de contrôle plus indépendante est donnée par la transformation de Helmert entre les solutions GPS et les coordonnées déterminées uniquement par la méthode classique. Se pose alors le problème des pondérations entre les différents types d'observations. Par exemple, les altitudes déterminées avec les angles verticaux sur de longues distances sont moins précises que les différences d'altitude ellipsoïdiques GPS (voir ci-dessous). Dans les réseaux avec de grandes dénivelées, comme c'est souvent le cas pour les barrages, les altitudes peuvent être fortement corrélées avec les coordonnées et s'influencer mutuellement. Le choix des poids a une grande influence lors des transformations et compensations tridimensionnelles avec de grandes différences de hauteur.

Les coordonnées WGS-84 déterminées par GPS sont indépendantes du champ gravimétrique local. Les altitudes calculées se rapportent à l'ellipsoïde de référence global alors que les altitudes nivelées du réseau terrestre se rapportent au géoïde. Il faut ainsi tenir compte de l'incertitude des ondulations du géoïde lors du passage de l'ellipsoïde sur le géoïde. Ce n'est d'ailleurs qu'en comparant plusieurs époques que l'on peut mettre en évidence les constantes locales.

4.6 Compensation globale des mesures GPS et terrestres

Les transformations d'Helmert sont particulièrement souples pour un petit nombre de points d'ajustage. Mais

im allgemeinen von ausreichender Genauigkeit (ppm-Bereich). Im Anhang Nr. 3 sind die erweiterten Möglichkeiten der Berner GPS-Software beschrieben.

Bei der Auswertung wird einer der Messpunkte, dessen Näherungskordinaten im Satellitenkoordinatensystem WGS-84 auf besser als 1 m genau bekannt sind, in Lage und Höhe festgehalten. Als Resultate der GPS-Auswertung erhält man die Koordinaten der übrigen GPS-Punkte sowie deren Kovarianzmatrix ebenfalls im WGS-84. Falsche Festpunkt-Koordinaten führen zu systematischen Fehlern in der Orientierung und im Massstab des GPS-Netzes. Genaue Festpunkt-Koordinaten erhält man beispielsweise durch den Anschluss des GPS-Netzes an das GPS-Landesnetz LV95 (Bild 4.4, [11]) oder durch Transformation eines Festpunktes mit bekannten Landeskordinaten ins WGS-84.

4.5.2 Helmert-Transformationen

Die in der Ausgleichung gerechneten inneren Genauigkeiten der GPS-Lösungen sind meist zu optimistisch. Die ausgewiesenen formalen mittleren Fehler können je nach Messdauer und Messbedingungen um bis zu einem Faktor 10 zu klein sein. Dies vor allem, weil gemeinsame systematische Fehler sich in der Ausgleichung nicht bemerkbar machen.

Nach Abschluss der Auswertungen werden die sessionsweisen GPS-Koordinatensätze üblicherweise untereinander und mit den terrestrischen Zusatzmessungen verglichen. Eine erste rasche Kontrollmöglichkeit über die erreichte Genauigkeit bieten 7-Parameter-Ähnlichkeits-Transformationen (Helmert-Transformationen) zwischen verschiedenen GPS-Sessionslösungen. Diese zeigen die Wiederholbarkeit der GPS-Lösungen innerhalb einer Kampagne oder zwischen zwei Kampagnen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Allerdings sind auch darin gemeinsame systematische Fehler, vor allem zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tagen, nicht sichtbar.

Eine unabhängige Kontrollmöglichkeit bieten Helmert-Transformationen zwischen GPS-Lösungen und den rein terrestrisch bestimmten Koordinaten. Damit stellt sich aber auch das Problem der Gewichtsverhältnisse zwischen den verschiedenen Beobachtungstypen. So sind z.B. die Höhen aus Höhenwinkeln über längere Distanzen ungenauer als mit GPS bestimmte ellipsoidische Höhendifferenzen (siehe unten). In Netzen mit grossen Höhendifferenzen, wie sie bei Staumauern oft vorkommen, können die Höhen stark mit den Lagekoordinaten korreliert sein und sich diese gegenseitig beeinflussen. Der Wahl der Gewichte kommt daher bei 3D-Transformationen und auch bei 3D-Ausgleichungen mit grossen Höhendifferenzen grosse Bedeutung zu.

Die mit GPS bestimmten WGS-84-Koordinaten sind vom lokalen Schwerfeld unabhängig. Die daraus berechneten Höhen beziehen sich auf das globale Referenzellipsoid der Erde, während sich die nivellierten Höhen im terrestrischen Netz auf das Geoid beziehen. Damit kommt beim Übergang vom Ellipsoid auf das Geoid neu die Unsicherheit der sog. Geoidundulationen (Höhe des Geoides über dem Ellipsoid) ins Spiel. Erst bei Vergleichen zwischen mehreren Messepochen fallen diese als ortskonstante Werte heraus.

4.6 Gesamtausgleichung

Helmert-Transformationen sind besonders bei einer kleinen Anzahl von Passpunkten sehr gutnützig. Besonders Fehler an extremen Randpunkten können oft unbemerkt durch die geschätzten Parameter (Rotationen und Mass-

certaines fautes à l'extrême périphérie peuvent souvent être mal prises en compte par les paramètres estimés (rotations et échelles). Pour obtenir une vue d'ensemble réaliste, aussi bien des mesures terrestres que GPS, et pouvoir calculer finalement une solution combinée, les deux séries de données devront être compensées ensemble.

Le programme RAUMTRI (compensation 3D des réseaux locaux dans un système de coordonnées cartésien et géocentrique) [16] rend possible la compensation commune des réseaux terrestres avec les vecteurs GPS, d'après les principes de la géodésie tridimensionnelle. Sur chaque station seront introduits 6 paramètres (3 coordonnées, latitude, longitude et orientation). On peut évaluer encore plusieurs paramètres d'échelle et de réfraction ainsi que 4 paramètres de transformation pour le positionnement d'une série de coordonnées globales GPS par rapport au réseau terrestre. RAUMTRI permet l'introduction des variances et covariances des vecteurs GPS, tout en tenant compte du caractère tridimensionnel des observations terrestres et GPS.

Le programme LTOP est utilisé pour la compensation séparée de la planimétrie et de l'altimétrie dans le système de projection suisse et permet d'exploiter les coordonnées GPS transformées dans ce système de projection. Le modèle mathématique rend possible l'introduction de plusieurs séries de coordonnées de différentes sessions ou de différentes campagnes, où toutefois les corrélations entre les coordonnées GPS ne sont pas prises en considération. En planimétrie, les 2 à 4 paramètres d'une transformation seront évalués pour chaque série de coordonnées, soit deux translations en X et Y, et facultativement une rotation azimutale ainsi qu'une échelle. Les altitudes peuvent être introduites avec une translation commune ou, si souhaité, avec «deux bascules» du plan horizontal par session.

L'annexe n° 4 montre un exemple des résultats d'une compensation globale avec les mesures GPS et terrestres du réseau Montsalvens [17].

Le compte rendu et la documentation concernant les mesures de déformation terrestres et celles en relation avec GPS se trouvent dans le paragraphe 3.6.

4.7 Résumé et perspectives

GPS offre pour la surveillance des barrages de bonnes possibilités de renforcer et d'élargir les anciens et nouveaux réseaux terrestres. Il se prête particulièrement bien à l'insertion de points géologiquement stables situés en dehors de la zone de déformation et donne ainsi un cadre de référence tridimensionnel pour les mesures de déformation proprement dites du réseau de contrôle.

Les expériences ont démontré que l'on peut atteindre aujourd'hui avec GPS des précisions relatives (erreur moyenne) de 1 mm + 0,5 ppm en planimétrie et environ le double en altimétrie, avec des mesures et calculs soignés, dans des réseaux de surveillance locaux. Ces valeurs pourront être encore améliorées dans un proche avenir avec de meilleures constellations de satellites. Une attention toute particulière devra toutefois être apportée à la correction des influences d'erreurs systématiques.

Dans un proche avenir, on pourra s'attendre à d'autres applications du GPS. Par exemple, la mesure continue et automatique, le calcul de la cinématique des barrages ou de zones avec glissement de terrain à l'aide de mesures permanentes.

stab) aufgefangen werden, ohne speziell aufzufallen. Um einen realistischeren Überblick sowohl über die terrestrischen wie die GPS-Messungen zu erhalten und schliesslich eine kombinierte Lösung rechnen zu können, werden beide Datensätze gemeinsam ausgeglichen.

Das Programm RAUMTRI (3D-Ausgleichung lokaler Netze in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem) [16] ermöglicht die gemeinsame Ausgleichung von terrestrischen Netzen mit GPS-Vektoren nach dem Konzept der dreidimensionalen Geodäsie. Für jeden Stationspunkt werden 6 Parameter (3 Koordinaten, 2 Lotabweichungskomponenten und 1 Orientierungsunbekannte) eingeführt. Zusätzlich können mehrere Massstabs-, Refraktions- und 4 Transformationsparameter für die Lage eines GPS-Gesamtkoordinatensatzes relativ zum terrestrischen Netz mitgeschätzt werden. RAUMTRI erlaubt die Einführung von Varianzen und Kovarianzen der GPS-Vektoren und ermöglicht die strenge Beachtung des dreidimensionalen Charakters sowohl der terrestrischen wie auch der GPS-Beobachtungen.

Häufiger wird die getrennte Lage- und Höhenausgleichung in der Projektionsebene mit dem Programm LTOP verwendet, welches die Verarbeitung von inschweizerische Projektionssystem transformierten GPS-Koordinaten erlaubt. Das mathematische Modell ermöglicht die Einführung von mehreren Koordinatensätzen aus verschiedenen Sessionen oder aus verschiedenen Kampagnen, wobei jedoch die Korrelationen unter den GPS-Koordinaten nicht berücksichtigt werden. Lage und Höhe werden getrennt ausgeglichen. In der Lage werden jeweils pro Koordinatensatz zwei bis vier Parameter einer ebenen Ähnlichkeitstransformation mitgeschätzt: Zwei Translationen in X- und Y-Richtung und fakultativ eine azimutale Drehung sowie ein Massstab. Die Höhen können mit einem gemeinsamen Offset sowie, falls gewünscht, mit zwei Kippungen pro Session eingeführt werden.

Als Beispiel sind im Anhang Nr. 4 die Resultate einer Gesamtausgleichung mit terrestrischen und GPS-Messungen im Netz Montsalvens [17] gezeigt.

Bezüglich der Berichterstattung und Dokumentation gelten die für die terrestrische Deformationsmessung in Abschnitt 3.6 festgehaltenen Grundsätze analog auch im Zusammenhang mit GPS-Messungen.

4.7 Zusammenfassung und Ausblick

GPS bietet gute Möglichkeiten, um neue terrestrische Talsperren-Überwachungsnetze optimal anzulegen und bestehende zu erweitern und zu verstärken. Es eignet sich besonders, um ausserhalb der Deformationszone versicherte, geologisch stabile Punkte in die Kontrollnetze einzubeziehen und so einen dreidimensionalen Referenzrahmen für die eigentlichen Deformationsmessungen aufzubauen.

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass bei sorgfältigen Messungen und Auswertungen mit GPS in lokalen Talsperren-Überwachungsnetzen heute relative Genauigkeiten (mittl. Fehler) von 1 mm + 0,5 ppm in der Lage und etwa das Doppelte in der Höhe erreichbar sind. Mit besseren Satellitenkonstellationen dürften diese Werte in naher Zukunft noch verbessert werden. Dabei ist insbesondere der Vermeidung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen grosse Aufmerksamkeit zu schenken.

In naher Zukunft sind auch weitere Anwendungen des GPS zu erwarten, wie z.B. die automatische und kontinuierliche Messung und Auswertung der Kinematik von Talsperren oder rutschgefährdeten Geländeabschnitten mit Hilfe von permanenten GPS-Messanlagen.

5. Mesure photogrammétrique des déformations

André Flotron

5.1 Introduction

La photogrammétrie se distingue des autres méthodes de la géodésie principalement par le fait que l'image photographique des objets est mesurée et non les objets eux-mêmes. C'est avantageux pour certaines tâches de la mensuration. Ainsi, déjà peu après l'invention de la photographie, des photos ont été l'objet de mesures et d'une restitution numérique dans des buts militaires.

La photogrammétrie n'est cependant devenue une branche importante de la mensuration qu'au tournant du siècle avec l'invention des appareils de restitution. Ces appareils conçus en tant que calculateurs analogiques opto-mécaniques ont rendu superflu le laborieux calcul manuel.

Au début des années quatre-vingt, les appareils analogiques ont été remplacés par des restituteurs analytiques assistés par ordinateur, appareils qui ont contribué à améliorer encore une fois sensiblement la précision et l'efficacité des mesures photogrammétriques.

5.2 Bases géométriques et données techniques relatives aux appareils

La photographie est une représentation de l'espace obtenue par une perspective centrale sur le plan de l'image. Dans cette représentation, la troisième dimension, c'est-à-dire la distance à l'objet, est perdue. Si cependant le même objet est photographié de deux points différents, la troisième dimension peut être calculée à partir des différences entre les images par la méthode de l'intersection employée en mensuration. Grâce à leur ordinateur, les appareils de restitution analytiques sont en état d'effectuer ces calculs en une fraction de seconde pour un nombre quelconque de points mesurés. L'optique de ces appareils est construite de telle façon que l'œil gauche observe l'image de gauche et l'œil droite celle de droite. La faculté visuelle stéréoscopique de l'homme est ainsi utilisée: l'opérateur voit l'objet en trois dimensions ainsi qu'une marque repère, figurant un point de l'espace, qu'il peut déplacer librement au moyen d'un «joystick» ou de volants. L'opérateur place cette marque sur le point à mesurer ou lui fait suivre la ligne à restituer. Le modèle photogrammétrique géométriquement semblable à l'objet est appelé image stéréoscopique. Si le modèle comportant quelques points signalés, visibles sur les images et dont les coordonnées sont connues, est ajusté à un système de coordonnées, il peut être mesuré exactement à l'échelle.

Les vues photographiques sont prises au moyen de caméras spéciales, appelées chambres photogrammétriques, qui permettent une disposition géométrique correcte des images. Lors de la prise de vue avec ces caméras, les repères de cadre du fond de la chambre ainsi que d'autres informations sont reproduites sur le film, pour permettre lors de la restitution de reconstruire les conditions géométriques régnant pendant la prise de vue.

Les chambres photogrammétriques qui sont montées dans les avions de prise de vue prennent des photos de 23×23 cm de côté à de courts intervalles choisis ou à des endroits précalculés lorsqu'ils sont asservis au système GPS.

5.3 Particularités de la technique de mesure photogrammétrique

Comparée à la technique de mesure classique, la photogrammétrie présente quelques particularités qui

5. Photogrammetrische Vermessung

André Flotron

5.1 Einleitung

Die photogrammetrische Vermessung unterscheidet sich von den übrigen Vermessungsmethoden hauptsächlich dadurch, dass nicht die Objekte selbst, sondern ihre photographischen Abbildungen ausgemessen werden. Dies kann für einige Vermessungsaufgaben Vorteile bringen. So wurden schon bald nach der Erfindung der Photographie Photos für militärische Zwecke ausgemessen und rechnerisch ausgewertet.

Die Photogrammetrie wurde aber erst um die Jahrhundertwende mit der Erfindung der Auswertegeräte ein wichtiger Zweig der Vermessungstechnik. Diese Auswertegeräte wurden als optisch-mechanische Analogrechner konstruiert, die die mühsame Handrechnung überflüssig machten.

Anfang der achtziger Jahre wurden die Analogrechner von computergestützten analytischen Auswertegeräten verdrängt, welche die Genauigkeit und die Effizienz der photogrammetrischen Vermessung nochmals wesentlich verbesserten.

5.2 Geometrische und gerätetechnische Grundlagen

Die photographische Aufnahme ist eine zentralperspektivische Abbildung des Raumes in die Ebene des Bildes. Bei dieser Abbildung geht die dritte Dimension, die Entfernung zum Objekt, verloren. Werden jedoch zwei Aufnahmen desselben Objektes von verschiedenen Standpunkten aus gemacht, kann aus den Differenzen in den Abbildungen die dritte Dimension nach dem Vermessungsprinzip des Vorwärtseinschnittes gerechnet werden. Bei den analytischen Auswertegeräten werden diese Berechnungen durch Computer in Bruchteilen von Sekunden für beliebige Mengen von gemessenen Punkten ausgeführt. Die Beobachtungsoptik dieser Geräte ist so konstruiert, dass mit dem linken Auge das linke Bild und mit dem rechten Auge das rechte Bild betrachtet wird. Damit kann das stereoskopische Sehvermögen des Menschen ausgenutzt werden: Der Operateur sieht das Objekt dreidimensional und eine im Gerät eingeblendete Messmarke als Punkt im Raum, den er mit einem Joystick oder mit Handrädern frei bewegen kann. Diese Marke setzt er auf den zu messenden Punkt auf oder lässt sie den auszuwertenden Linien folgen. Das Raumbild nennen wir das photogrammetrische Modell, das dem Objekt geometrisch ähnlich ist. Wird das Modell mit einigen nach Koordinaten bekannten, signalisierten und in den Bildern sichtbaren Punkten in ein Koordinatensystem eingepasst, kann es massstäblich genau ausgemessen werden.

Die Photos werden mit speziellen, sogenannten Messkammern aufgenommen, bei welchen die Objekte geometrisch möglichst korrekt abgebildet werden. Bei der Aufnahme mit der Messkammer werden Rahmenmarken des Kammergehäuses und weitere Informationen auf dem Film abgebildet, um bei der Auswertung die geometrischen Verhältnisse im Moment der Aufnahme rekonstruieren zu können.

Die Messkammern, die in Vermessungsflugzeuge eingebaut werden, belichten Bilder von 23×23 cm Seitenlänge in kurzen, regulierbaren Zeitabständen oder, GPS gesteuert, an vorberechneten Orten.

peuvent se révéler également avantageuses pour la surveillance des ouvrages de retenue.

- Un grand nombre de données peuvent être récoltées en un temps très court.
- Les photos sont des instantanés. Une évolution peut être suivie au moyen d'une succession de photos prises à intervalles choisis et documentée en une séquence d'images.
- Les images photographiques sont des mémoires de masse bon marché. Une photographie aérienne peut contenir jusqu'à deux gigabytes de données, qui peuvent en tout temps être exploitées tant du point de vue de la technique de mesure que du point de vue de l'interprétation du contenu de l'image.
- La photogrammétrie permet d'effectuer des mesures sans contact avec le terrain: si l'on excepte la signalisation de quelques points de la zone à restituer, il n'est pas nécessaire de la parcourir. Les propriétés suivantes de la photogrammétrie peuvent rendre son emploi difficile, voire impossible:
- La précision de la restitution est fonction de l'échelle de l'image. Plus cette échelle est grande plus la précision est élevée. Comme l'échelle de l'image ne peut être agrandie à volonté pour des raisons économiques, la précision de la mesure est limitée.
- Des conditions de prise de vue favorables sont nécessaires pour obtenir des images satisfaisantes du point de vue de la technique de mesure. L'éclairage doit être suffisant et les structures les plus fines de l'objet ou de la zone à restituer doivent présenter des contrastes suffisants tant du point de vue de la couleur que de la luminosité.
- Les mesures photogrammétriques nécessitent encore aujourd'hui des investitions importantes en matériel et des opérateurs formés spécialement. Avec l'avènement du traitement digital des images, qui n'est pas encore opérationnel aujourd'hui, la photogrammétrie tendra à perdre la position particulière qu'elle occupe parmi les techniques de mensuration.

5.4 Méthodes de mesure photogrammétriques et leur précision

La photogrammétrie est utilisée principalement pour l'établissement de cartes et de plans à partir de prises de vue aériennes. La restitution cartographique se fait à partir de modèles uniques. L'erreur moyenne planimétrique de la restitution atteint 0,1 ‰, l'erreur altimétrique 0,15 ‰ de la hauteur de vol par rapport au sol. Pour une image à l'échelle du 1:5000 et les chambres photogrammétriques utilisées habituellement, on obtient ainsi des erreurs planimétrique et altimétrique de 10 et 15 cm respectivement.

Des restitutions point par point plus précises sont aujourd'hui possibles à l'aide des techniques de calcul digitales. La méthode de mesure et de calcul appelée «aérotriangulation par la méthode des faisceaux» ne considère plus seulement un modèle comportant deux images mais un ensemble d'images, c'est-à-dire un bloc formé de nombreuses prises de vue avec un recouvrement de 60 % aussi bien dans la direction de vol que perpendiculairement à cette dernière. Par cette disposition des prises de vue, une même zone de terrain peut apparaître jusqu'à neuf fois sur des photos différentes. Dans les zones de recouvrement, on mesure les coordonnées des points clairement identifiables sur toutes les photos en vue d'établir la jonction des images. Ces mesures, celles des points fixes et celles des points de contrôle forment avec les coordonnées terrestres des points fixes dans le système

5.3 Eigenheiten der photogrammetrischen Messtechnik

Im Vergleich mit der klassischen Vermessungstechnik weist die Photogrammetrie einige Besonderheiten auf, welche auch bei der Überwachung von Stauanlagen von Vorteil sein können:

- Es können grosse Datenmengen in sehr kurzer Zeit aufgenommen werden.
- Photos sind Momentaufnahmen. Verändernde Zustände können in beliebigen Intervallen aufgenommen und in Bildsequenzen dokumentiert werden.
- Photographische Bilder sind billige Massenspeicher. Ein Luftbild enthält bis zu zwei Gigabyte Daten, die jederzeit messtechnisch und interpretationsmässig ausgewertet werden können.
- Die Photogrammetrie vermisst berührungslos. Ausser zum Signalisieren einiger Festpunkte muss das Aufnahmegebiet nicht begangen werden.

Die folgenden Eigenschaften der Methode Photogrammetrie können die Anwendung erschweren oder verunmöglichen:

- Die Auswertegenauigkeit ist eine Funktion des Bildmassstabs. Je grösser die Abbildung, desto höher ist die Genauigkeit. Weil der Bildmassstab aus ökonomischen Gründen nicht beliebig gross gewählt werden kann, ist die Messgenauigkeit beschränkt.
- Messtechnisch gute Aufnahmen brauchen günstige Aufnahmebedingungen. Es muss genügend Auflicht vorhanden sein, und das zu vermessende Gebiet oder Objekt muss auch in feinen Strukturen gute Helligkeits- oder Farbkontraste aufweisen.
- Photogrammetrische Vermessungen bedingen heute noch hohe Investitionen in Geräte und speziell ausgebildete Operateure. Mit dem Aufkommen der digitalen Bildverarbeitung, die aber heute noch nicht auf operationellem Entwicklungsstand ist, wird diese Sonderstellung der Photogrammetrie in der Vermessungstechnik an Bedeutung verlieren.

5.4 Photogrammetrische Messmethoden und ihre Genauigkeiten

Die Hauptaufgabe der Photogrammetrie ist die Erstellung von Karten und Plänen aus Luftbildern. Als Grundlage dienen Einzelmodelle. Der mittlere Lagefehler der Auswertung beträgt dabei etwa 0,1 Promille und der mittlere Höhenfehler 0,15 Promille der Flughöhe über Grund, was bei den üblicherweise verwendeten Messkamern und einem Bildmassstab von 1:5000 etwa 10 cm Lagefehler und 15 cm Höhenfehler entspricht.

Genauere, punktweise Auswertungen sind heute dank der digitalen Rechentechnik möglich. Bei der als «Aerotriangulation nach dem Bündelverfahren» bezeichneten Mess- und Berechnungsmethode werden nicht mehr nur zwei Bilder gleichzeitig als Modell ausgewertet, sondern es wird ein Bildverband gebildet, d. h. ein Block aus vielen Luftbildern, deren Aufnahmegebiete sich sowohl in Flugrichtung wie quer dazu um 60% überdecken. Bei dieser Aufnahme disposition werden gleiche Geländeabschnitte in bis zu neun Photos abgebildet. In den Überdeckungsgebieten werden die Bildkoordinaten von Punkten, die in allen Bildern gut identifizierbar sind, zur Bildverknüpfung gemessen. Diese Messungen und die der Fest- und Kontrollpunkte bilden mit den Landeskoordinaten der Festpunkte als Sollwerte Fehlergleichungssysteme mit Tausenden von Unbekannten, die mit heutigen Computern leicht lösbar sind. Die Mehrfachmessung der Punkte in

national, considérées comme valeurs données, des systèmes d'équations aux erreurs à plusieurs milliers d'inconnues qui sont facilement solvables avec les ordinateurs actuels. La mesure redondante des points apparaissant sur des photos différentes améliore aussi bien la précision que la fiabilité de la détermination des points par comparaison à la restitution sur la base du modèle unique.

Par l'aérottriangulation, on atteint une précision tant planimétrique qu'altimétrique de 0,5 ‰ du dénominateur de l'échelle en centimètres. Ainsi pour une image à l'échelle de 1:4000, l'erreur moyenne à craindre sur la position d'un point est de 2 cm. L'étendue des ensembles est presque illimitée car plusieurs centaines de photos aériennes peuvent être combinées en un bloc. L'aérottriangulation présente une propagation des erreurs très favorable puisque la précision ne dépend pratiquement pas de l'étendue du bloc. La précision relative entre deux points éloignés l'un de l'autre est ainsi très élevée.

Un autre procédé précis de mesure sur photos sera présenté au chapitre suivant. Il n'a cependant de signification que pour l'analyse de faibles déformations spatiales.

verschiedenen Bildern steigert sowohl die Genauigkeit wie auch die Zuverlässigkeit der Punktbestimmung im Vergleich zur Auswertung aus dem Einzelmodell.

Mit Aerotriangulationen wird eine Lage- und Höhen-genauigkeit von 0,5 Promille der Bildmassstabszahl in Zentimeter erreicht. So beträgt beispielsweise bei einem Bildmassstab von 1:4000 der mittlere Punktfehler 2 cm. Die Ausdehnung der Bildverbände ist fast unbegrenzt, denn es können mehrere hundert Luftbilder zu einem Aeroblock verknüpft werden. Die Aerotriangulation weist eine sehr günstige Fehlerfortpflanzung auf, indem die Genauigkeit kaum von der Ausdehnung des Blockes abhängig ist. Für weit auseinanderliegende Punkte ergibt sich somit eine sehr hohe Relativgenauigkeit.

Ein weiteres, präzises Verfahren der Bildmessung, das aber nur zur Analyse kleinräumiger Deformationen Bedeutung hat, werden wir im nächsten Kapitel vorstellen.

Figure 5.1. Déplacements de terrain analysés sur la base des photos aériennes de l'Office fédéral de topographie de 1957, 1969, 1974, 1980 et 1982. Les flèches indiquent les déplacements moyens annuels (selon Kölbl O., Stuby J.J. [20]).

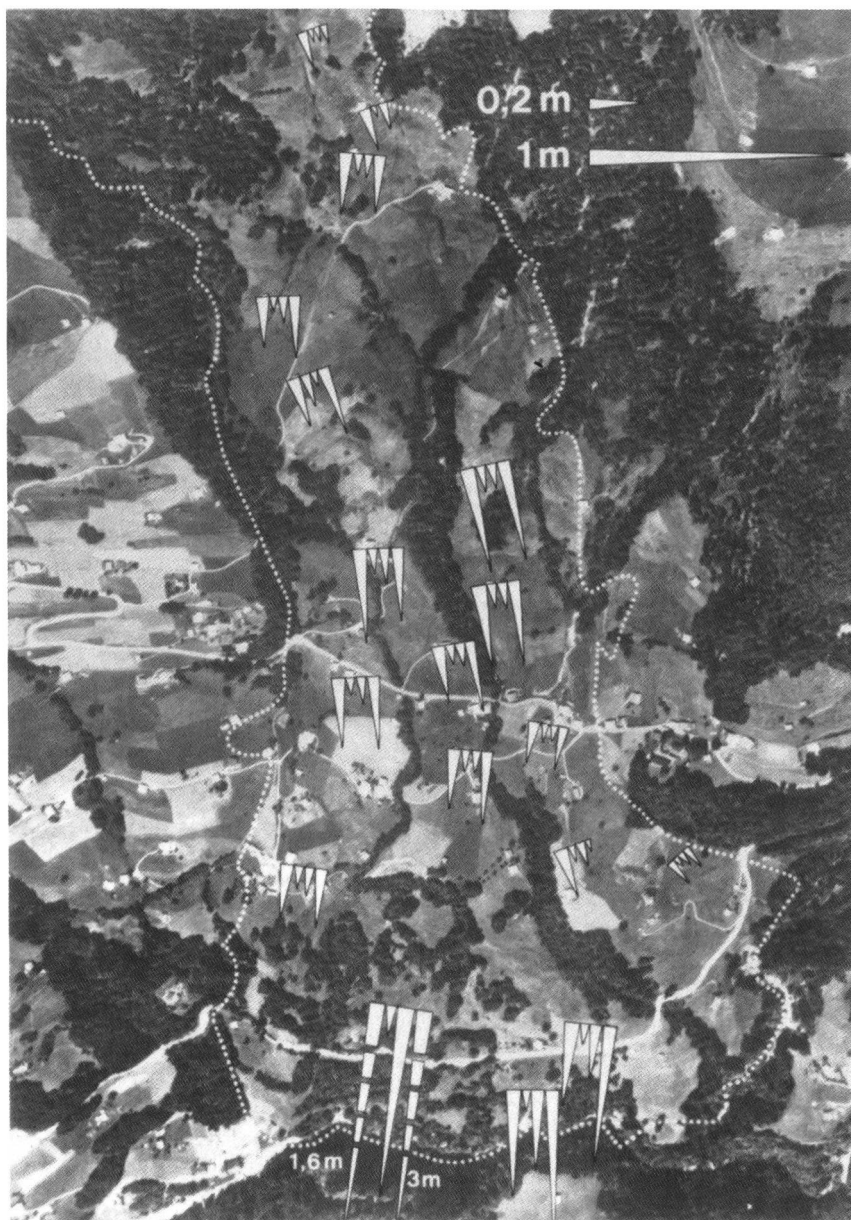


Bild 5.1. Analyse von Geländerutschungen aus Luftaufnahmen des Bundesamts für Landestopographie von 1957, 1969, 1974, 1980 und 1982. Die Pfeile zeigen die mittleren jährlichen Verschiebungen (aus Kölbl O., Stuby J.J. [20]).

5.5 La photogrammétrie utilisée pour la surveillance des ouvrages de retenue

5.5.1 Contrôle photogramétrique des barrages

La surveillance des déformations des ouvrages demande une précision de l'ordre du millimètre. Cette exigence peut être satisfaite par la photogrammétrie terrestre en procédant à une exploitation point par point selon le principe de l'aérotriangulation mais n'est guère rentable. Pour que l'erreur moyenne ne dépasse pas 3 mm, il conviendrait de choisir des images à l'échelle du 1:500. A cette échelle et en utilisant une chambre photogramétrique terrestre, la surface utilisable de l'image serait de 20 x 20 m. Pour de grands objets, il faudrait donc prendre un nombre considérable de photos.

Les prises de vue aériennes d'une échelle supérieure au 1:2000 sont problématiques. Les avions volent trop rapidement et doivent être remplacés par des hélicoptères ce qui est très onéreux.

Pour la surveillance des ouvrages, la méthode photogramétrique sera toujours plus coûteuse que les méthodes de mensuration conventionnelles à cause de la haute précision exigée. L'emploi de la photogrammétrie est justifié tout au plus si de nombreux points difficilement accessibles doivent être mesurés.

5.5.2 Mesures de déplacements dans le bassin de retenues

La photogrammétrie se prête par contre très bien à la surveillance de mouvements de terrain de l'ordre du centimètre ou du décimètre. Les possibilités des procédés photogramétriques pour la mesure des déformations sont loin d'avoir été épuisées à ce jour.

Comme les points fixes et les points de contrôle peuvent être vus plus facilement d'un avion que d'un point de stationnement terrestre, moins de contraintes influeront sur l'établissement du réseau que dans le cas de mesures terrestres. Les prises de vue photogramétriques et la restitution seront normalement plus rapides et moins coûteuses que les mesures au théodolite. Ceci est plus particulièrement vrai pour les zones étendues ou lorsque la mesure doit être répétée fréquemment.



5.5 Die Photogrammetrie als Messmethode zur Überwachung von Stauanlagen

5.5.1 Photogrammetrische Kontrollen von Talsperren

Deformationskontrollen von Bauten verlangen eine Genauigkeit im Millimeterbereich. Diese ist mit terrestrischer Photogrammetrie bei punktwiser Auswertung nach dem Prinzip der Aerotriangulation zwar erreichbar, aber kaum wirtschaftlich. Um einen mittleren Fehler von beispielsweise 3 mm einzuhalten, müsste ein Bildmassstab von 1:500 gewählt werden. Die nutzbare Bildfläche beträgt bei diesem Massstab und dem Einsatz einer terrestrischen Messkammer aber nur noch 20 x 20 m, d.h. für grössere Objekte müsste eine grosse Zahl von Bildern aufgenommen werden.

Aufnahmen von Luftbildern im Bildmassstab grösser als 1:2000 sind problematisch. Flächenflugzeuge fliegen zu rasch; es müssten Bilder aus Helikopter gemacht werden, was sehr aufwendig ist.

Die photogrammetrische Methode wird beim hohen Genauigkeitsanspruch der Bauwerksüberwachung immer aufwendiger sein als konventionelle Vermessungen. Der Einsatz der Photogrammetrie könnte allenfalls gerechtfertigt sein, wenn sehr viele schlecht zugängliche Punkte eingemessen werden müssten.

5.5.2 Verschiebungsmessungen im Einzugsgebiet von Stauanlagen

Zur Überwachung von Geländebewegungen, die im Zentimeter- oder Dezimeterbereich liegen, eignet sich die Luftphotogrammetrie hingegen sehr gut. Die Möglichkeiten photogrammetrischer Verfahren zur Deformationsvermessung sind bislang zu wenig ausgeschöpft worden.

Weil die Fest- und die Kontrollpunkte aus der Luft besser eingesehen werden können als von terrestrischen Standpunkten aus, ergeben sich bei der Disposition der Messanlage weniger Einschränkungen als bei terrestrisch zu messenden Netzen. Die photogrammetrische Aufnahme und Auswertung wird im Normalfall rascher und billiger sein als die Vermessungen mit dem Theodolit. Dies gilt vor allem bei ausgedehnten Aufnahmegebieten oder wenn die Vermessung häufig zu repetieren ist.

Je nach der verlangten Genauigkeit kommen verschiedene Methoden zum Einsatz:

Wo Bewegungen von wenigen Zentimetern pro Jahr kritisch sein können, sind signalisierte Punkte mit dem präzisen, vorstehend beschriebenen Verfahren der Aerotriangulation nach der Strahlenbündelmethode zu bestimmen. Als Beispiele können die von Grün et al. publizierte Testmessung am Heizenberg [18] und die Arbeiten von Prandervand im Testfeld von Echallens [19] dienen.

Wenn die Deformationen zwischen den Aufnahmeterminen mehrere Dezimeter betragen und somit keine hohe Messgenauigkeit verlangt wird, kann die kostspielige Versicherung und Signalisierung von Messpunkten im Gelän-

Figure 5.2. Glacier suspendu du Weisshorn au-dessus de Randa. Lignes d'égales déformations en cm/jour, pour la période du 13 au 25 mai 1973.

Bild 5.2. Hängegletscher am Weisshorn ob Randa. Linien gleicher Deformationen in cm pro Tag im Zeitraum vom 13. bis 25. Mai 1973.

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.

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).

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. 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).

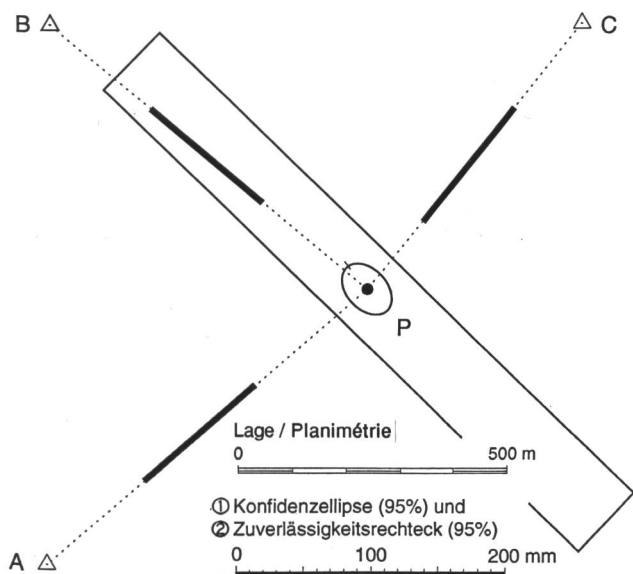


Figure 6.1. Exemple d'une bonne précision et d'une mauvaise fiabilité. 1 Ellipse de confiance (95%). 2 Rectangle de fiabilité (95%).

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

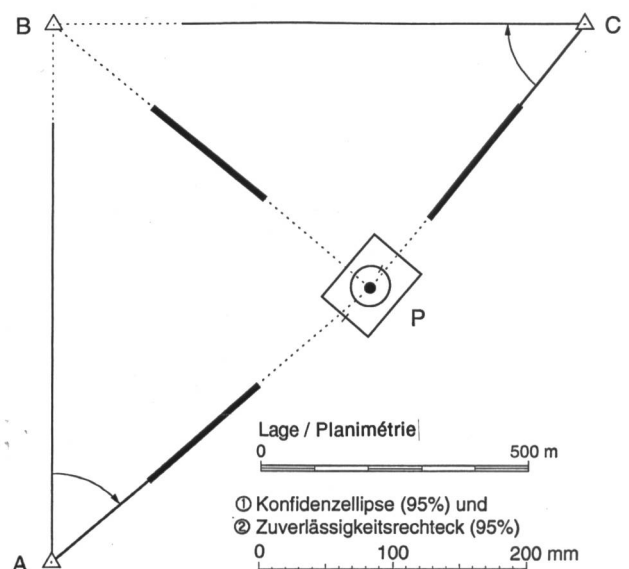


Bild 6.2. Beispiel für eine gute Genauigkeit und eine gute Zuverlässigkeit. Zwei zusätzliche Winkel auf A und B führen zu einer wesentlichen Zuverlässigkeitsverbesserung gegenüber Bild 6.1. Die Genauigkeit ändert nur unwesentlich.

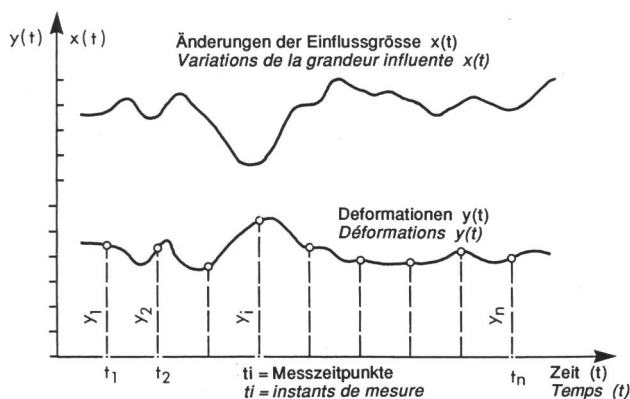


Figure 6.3. Saisie de déformations $y(t)$ provoquées par les variations non contrôlables d'une grandeur influente $x(t)$.

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.

tereinflüsse 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-

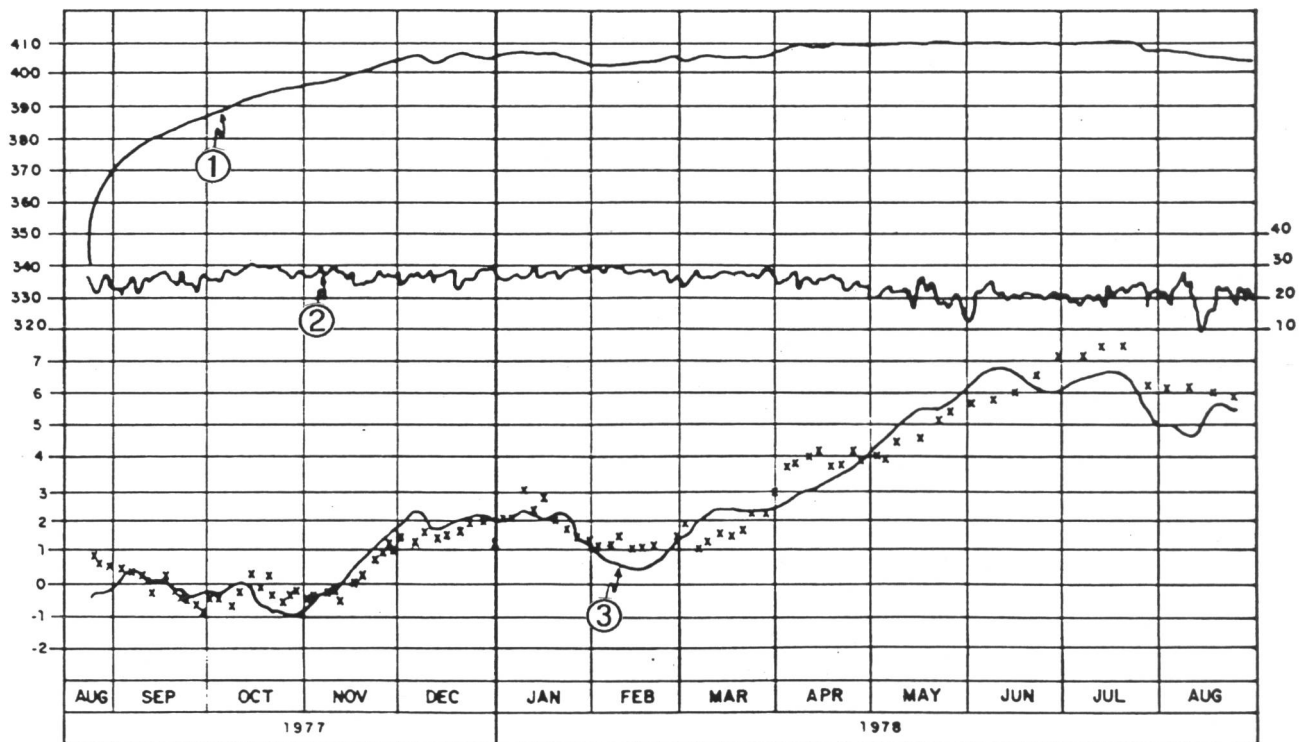


Figure 6.4. Barrage de São Simão (Brésil) [26].

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 Festpunktbewegungen 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

puisse interpoler entre les points du système réduit et entre les valeurs observées des séries temporelles.

L'exploitation des observations géodésiques diffère dans le détail de celle des séries temporelles. Les observations géodésiques ne sont ni commodes, ni parlantes pour l'analyse du comportement des points du système réduit. C'est pourquoi elles sont transformées en coordonnées avant l'analyse, une opération qui malgré l'aide de l'informatique ne s'est pas encore débarrassée de toutes les craintes qu'elle suscite. Une partie de ces craintes provient du fait que les observations ne se succèdent pas assez rapidement dans le temps, ce qui oblige souvent à faire des hypothèses sur l'origine des tiraillements.

La surveillance d'ouvrages ne s'appuie pas que sur les observations, mais aussi sur une analyse très personnelle basée sur l'opinion des experts. Ce jugement n'est pas quantifiable comme une observation, mais il constitue néanmoins un avis important sur la stabilité ou l'évolution de paramètres qui ne sont pas mesurables techniquement. L'expertise conduit souvent à une extension du dispositif de mesure, permettant de quantifier et d'objectiver les phénomènes qui ont justifié cette extension. De cas en cas, on choisit et réglemente la fréquence des observations.

1.2 Mesures automatiques et mesures manuelles

La saisie automatique de grandeurs physiques et chimiques assistée par ordinateur fait aujourd'hui partie de la routine de n'importe quel laboratoire. Pour ce faire, le commerce propose un immense choix de capteurs.

Des grandeurs géométriques telles que des inclinaisons, des élongations, des distances, intégrées dans un dispositif de mesure bien conçu, donnent une bonne image des déplacements par rapport à une situation de départ [31]. Là encore, les capteurs nécessaires sont disponibles sur le marché. Les grandeurs géométriques servent souvent d'intermédiaire pour d'autres grandeurs non directement observables; par exemple, on calcule souvent des contraintes à partir d'élongations observées.

Les méthodes optiques automatiques sur de longues distances sont toujours assez difficiles, à cause de la difficulté à réaliser des pointés automatiques. C'est particulièrement vrai pour toutes les méthodes géodésiques.

Pour les grandeurs géodésiques de type «direction horizontale» et «angle vertical», en l'absence d'instruments capables de respecter un critère précis de pointé, il a fallu attendre jusqu'en 1990 pour disposer de solutions. Celles-ci utilisent le plus souvent un rayon de visée actif – un laser dans l'instrument de mesure ou un émetteur situé au point visé – et un traitement d'image [3], [28], [29], [6].

Depuis la même époque, on trouve sur le marché des niveaux capables de lire sans émetteur actif une mire passive, grâce à un traitement d'image (NA 2000 et NA 3000 de Leica). Ils sont incapables de chercher un objet à viser, mais par contre le traitement d'image autorise toujours une connexion directe sur un ordinateur. De même, un distancemètre est incapable en soi de chercher une cible, mais en tant qu'appareil entièrement électronique, il est, comme aussi tout récepteur GPS, totalement compatible avec la technique informatique. En outre, pour les récepteurs GPS, le pointé vers une cible n'est pas nécessaire, et le besoin d'une reconnaissance locale des cibles disparaît.

Pour autant que ce soit techniquement possible, l'introduction de procédés de mesure automatisés vise toujours

voraus, dass zwischen den Punkten des Ersatzsystems und zwischen den Messwerten der Zeitreihen interpoliert werden kann.

Die Auswertung der geodätischen Messwerte weicht von der Behandlung von Zeitreihen in Einzelheiten ab. Geodätische Messwerte sind zur Beurteilung des Verhaltens der Punkte des Ersatzsystems unbequem und unübersichtlich. Die Messwerte werden deshalb vor weiteren Analysen zu Koordinaten umgeformt, ein Unterfangen, das trotz Computer immer noch nicht allen Schrecken verloren hat. Ein Teil des Schreckens rührt davon her, dass die Messwerte in der Zeitreihe zu wenig dicht aufeinanderfolgen. Über die Ursachen der Fehlereinflüsse muss deshalb oft spekuliert werden.

Die Überwachung von Objekten stützt sich nicht nur auf Messungen, sondern ebenso sehr auf ein persönliches, auf Anschauung beruhendes Urteil von Experten. Dieses Urteil ist nicht in Einheiten messbar wie ein Messwert, wohl aber ist es ein wichtiger Hinweis auf die Konstanz oder die Veränderung von messtechnisch nicht erfassten Parametern. Das Urteil führt oft zu einer Erweiterung des Messsystems, womit die Ursachen, die dazu geführt haben, numeriert und objektiviert werden.

Die Häufigkeit der Erhebung von Messwerten wird fallweise entschieden und reglementiert.

1.2 Automatische Messungen und Handmessungen

Die automatische, computergesteuerte Erfassung von physikalischen und chemischen Messgrößen gehört in jedem Labor zum Alltag. Die hierfür erforderlichen Sensoren sind in grosser Vielfalt auf dem Markt.

Geometrische Größen, wie Neigungen, Dehnungen, Abstände usw., geben bei geschickter Anlage des Messsystems ein gutes Bild über Bewegungen relativ zu einer Ausgangslage [31]. Die Sensoren sind ebenfalls marktüblich. Geometrische Größen dienen oft zur mittelbaren Messung von nicht direkt messbaren Größen, z.B. werden Spannungen aus gemessenen Dehnungen berechnet.

Automatische optische Messverfahren zur Überbrückung grösserer Distanzen sind immer aufwendig. Der Grund liegt in den Schwierigkeiten, automatisch zu zielen. Davon sind insbesondere alle geodätischen Messverfahren betroffen.

Für die beiden geodätischen Messgrößen Horizontalrichtung und Vertikalwinkel sind wegen des Fehlens eines gerätetechnisch einfach zu realisierenden Zielkriteriums erst um 1990 Lösungen präsentiert worden. Sie beruhen zumeist auf einem aktiven Zielstrahl – einem Laser im Messgerät oder einem Sender im Zielpunkt – und auf Bildverarbeitung. Um die gleiche Zeit erschienen Nivellierinstrumente auf dem Markt, die ohne aktive Sender mit Hilfe der Bildverarbeitung [3], [28], [29], [6] eine passive Skala ablesen können (NI 2000 und NI 3000 von Leica). Ein Ziel können sie allerdings nicht suchen, die Bildverarbeitung ermöglicht hingegen immer einen direkten Anschluss an einen Computer. Auch ein Distanzmesser kann ein Ziel nicht selbstständig suchen, er ist jedoch als vollelektronisches Gerät ebenso wie ein GPS-Empfänger seit dem Erscheinen computerkompatibel. Bei GPS-Empfängern ist zudem jede Ausrichtung auf ein Ziel unnötig, womit auch jede örtliche Erkennung eines Zieles dahinfällt.

Vorausgesetzt, es sei technisch möglich, werden automatische Messverfahren im Prinzip immer zur Verbesserung eines schlechten Kosten/Nutzen-Verhältnisses von Handmessungen eingesetzt. Anders ausgedrückt sind es

à améliorer le mauvais rapport coût/rendement d'observations manuelles. En d'autres termes, on y trouve deux avantages principaux: d'une part des séries temporelles beaucoup plus denses, et d'autre part l'intégration de la saisie et de l'exploitation des valeurs observées dans un système d'information ou dans un système-expert. Pris en détail, les besoins suivants parlent en faveur des observations automatisées:

- Accès permanent aux valeurs mesurées et aux calculs standards. Dans le réseau de communication général de l'entreprise, l'état mesuré le plus récent est toujours disponible sous la forme d'un graphique à l'écran, de tableaux, etc. [30].
- Documentation détaillée du comportement normal. Caractérisation du comportement normal à l'aide d'une analyse numérique plutôt que d'un examen visuel du diagramme des mesures en fonction du temps.
- Maîtrise technique des mesures lors de situations exceptionnelles. La connaissance du comportement normal permet de tester toute nouvelle situation, sans perte de temps – voire automatiquement – par rapport à l'hypothèse d'un comportement déviant.
- Documentation de changements à court terme ou de nouveaux phénomènes locaux. Saisie des paramètres qui en sont probablement responsables. Le coût d'observations manuelles peut être prohibitif.
- Surveillances en phase de révision ou de transformations difficiles, ou documentation de phénomènes locaux. Suivi et documentation de comportements normaux ou exceptionnels, avant, pendant et après cette phase.
- Mise en évidence de l'influence de paramètres inconnus sur les grandeurs observées, par l'analyse de séries temporelles.
- Surveillance de zones de terrain ou de rocher menacées d'éboulement. But primaire: documentation du comportement normal en fonction des intempéries, du cycle journalier et saisonnier, etc. But secondaire: actualisation permanente du pronostic sur l'évolution probable de la situation [4].

Un dispositif de mesure automatique peut être en tout temps complété par la pose de capteurs supplémentaires. L'exploitation du matériel d'observation selon de nouveaux critères peut exiger la création de nouvelles fonctions logicielles.

Les problématiques ainsi décrites illustrent bien, outre les avantages des mesures automatisées, l'évolution de l'importance des composantes isolées d'un dispositif de mesure. Autrefois, ce sont les capteurs eux-mêmes qui concentraient l'intérêt; aujourd'hui, c'est leur connexion en réseau et la gestion du système. Des possibilités d'adaptation à de nouveaux besoins doivent évidemment être prévues.

1.3 Structure des systèmes de mesure automatiques

Les systèmes de mesure automatiques peuvent être décomposés en quatre secteurs (figure 1):

- capteurs et actionneurs
- système informatique et logiciels
- télécommunication
- alimentation électrique

Ces quatre secteurs correspondent aussi aux quatre principaux groupes de problèmes à résoudre. L'état de la technique permet, dans une large mesure, de les traiter séparément. C'est particulièrement vrai pour les capteurs et les actionneurs, et pour la télécommunication.

folgende zwei Hauptgründe: einerseits dichtere Zeitreihen, andererseits die Integration von Erfassung und Auswertung der Messwerte in ein Informations- oder Expertensystem. Im einzelnen sprechen folgende Wünsche zugunsten von automatischen Messungen:

- Ständige Verfügbarkeit von aktuellen Messwerten und Standardauswertungen. Im gesamten Kommunikationsnetz des Werkes steht der aktuelle Stand in Form von Bildschirmgrafik, Tabellen usw. zur Verfügung [30].
- Detaillierte Dokumentation des Normalverhaltens. Beurteilung des Normalverhaltens anhand einer numerischen Datenanalyse anstelle einer visuellen Beurteilung der Messwert-Zeit-Diagramme [30].
- Messtechnische Beherrschung von Ausnahmesituationen. Die Kenntnis des Normalverhaltens erlaubt, jede neue Situation ohne Zeitverlust – gegebenenfalls automatisch – auf Verträglichkeit mit der Hypothese einer Abweichung zu prüfen.
- Dokumentieren kurzfristiger Änderungen oder neuer lokaler Phänomene. Erfassen der vermutlich dafür verantwortlichen Parameter. Der Aufwand für Handmessungen kann prohibitiv sein.
- Überwachen heikler Revisions- oder Umbauphasen oder zur Dokumentation von lokal auftretenden Phänomenen. Verfolgung und Dokumentation des normalen und ausserordentlichen Verhaltens vor, während und nach dieser Phase.
- Aufdecken der Einflüsse von unbekannten Parametern auf die Messgrößen durch Zeitreihenanalyse.
- Überwachung von absturzgefährdeten Fels- und Geländezonen. Primäres Ziel: Dokumentation des Normalverhaltens in Funktion der Witterung, der Tages- und der Jahreszeit usw. Sekundäres Ziel: kontinuierlich aktualisierte numerische Prognose des mutmasslichen weiteren Ablaufes [4].

Eine bestehende automatische Messanlage lässt sich jederzeit durch Anschliessen neuer Sensoren erweitern. Die Überarbeitung des vorhandenen Beobachtungsmaterials nach neuen Kriterien erfordert eventuell gewisse neue Software-Funktionen.

Die aufgeführten Problemkreise verdeutlichen neben der Zweckmässigkeit automatischer Messungen auch die Wandlung der Bedeutung der einzelnen Komponenten eines Messsystems. Standen früher eindeutig die Sensoren im Zentrum des Interesses, so ist es heute die Vernetzung aller Sensoren und die Steuerung des Messsystems. Die Möglichkeit zu Anpassungen an neue Bedürfnisse wird beinahe schon als selbstverständlich vorausgesetzt.

1.3 Struktur von automatischen Messsystemen

Automatische Messsysteme lassen sich in vier Bereiche gliedern (Bild 1).

- Sensoren und Aktoren
- Computersystem mit Software
- Telekommunikation
- Energieversorgung

Diese vier Bereiche sind gleichzeitig auch die vier wesentlichen Problemkreise. Der Stand der Technik erlaubt eine weitgehend unabhängige Behandlung jedes Bereiches. Dies trifft insbesondere auch für die Sensorik und Aktorik sowie für die Telekommunikation zu [5].

1.3.1 Sensoren und Aktoren

Sensoren liefern die Ausgangsinformation in Form von Messwerten. Ihre Gewinnung wird softwaremässig ge-

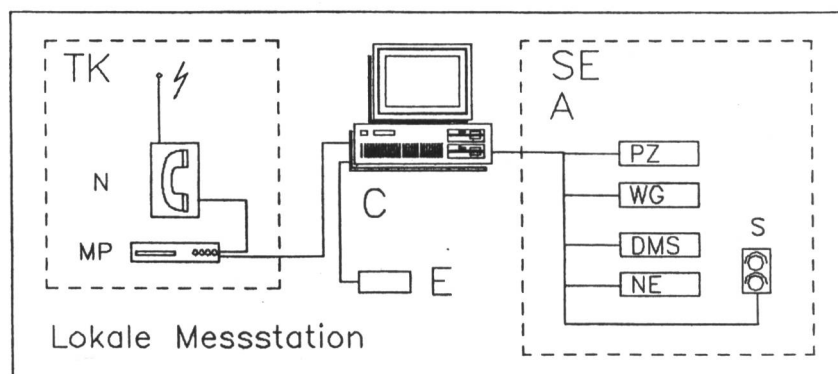
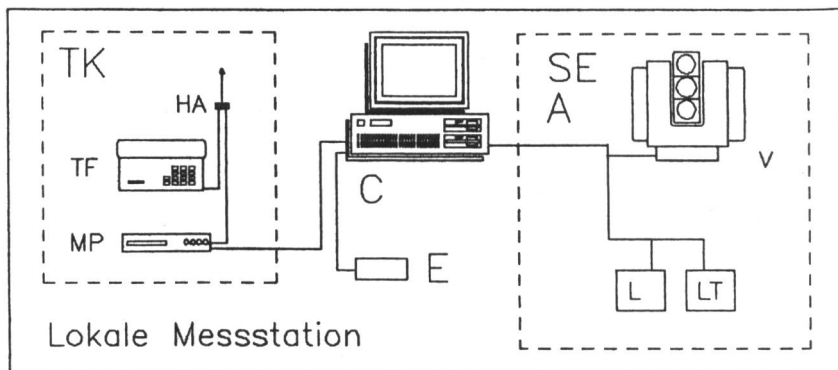
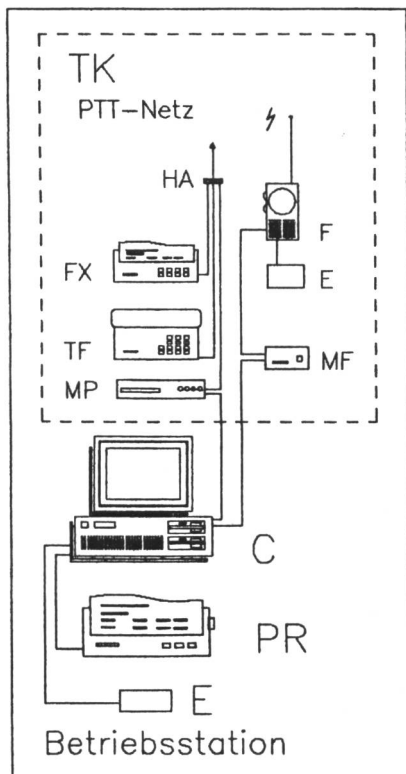


Figure 1

SE, A Capteurs, actionneurs [31]

Acquisition de l'information-output sur les grandeurs physiques et géométriques nécessaires; transfert analogique ou numérique par un système-bus.

V Instruments de mesure géodésiques

L Laser

LT Cibles laser

C Système informatique, logiciel [31]

PC ou Laptop, exploitation du système de mesure, mesure de gradients des valeurs observées, élaboration des résultats, exécution d'opérations telles que le transfert de données ou le pilotage d'installations.

PR Imprimante

TK Télécommunication [31]

Echange de données entre une station d'exploitation et des stations locales d'observation, pilotage à distance des stations locales d'observation.

TF Téléphone

MP Modem pour réseau PTT

F Emetteur-radio

E Alimentation en énergie

Réseau 220V, énergie solaire, batteries ou groupes électrogènes de secours.

WG

Capteurs de déplacement

DMS Jauges de dilatation

NE Capteurs d'inclinaison

S Avertisseurs

MF Modem pour émetteur-radio

N Natel

HA Raccordement au réseau PTT

PTT

Bild 1.

SE, A Sensoren, Aktoren [31]

Gewinnung der Ausgangsinformation über die erforderlichen physikalischen und geometrischen Grössen, Übermittlung der Messwerte analog oder digital über ein Bus-System.

V digitale Vermessungsinstrumente

L Laser

LT Laser-Targets

PZ Piezometer

C Computersystem, Software [31]

PC oder Laptop, Betrieb des Messsystems, Messung von Gradienten der Messwerte, Aufbereitung von Resultaten, Ausführen von Aktionen, z.B. Datenübermittlung, Steuern von Anlagen.

PR Printer

TK Telekommunikation [31]

Datenverkehr zwischen einer Betriebsstation und den lokalen Messstationen, Fernsteuerung der lokalen Messstationen.

TF Telefon

MP Modem für PTT-Netz

F Funkgerät

FX Fax

E Energieversorgung

220-V-Netz, Solarenergie, Batterien oder Notstromgruppen.

WG Weg-Geber

DMS Dehnmessstreifen

NE Neigungsmesser

S Signalanlagen

1.3.1 Capteurs et actionneurs

Les capteurs fournissent l'information initiale sous la forme de valeurs mesurées. Leur acquisition est gérée par un logiciel. Selon le type de capteur, une mesure numérique est transmise à l'ordinateur par un système de bus, ou bien c'est le logiciel qui connecte un capteur donné au convertisseur analogique-digital de l'ordinateur grâce à un multiplexeur. La tendance s'oriente nettement vers les systèmes de bus. Ils offrent l'avantage que le câblage des

steuert. Je nach Typ des Sensors wird ein digitaler Messwert über ein Bus-System zum Computer übermittelt, oder die Software schliesst über einen Multiplexer einen bestimmten Sensor an den Analog-Digital-Wandler im Computer an. Die Entwicklung geht deutlich in die Richtung von Bus-Systemen. Sie haben den Vorteil, dass die Verkabelung der einzelnen Sensoren sehr einfach ist. Ein einziges Kabel führt von der Schnittstelle des Computers zum ersten Sensor, von diesem zum nächsten usw. Jeder Sensor verfügt über eine Adresse, über die der Computer

capteurs individuels est très simple. Un seul câble relie l'interface de l'ordinateur au premier capteur, de celui-ci au suivant, etc. Chaque capteur dispose d'une adresse qui lui permet de dialoguer avec l'ordinateur. La technique analogique exige un câblage séparé de chaque capteur avec le multiplexeur.

Les actionneurs sont des éléments pilotés par un logiciel et exécutant certaines actions, tels que signaux, ventilateurs, pompes, etc.

1.3.2 Système informatique et logiciels

Les possibilités de calcul et de mémoire des PC permettent aujourd'hui d'exploiter un dispositif de mesure comptant plusieurs centaines de capteurs. La difficulté principale lors du choix d'un ordinateur était autrefois constituée par les problèmes de compatibilité; elle s'est peu à peu déplacée sur le choix des équipements numériques associés. Le système-bus et la télécommunication sont un aspect très important.

Il serait faux de sous-estimer la sécurité de fonctionnement de l'installation de mesure. On ne pense pas d'abord ici aux perturbations provoquées par des champs électromagnétiques – qu'on peut éviter par les précautions habituelles – mais aux pannes d'ordinateur. A la place d'un seul ordinateur coûteux, on installera avec beaucoup plus d'efficacité un système redondant composé de deux ou trois PC normaux connectés en réseau. Ainsi conçu, le système restera avec une très haute probabilité apte en permanence à la télécommunication. En cas de panne de l'un des ordinateurs, l'autre peut l'annoncer à la centrale d'exploitation. La défection de capteurs isolés n'a pas d'influence sur le reste du système.

Le logiciel est en mesure de constater des variations très rapides. Par l'observation simultanée à intervalles de temps pré-définis (mode conventionnel) et selon les gradients (dépassement d'une différence donnée entre deux valeurs observées dans un laps de temps défini), le volume des valeurs mémorisées n'augmente pas excessivement, même lorsqu'on saisit des variations rapides. Toutes les fonctions de mesure, de mémorisation et de calcul sont regroupées dans un cycle de mesure.

Les fonctions du logiciel vont de la production de graphiques sur simple pression d'un bouton jusqu'aux analyses périodiques des mesures les plus complexes. Au vu des résultats de ces analyses, des actionneurs peuvent être enclenchés automatiquement. L'analyse des données se fait soit on-line à la station de mesure, soit en traitement différé. La télécommunication vers un réseau d'échange de données est une fonction importante du logiciel.

1.3.3 Télécommunication et alimentation

Un dispositif de mesure communique avec le monde extérieur par l'intermédiaire d'accessoires tels que modem, fax-modem (en plus des fonctions modem habituelles pour l'envoi d'informations sur le fax du destinataire), Natel et radio-émetteurs. On pense d'abord à l'échange de données via le réseau PTT. Les modems et les fax-modems nécessitent un module de logiciel disponible sur le marché. La télécommunication fonctionne dans les deux sens et n'est pas limitée à l'échange de données; elle permet de modifier certains paramètres des logiciels d'exploitation, voire même d'échanger des parties entières de logiciel. Ainsi, le logiciel n'est pas seulement pilotable à distance, mais aussi modifiable à distance. L'alimentation en énergie, à proximité des barrages, ne pose aucun problème.

mit ihm verkehrt. Die Analog-Messtechnik erfordert eine separate Verkabelung jedes Sensors bis zum Multiplexer.

Aktoren sind softwaremässig gesteuerte Elemente, die bestimmte Aktionen ausführen können. Darunter fallen Signalanlagen, Ventile, Pumpen usw.

1.3.2 Computersystem mit Software

Die Rechen- und Speicherkapazität von PCs reicht heute für die Bewirtschaftung eines Messsystems mit mehreren hundert Sensoren aus. War früher wegen Kompatibilitätsfragen die Evaluation eines Computers von zentraler Bedeutung, so hat sich die Aktivität allmählich auf die Auswahl der übrigen Digital-Ausrüstung des Messsystems verlagert. Vor allem das Bus-System und die Telekommunikation sind wesentlich.

Nicht zu unterschätzen ist die Betriebssicherheit der Messanlage. Dabei stehen nicht so sehr die Störungen wegen elektromagnetischer Felder im Vordergrund – sie werden mit gleichen Massnahmen wie bis anhin zu beherrschen versucht –, sondern die Ausfallrate der Computer. Anstatt einen einzigen, teuren und schlecht zu wartenden Industrie-Computer einzusetzen, wird mit viel mehr Effizienz ein redundantes System aus zwei oder drei untereinander vernetzten normalen PC installiert. Damit bleibt das System über Telekommunikation mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ständig ansprechbar. Bei Ausfall eines Computers erstattet der überlebende Computer eine entsprechende Meldung an die Betriebszentrale. Der Ausfall einzelner Sensoren hat keinen Einfluss auf das übrige Messsystem.

Die Software ist in der Lage, kurzfristige Veränderungen festzustellen. Durch die gleichzeitige Messung in definierbaren Zeitintervallen (konventionelle Art) und nach Gradienten (Überschreiten einer definierbaren Differenz zwischen Messwerten, die in einem definierbaren Zeitintervall aufeinanderfolgen) steigt die gespeicherte Datenmenge auch bei Erfassung kurzfristiger Änderungen nicht über alle Grenzen. Alle Mess-, Speicher- und Auswertefunktionen sind zu einem Messzyklus zusammengefasst.

Die Funktionen der Software reichen von der Berechnung von Grafiken auf Knopfdruck bis zur periodischen, beliebig komplexen Datenanalyse. Aufgrund der Resultate dieser Analysen können automatisch Aktoren aktiviert werden. Die Datenanalyse kann on-line auf der Messstation oder im post processing erfolgen. Eine wesentliche Funktion der Software ist die Telekommunikation über ein Datenverkehrsnetz.

1.3.3 Telekommunikation und Energieversorgung

Ein Messsystem verkehrt mit der Aussenwelt mit Hilfe von Zusatzgeräten wie Modem, Fax-Modem (neben den üblichen Modem-Funktionen auch zum Versenden von Mitteilungen auf den Fax des Empfängers), Natel oder Funkgeräte. Im Vordergrund steht der Datenverkehr über das PTT-Netz. Die Modems und Fax-Modems erfordern ein besonderes Software-Modul, das auf dem Software-Markt beschafft wird. Die Telekommunikation läuft in beiden Richtungen und ist nicht nur auf den Datenverkehr beschränkt. Es können Software-Parameter zur Steuerung des Messsystems verändert werden, oder es können auch ganze Software-Teile ersetzt werden. Das Messsystem wird dadurch nicht nur fernsteuerbar, sondern auch manipulierbar. Die Energieversorgung von Messsystemen ist in der Nähe von Talsperren kein Problem.

1.4 Concepts

1.4.1 Le rôle des différentes parties d'un dispositif de mesure

On peut décrire ce rôle ainsi:

Les capteurs et les actionneurs fixent le but du dispositif. C'est par leur choix qu'on détermine qualitativement ses possibilités.

Le logiciel intègre les capteurs en un dispositif interdépendant. Il exécute les mesures, les mémorise, les exploite et extrait des résultats les conclusions prévues. Il connecte le système des points de mesure individuels à un système d'information ou à un système-expert. L'ordinateur, aujourd'hui, ne joue plus que le rôle d'un accessoire bon marché et disponible partout.

La télécommunication, qui garantit les échanges entre divers points de mesure et une centrale d'exploitation, peut être installée sans gros problème, si nécessaire. Le matériel se trouve dans le commerce; du point de vue fonctionnel, le logiciel est clairement défini. La télécommunication joue d'une manière générale un rôle tellement important qu'elle ne pose pratiquement plus de problème dans le cas des systèmes automatiques de mesure.

L'alimentation en énergie doit être résolue de cas en cas. Des difficultés peuvent survenir pour des systèmes autonomes. Jusqu'ici, les fabricants de capteurs et d'ordinateurs n'ont pas consacré beaucoup d'efforts à une réduction de la consommation d'énergie.

1.4.2 Capteurs et logiciels

Les capteurs et le logiciel fixent ensemble les possibilités du dispositif. Ils l'emportent en importance sur tout le reste, ordinateur compris. Il ne va pas encore de soi pour tout le monde que dans un dispositif de mesure automatique, le logiciel est en fait encore plus important que les capteurs. Etant donné son rôle capital pour les performances du dispositif, il faut lui accorder une place centrale dès la phase de conception.

Même lorsque le but du dispositif automatique de mesure ne consiste qu'à exécuter et à mémoriser des mesures, la sécurité des données et la nécessité de disposer immédiatement des résultats devrait conduire à inclure l'exploitation dans le logiciel. Cela reste vrai même s'il n'est utilisé que pour le stockage de mesures.

1.4.3 Echange de données entre les capteurs et l'ordinateur

Les réseaux nécessaires à l'échange de données entre les capteurs et l'ordinateur ne doivent pas être confondus avec les réseaux de télécommunication. Les premiers s'appuient depuis longtemps et de plus en plus sur des systèmes-bus disponibles dans le commerce. Dans des environnements électromagnétiques difficiles, ils utilisent même les fibres optiques bien connues en télécommunication. Toutes les composantes nécessaires à cette technique sont disponibles sur le marché des ordinateurs.

1.4.4 Extension d'un système de mesure existant

Lorsqu'un dispositif de mesure existant doit être complété, on peut connecter au système-bus tous les nouveaux capteurs nécessaires sans difficulté. Dans une structure où les extensions sont prévues, il n'est même pas nécessaire de modifier le logiciel.

1.4 Konzepte

1.4.1 Rolle der einzelnen Bereiche eines Messsystems

Sie lässt sich etwa wie folgt umschreiben:

Die Sensoren und Aktoren bestimmen den Zweck des Systems. Durch ihre Wahl werden seine qualitativen Fähigkeiten festgelegt.

Die Software integriert die Sensoren zu einem zusammenhängenden System. Sie löst die Messungen aus, speichert sie, wertet sie aus und zieht aus den Resultaten die vorgesehenen Schlüsse. Sie fasst das System der einzelnen Messstellen zu einem Informations- oder Expertensystem zusammen. Der Computer spielt heute nur noch die Rolle eines billigen und überall zu beschaffenden Zubehörs.

Die Telekommunikation zum Vermitteln des Verkehrs zwischen verschiedenen lokalen Messstationen und einer zentralen Betriebsstation wird bei Bedarf ohne grössere Probleme installiert. Die Hardware ist marktgängig, die Software ist funktional klar definiert. Das Fachgebiet der Telekommunikation spielt allgemein eine derart bedeutende Rolle, dass für automatische Messsysteme kaum neue Probleme auftreten.

Die Energieversorgung wird fallweise gelöst. Schwierigkeiten ergeben sich möglicherweise bei autonomen Messsystemen. Die Hersteller von Sensoren und Computern haben bis anhin nicht viele Gedanken an einen niedrigen Energieverbrauch verschwendet.

1.4.2 Sensoren und Software

Die Bereiche Sensoren und Software bestimmen zusammen die Möglichkeiten des Messsystems. Sie überragen an Bedeutung alle andern Bereiche bei weitem, den Computer eingeschlossen. Nicht Allgemeingut ist die Erkenntnis, dass in einem automatischen Messsystem die Software grundsätzlich wichtiger ist als die Sensoren. Wegen der zentralen Rolle für alle Eigenschaften eines Messsystems muss der Software auch bei der Konzipierung eine zentrale Rolle zukommen.

Wenn auch der Zweck eines automatischen Messsystems vielleicht nur im Sammeln und Speichern von Messwerten besteht, so sollte wegen der Datensicherheit und auch wegen der sofortigen Verfügbarkeit von Resultaten die Auswertung immer in die Software einbezogen werden. Die Software ist dafür konzipiert, auch wenn sie nur zum Speichern von Messwerten verwendet wird.

1.4.3 Datenverkehr zwischen Sensoren und Computer

Die für den Datenverkehr zwischen den Sensoren und dem Computer erforderlichen Netze sind nicht zu verwechseln mit den Telekommunikationsnetzen. Die Datenverbindungen zwischen Sensoren und Computer beruhen heute je länger je mehr auf marktgängigen Bus-Systemen. In elektromagnetisch heikler Umgebung werden für die Datenverbindungen ebenfalls die in der Telekommunikation weit verbreiteten Glasfasern verwendet. Alle dazu erforderlichen Komponenten gehören zum üblichen Computierzubehör.

1.4.4 Erweiterung eines bestehenden Messsystems

Falls das Messsystem erweitert werden soll, so können ohne Schwierigkeiten und mit einfachsten Mitteln die zusätzlich erforderlichen Sensoren am Bus-System angeschlossen werden. Softwaremodifikationen sind wegen

1.5 Les possibilités

1.5.1 Systèmes de mesure fixes ou mobiles

Le plus souvent, les systèmes de mesure sont prévus pour une surveillance de longue durée. C'est pourquoi ils sont installés sans perspective d'un éventuel démontage.

Par contre, la surveillance temporaire de petits objets exige des systèmes faciles à installer et à démonter. L'état de la technique, dans les quatre secteurs décrits sous 1.3, permet de mettre en œuvre sans difficulté des systèmes mobiles comptant 5 à 10 capteurs – y compris des instruments géodésiques digitaux. Leur confort d'utilisation est comparable à celui des instruments géodésiques.

1.5.2 Systèmes de mesure autonomes ou alimentés par le réseau

Les systèmes de mesure autonomes ne disposent pas de télécommunication. C'est pourquoi ils se limitent en général au stockage des données et exigent le renouvellement périodique de leur support de données. Une autonomie d'alimentation, sans connexion à un réseau, est certes possible, mais elle n'est pas bon marché. Les systèmes connectés à un réseau de télécommunication (réseau PTT, y compris Natel, réseau privé, liaison radio) sont accessibles en tout temps. La télécommunication permet le transfert de données, le pilotage à distance de dispositifs de mesure et des installations qui leur sont connectées.

1.5.3 Station de mesure et station d'exploitation

Par télécommunication, une station d'exploitation peut contrôler plusieurs stations automatiques de mesure. Les valeurs observées, ou les résultats intermédiaires calculés aux points de mesure, sont transférés périodiquement et automatiquement vers la station d'exploitation, où ils peuvent être traités en «postprocessing». Au lieu d'un transfert automatique, la station d'exploitation peut aussi récolter «à la demande» des valeurs observées ou – si les cycles d'observation sont répétés à longs intervalles – elle peut exécuter des observations et les transférer. Une station d'exploitation peut être connectée à un nombre quelconque de stations de mesure.

1.5.4 Valeurs-limites et alarmes

Les alarmes s'appuient sur des valeurs-limites pour les valeurs observées. Les valeurs observées sont comparées aux valeurs-limites programmées à chaque cycle de

der ohnehin für Erweiterungen konzipierten Struktur nicht erforderlich.

1.5 Möglichkeiten

1.5.1 Fest installierte und mobile Messsysteme

Messsysteme sind zumeist für eine langfristige Überwachung von Objekten vorgesehen. Sie werden deshalb ohne Rücksichten auf eventuelle Demontage fest installiert. Hingegen erfordert die temporäre Überwachung kleiner Objekte leicht zu installierende und zu demontierende Systeme. Der Stand der Technik in den vier im Abschnitt 1.3 behandelten Problemkreisen gestattet ohne weiteres, dass Systeme mit 5 bis 10 Sensoren – digitale Vermessungsinstrumente eingeschlossen – als mobiles System eingesetzt werden können. Ihre Handhabung ist zu vergleichen mit dem Umgang mit Vermessungsinstrumenten.

1.5.2 Autonome und vernetzte Messsysteme

Autonome Messsysteme verfügen über keine Telekommunikation. Sie können deshalb im wesentlichen nur Daten speichern und erfordern einen periodischen Wechsel des Datenträgers. Energiemässige Autonomie, d. h. ohne Netzanschluss, ist möglich, allerdings ist sie nicht billig. Vernetzte Systeme sind über ein Telekommunikationsnetz (PTT-Netz inkl. Natel, privates Netz, Funkverkehr) jederzeit zugänglich. Die Telekommunikation erlaubt sowohl den Datenverkehr als auch die Fernsteuerung der Messanlage und von eventuell weiteren damit verbundenen Anlagen.

1.5.3 Messstation und Betriebsstation

Mit Hilfe der Telekommunikation können mehrere automatische Messstationen von einer Betriebsstation überwacht werden. Die Messwerte oder die lokal auf der Messstation berechneten Zwischenresultate werden periodisch und automatisch in die Betriebsstation übertragen. Sie können dort im «post processing» beliebig bearbeitet werden. Ebenso wie die automatische Übertragung können von der Betriebsstation aus die Messwerte bei Bedarf abgeholt werden, oder es können – falls die Messzyklen in längeren Zeitabständen wiederholt werden – Messungen ausgelöst und die aktuellen Messwerte übertragen werden. Eine Betriebsstation kann mit beliebig vielen Messstationen verkehren.

1.5.4 Grenzwerte und Alarme

Grenzwerte von Messwerten bilden die Grundlage von Alarmen. Die softwaremässig gesetzten Grenzwerte werden mit jedem Messzyklus geprüft. Bei Überschreitung wird eine ebenfalls softwaremässig vorgesehene Aktion ausgeführt. Diese Aktion kann in einem Alarm einer bestimmten Stufe bestehen.

Das Problem liegt nicht im Auslösen von Alarmen, sondern im Vermeiden von Fehlalarmen. Zwei Arten von Fehlalarmen sind zu unterscheiden. Fehlalarm I (sogenannter Fehler erster Art): Der Alarm ist irrtümlicherweise ausgelöst worden, obwohl das dem Alarm zugrunde gelegte Ereignis nicht eingetroffen ist. Fehlalarm II (sogenannter Fehler zweiter Art): Der Alarm ist irrtümlicherweise nicht

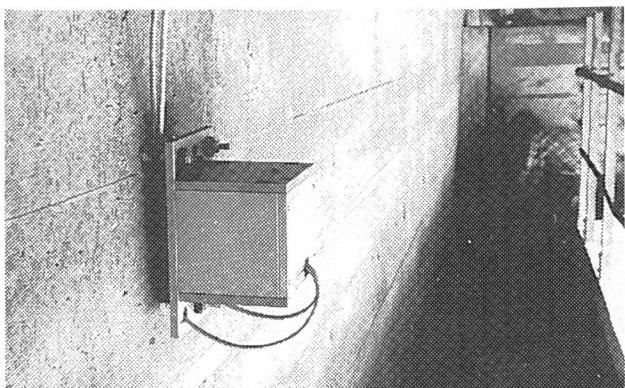


Figure 2. Capteur d'inclinaison bidirectionnel (Nivel20 de Leica) dans son coffre de montage. Les deux compensateurs sont orientés parallèlement et perpendiculairement à l'axe du pont. Les deux câbles du bus RS 485 qui sortent du coffret rejoignent deux Nivel20 voisins. Les câbles permettent le transfert de données et l'alimentation. L'ordinateur est en retrait sur la passerelle.

Bild 2. Zweikomponenten-Neigungsmesser (Nivel 20 von Leica) in Montagegehäuse. Die Komponenten sind senkrecht und parallel zur Brückenachse ausgerichtet. Die vom Montagegehäuse ausgehenden zwei Kabel des RS485-Bus führen zu den zwei benachbarten Nivel 20. Die Kabel enthalten sowohl die Datenleitung als auch die Energieversorgung. Der Computer steht im Hintergrund auf dem Laufsteg.

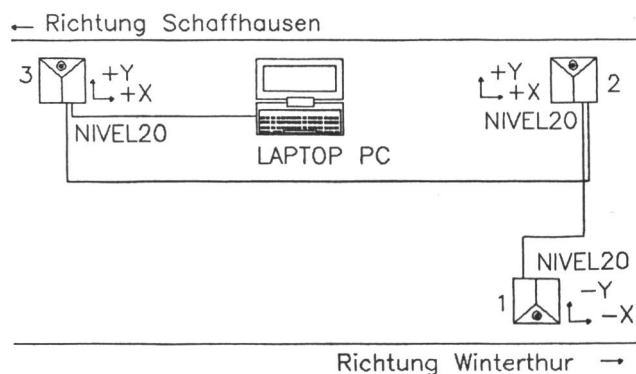


Figure 3. Schéma de mesure. Deux capteurs d'inclinaison ont été montés sur la structure porteuse, à mi-chemin entre un pilier et une butée. Le troisième a été placé à mi-distance des butées. Le système de mesure a été installé et mis en service en 4 heures. Le démontage n'a pris que 2 heures.

mesure. En cas de dépassement, une action prévue par le logiciel est exécutée; cette action peut être le déclenchement d'une alarme.

Le vrai problème n'est pas de déclencher une alarme, mais d'éviter de fausses alertes. On peut distinguer deux types de fausses alertes. La fausse alerte I (aussi appelée erreur de premier type): l'alarme est déclenchée par erreur, bien que l'événement qui devait la déclencher ne se soit pas produit. La fausse alerte II (aussi appelée erreur de 2e type): par erreur l'alarme ne se déclenche pas, bien que l'événement qui devait la déclencher se soit produit. Exemple: soit un bloc de rocher au-dessus d'une voie ferrée. Fausse alerte I: le signal d'alarme passe au rouge, bien que le rocher ne soit pas tombé. Fausse alerte II: le signal d'alarme reste vert, bien que le rocher soit tombé sur la voie.

Bild 3. Schema des Messsystems. Im Querschnitt in der Mitte des Feldes zwischen einem Pfeiler und einem Widerlager wurden zwei Neigungsmesser am Tragwerk montiert. Der dritte wurde in der halben Distanz zwischen der Mitte des Feldes und dem Widerlager angebracht. Das Messsystem wurde in 4 Stunden montiert und in Betrieb genommen. Die Demontage war nach 2 Stunden abgeschlossen.

ausgelöst worden, obwohl das dem Alarm zugrunde gelegte Ereignis eingetroffen ist. Beispiel: Felsblock oberhalb einer Eisenbahnlinie. Fehlalarm I: Signal rot, obwohl der Felsblock nicht abstürzt. Fehlalarm II: Signal grün, obwohl der Felsblock abstürzt.

1.5.5 Messsysteme, Datenbanken und Informationssysteme

Die vielfältige Information, die in den Messwerten steckt, wird erst durch Kombinieren des Verhaltens von verschiedenen Sensoren vollständig ausgewertet. Damit der softwaremässige Zugriff auf die Messwerte und auf die Sensoren nach übergeordneten Gesichtspunkten erfolgen kann (z. B. alle Temperatursensoren zwischen Höhe 1 und Höhe 2), müssen Datenbanken verwendet werden. Damit lassen sich Informationssysteme aufbauen, mit denen sich auf jeder Betriebsstation der Zustand des Objektes umfassend darstellen lässt.

1.6 Beispiele

1.6.1 Kleines, mobiles Messsystem

Die Kontrolle einer Brücke während der Sanierung durch ein periodisch wiederholtes Nivellement erwies sich wegen den durch den Verkehr hervorgerufenen Schwingungen als schlecht geeignet. Eine permanente Überwachung durch Neigungssensoren ermöglichte eine hinreichend dichte Erfassung der Neigungsänderungen an den

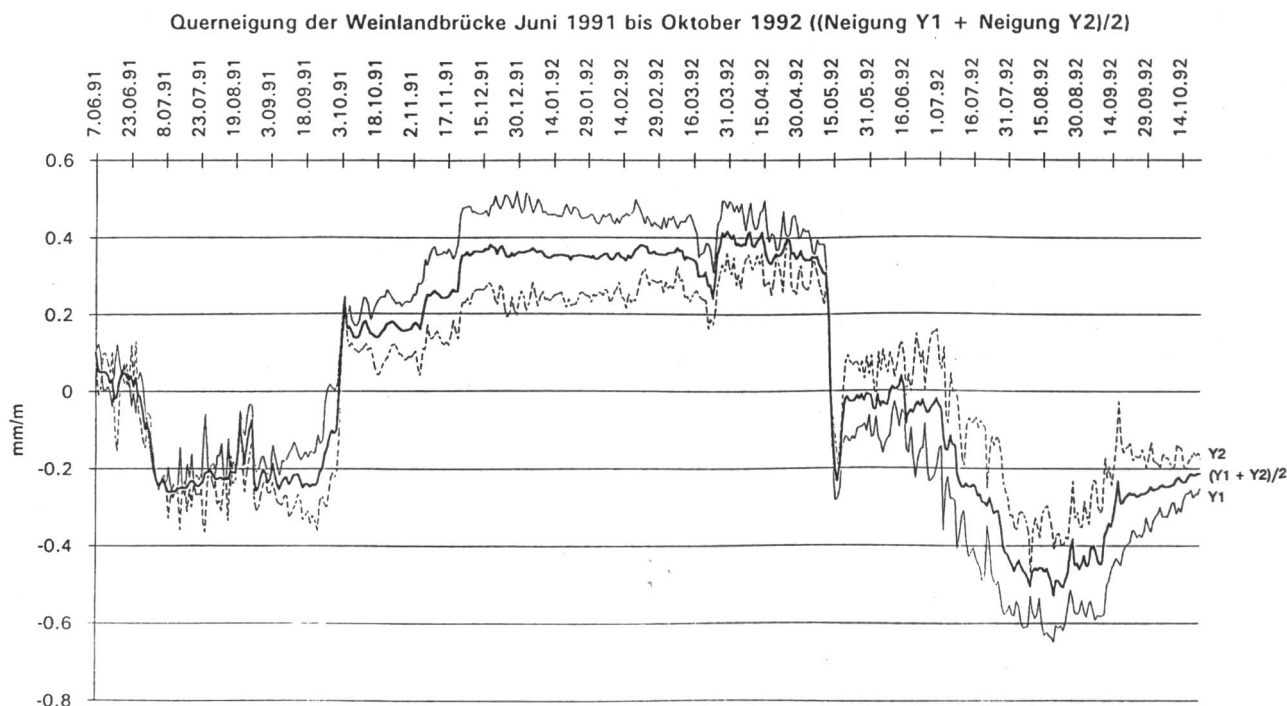


Figure 4. Inclinaison transversale de la Weinlandbrücke entre juin 1991 et octobre 1992 ((inclinaison Y1 + inclinaison Y2)/2). Inclinaison transversale de la structure porteuse sous le tablier, à la section des capteurs 1 et 2. La ligne-origine se rapporte à l'inclinaison des capteurs au moment de l'installation.

Bild 4. Querneigung des Tragwerkes unterhalb der Fahrbahnplatte im Schnitt der beiden Neigungsmesser 1 und 2. Die Nulllinie bezieht sich auf die Neigung der Neigungsmesser bei Installation des Messsystems.

Figure 5. Le système de mesure est piloté par deux PC. L'un, par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique-digital et de multiplexeurs adressables, mesure en continu les valeurs instantanées de chaque capteur et les transmet à l'autre PC. Ce dernier est connecté par modem à plusieurs stations de travail (rôle de serveur). A la demande, chacune de ces stations peut en tout temps obtenir les valeurs stockées d'un certain secteur, en vue de n'importe quel postprocessing.

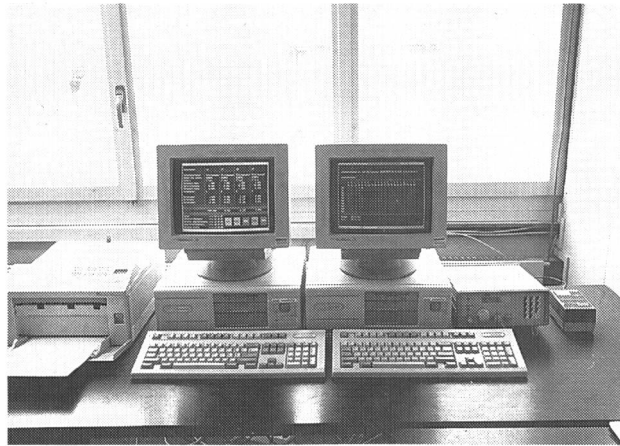


Figure 6. Schéma du système de mesure. Il s'appuie sur un système de «solexperts» pour le pilotage de multiplexeurs vers les divers capteurs. Ces multiplexeurs sont interconnectés par un câble circulaire. Avant sa connexion à l'ordinateur de calcul, ce câble circulaire passe par un dispositif pour la gestion logicielle des adresses des capteurs et pour la transformation analogique-digitale des valeurs mesurées.

PC1	Ordinateur de calcul
PC2	Gestion des données, télécommunication
SDC	Solexperts Data Controller
SB	1 Multiplexeur 1
S1	Capteur 1
R	Câble circulaire
M	Modem
HA	Connexion au Réseau
PCA1	Station de travail 1

Bild 5. Das Messsystem wird von zwei PC gesteuert. Einer der PC misst kontinuierlich über einen Analog-Digital-Wandler und über adressierbare Switchboxen die aktuellen Werte jedes Sensors und überträgt sie in den andern PC. Dieser PC ist über Modem mit mehreren Arbeitsstationen verbunden (Rolle eines Servers). Bei Bedarf kann von diesen Arbeitsstationen jederzeit der gewünschte Bereich der gespeicherten Werte zu beliebigem post processing abgeholt werden.

1.5.5 Systèmes de mesure, banques de données et systèmes d'information

L'information multiple contenue dans les valeurs observées n'est totalement exploitée que par la combinaison des mesures observées par plusieurs capteurs. Pour garantir la maîtrise logicielle des valeurs mesurées et des capteurs en fonction de plusieurs critères (par exemple tous les capteurs de température compris entre les niveaux 1 et 2), on doit utiliser des banques de données. On construit ainsi des systèmes d'information grâce auxquels on peut représenter de manière exhaustive le comportement de l'objet à partir de chaque station d'exploitation.

1.6 Exemples

1.6.1 Petit système de mesure mobile

Le contrôle d'un pont pendant sa remise en état par un nivellement périodique s'est révélé problématique à cause des oscillations provoquées par le trafic. Par contre, une surveillance permanente à l'aide de capteurs d'inclinaison a permis une saisie suffisante des variations d'inclinaison aux points d'observation, de telle sorte que non seulement les oscillations, mais aussi les modifications provoquées par les travaux ont pu être saisies. Une simple analyse visuelle des reports graphiques suffit déjà à montrer l'impact des travaux sur le pont.

1.6.2 Grand système de mesure avec installation fixe

Le contrôle d'un bâtiment bâti sur pieux dans une zone de nappe phréatique et par la technique du cuvelage a nécessité pendant les travaux la mise en place d'un grand système de mesure. La mise en charge progressive des palplanches et des pieux au cours de l'excavation a été observée en continu par des jauges de dilatation et des piézomètres. De même, la mesure du volume des eaux pompées fournit un excellent critère sur le comportement des environs. On a installé 180 capteurs au total, interrogés par le système avec une fréquence de quelques minutes. Des valeurs-limites propres à chaque capteur permettent de détecter immédiatement un comportement exceptionnel. On se reportera ici aux considérations du chapitre 1.5.4 [30].

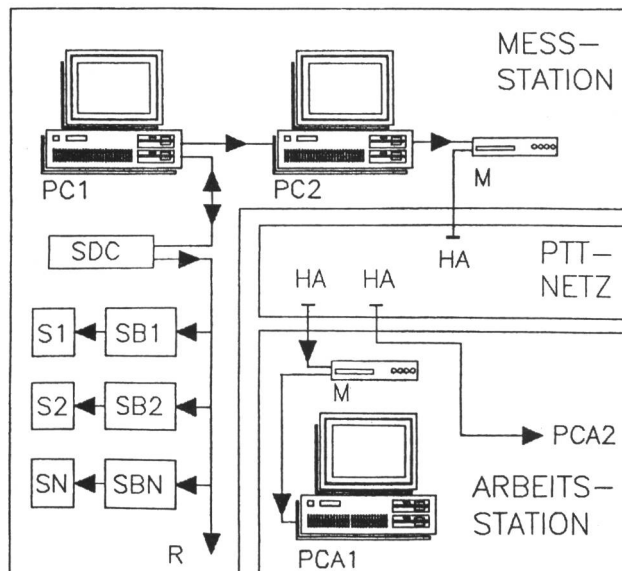


Bild 6. Schema des Messsystems. Es beruht auf einem von Solexperts entwickelten System zum Steuern von Switchboxen der einzelnen Sensoren. Diese Switchboxen sind durch eine Ringleitung untereinander verbunden. Vor dem Anschluss an den Messcomputer führt die Ringleitung in ein Steuergerät zum softwaremässigen Aufruf der Adressen der Sensoren und zum Wandeln der analogen in digitale Messwerte.

PC1	Messcomputer
PC2	Datenverwaltung, Telekommunikation
SDC	Solexperts Data Controller
SB1	Switchbox 1
S1	Sensor 1
R	Ringleitung
M	Modem
HA	Hausanschluss
PCA1	Arbeitsstation 1

Messpunkten, so dass sowohl die Schwingungen als auch die durch die Bauarbeiten hervorgerufenen Änderungen erfasst wurden. Schon eine visuelle Beurteilung der grafischen Auswertungen zeigt die Auswirkungen der Bauarbeiten auf die Brücke.

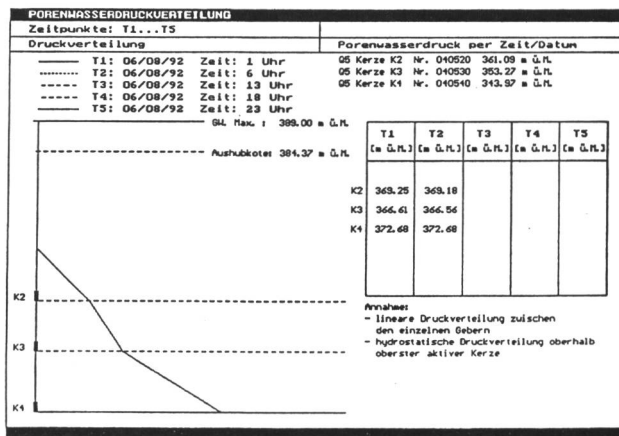


Figure 7. Exemple d'un graphique produit en continu par le système de mesure: distribution de la pression intersticielle. Tous les graphiques peuvent être obtenus par pression de touches de fonction et envoyés sur une imprimante.

Bild 7. Beispiel einer der vom Messsystem ständig nachgeführten Grafiken: Verteilung des Porenwasserdruckes. Alle Grafiken können durch Drücken von Funktionstasten aktiviert und auf einem Printer gedruckt werden.

1.6.2 Grosses, fest installiertes Messsystem

Die Kontrolle eines im Grundwasser auf Pfählen stehenden und in Deckelbauweise erstellten Gebäudes erfordert während des Baues ein grösseres Messsystem. Die durch den fortschreitenden Aushub steigende Belastung der Schlitzwände und der Pfähle wurde durch Dehnmessstreifen und Piezometer laufend gemessen. Die ebenfalls gemessene gepumpte Wassermenge lieferte ein übergeordnetes Kriterium für das Verhalten der Umgebung. Insgesamt sind 180 Sensoren installiert, die vom Messsystem in Perioden von wenigen Minuten abgefragt werden. Individuelle Grenzwerte für jeden Sensor erlauben, ein ausserordentliches Verhalten sofort zu erkennen. Dabei sind insbesondere die Überlegungen in Abschnitt 1.5.4 zu beachten [30].

Annexe n° 2

GPS (Global Positioning System) – mesure rationnelle dans un domaine de précision centimétrique

Erwin Frei

1. Introduction

La mesure assistée par satellites, avec le système GPS Navstar (Global Positioning System), permet l'emploi des méthodes les plus diverses. Celles-ci ne se distinguent pas seulement par la précision à atteindre, mais aussi par le temps requis pour la réalisation et l'analyse des mesures. La méthode décrite au chapitre 4 pour la «Mesure de déformation assistée par satellites» est favorable à une application GPS en vue d'obtenir la plus grande précision. Par conséquent, elle sera plus longue que les méthodes traditionnelles combinées aux mesures par satellites, moins précises. Si les précisions doivent se situer entre 5 et 10 mm en planimétrie et entre 15 et 30 mm en altimétrie, le temps d'observation de quelques heures peut être réduit à quelques minutes et même, dans certains cas, à quelques secondes. Il s'agit des méthodes dites «Statique Rapide» et «Stop and Go» [32], [33]. Ces deux types d'opération, qui s'emploient dans les levés techniques comme dans l'arpentage parcellaire, vont être décrits ci-dessous.

2. Les méthodes de mesure

La résolution des ambiguïtés de phase est le facteur clé des applications GPS de très haute précision, dont font partie les deux méthodes à décrire. La résolution de ces valeurs permet d'atteindre pour les lignes de base des précisions de 5 à 10 mm en planimétrie et de 15 à 30 mm en altimétrie. Ne pouvant être mesurées directement, les ambiguïtés doivent être calculées au post-traitement. Une fois obtenues, elles sont valables tant que le capteur GPS reçoit les signaux satellites sans interruption. En cas de coupure de signal, il faut redéterminer ces valeurs. Les ré-

Anhang Nr. 2

Rationelles Vermessen mit dem GPS (Global Positioning System) im Zentimeterbereich

Erwin Frei

1. Einleitung

Die satellitengestützte Vermessung mit dem Navstar GPS (Global Positioning System) erlaubt das Vermessen nach verschiedensten Methoden. Die einzelnen Methoden unterscheiden sich nicht nur in der zu erreichenden Genauigkeit, sondern auch im Aufwand zur Durchführung der Messungen als auch der Auswertungen. Die im Kapitel 4 dieses Buches beschriebene Methode zur «Satellitengestützten Deformationsvermessung» steht in diesem Sinne für eine GPS-Anwendung, bei der höchste Genauigkeit gefordert wird. Demzufolge ist auch der Aufwand im Vergleich zu satellitengestützten Methoden mit geringerer Genauigkeit sehr gross. Werden nur Genauigkeiten für die Position im Bereiche von 5 bis 10 mm und für die Höhe von 15 bis 30 mm gefordert, kann die Messzeit von einigen Stunden auf einige Minuten, in bestimmten Fällen sogar auf einige Sekunden reduziert werden. Bei diesen Methoden handelt es sich um die sog. «Rapid Static» und um die sog. «Stop and Go»-Methode [32], [33]. Diese beiden Verfahren, die in der Ingenieurvermessung wie in der Parzellarvermessung zur Anwendung kommen, werden im folgenden kurz vorgestellt.

2. Die Messmethoden

Das «pièce de resistance» für hochgenaue, relative Anwendungen mit dem GPS, zu denen die beiden zu beschreibenden Verfahren zählen, bildet das Lösen der initialen Phasenmehrdeutigkeiten (engl.: Ambiguities). Können diese Mehrdeutigkeiten gelöst werden, erreicht man Genauigkeiten für Raumvektoren im 5- bis 10-mm-Bereich für die Position und im 15- bis 30-mm-Bereich für die Höhe. Da diese Mehrdeutigkeiten nicht gemessen wer-

cepteurs GPS en mouvement sont capables de maintenir le contact satellite, ce qui permet d'appliquer des procédures de mesure spéciales.

La rentabilité de la mesure par GPS, dans les plages de précision mentionnées plus haut, est donc uniquement dictée par le temps d'observation nécessaire à la résolution des ambiguïtés. En effet, plus les mesures sont rapides, c'est-à-dire moins il faut de mesure pour la résolution des ambiguïtés, plus cette technique s'avère compétitive. L'expérience a montré que pour des récepteurs distants l'un de l'autre de moins de 5 km, les ambiguïtés peuvent être résolues fiablement en 5 minutes pour une constellation satellites acceptable (4 à 5 satellites visibles). Selon l'état actuel des connaissances, on peut exclure, dans ces plages de distance, un affaiblissement de la précision, même dans des conditions Anti-brouillage («Anti Spoofing»: signifie que le code P sur la deuxième fréquence GPS n'est pas disponible).

C'est en se basant sur ces caractéristiques fondamentales de la localisation par GPS qu'ont été développées, dans les cinq dernières années, quelques méthodes de mesure assistées par satellites. Deux d'entre elles, le Statique Rapide et le Stop and Go, qui se prêtent au levé de détails de haute précision, vont être présentées dans cet article.

2.1 Le mode Statique Rapide

Le Statique Rapide a été conçu en vue d'accélérer le processus traditionnel de mesures GPS en mode Statique. Ce développement s'est traduit par la mise au point d'un algorithme de traitement rapide des ambiguïtés. Alors qu'il faut maintenir un contact satellite de 45 à 60 minutes en mode Statique, le Statique Rapide ne demande lui que 2 à 5 minutes. La méthode se présente comme suit (figure 1). Un premier récepteur est stationné sur un point connu dit station de référence et mis en service. Les coordonnées de ce point doivent être connues dans le système de coordonnées satellite WGS 84, avec une précision inférieure à 5 m. Un deuxième récepteur est placé sur un point à déterminer (p. ex. point 1, figure 1), le contact visuel direct entre le point de référence et le point à mesurer n'étant pas indispensable. Dès que tous les satellites visibles ont été captés (5 dans le cas idéal qui est garanti actuellement sur 80% de la journée), toutes les mesures (de code et de phase) doivent être enregistrées sur les deux stations et ce pendant 5 minutes au maximum. Ensuite, le récepteur de la station 1 est arrêté, déplacé sur le deuxième site à déterminer (point 2, figure 1) puis remis en marche. Une fois que les données de ce point ont été enregistrées, on répète la procédure de mesure pour tous les

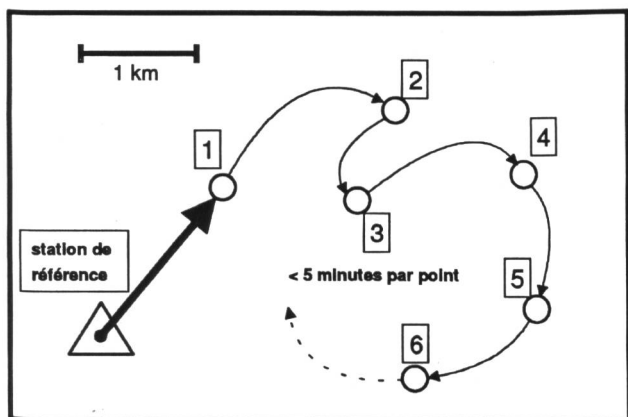


Figure 1. Le mode Statique Rapide.

den können, müssen sie rechnerisch bestimmt werden. Sobald sie bestimmt worden sind, gelten diese Werte, solange der GPS-Empfänger die Satellitensignale ohne Unterbruch empfangen kann. Wird die Verbindung unterbrochen, müssen diese Werte neu bestimmt werden. Bewegte GPS-Empfänger sind in der Lage, die Verbindung zu den Satelliten zu halten, was für spezielle Vermessungsverfahren genutzt wird.

Die Wirtschaftlichkeit der Vermessung mit dem GPS in diesen Genauigkeitsbereichen wird daher ausschliesslich vom Zeitbedarf zum Lösen der Mehrdeutigkeiten bestimmt. Je schneller, d.h. mit je weniger Messungen die Mehrdeutigkeiten gelöst werden können, desto wirtschaftlicher ist dieses Verfahren. Die Erfahrung zeigt, dass für Distanzen unter 5 km zwischen den beteiligten Empfängern die Mehrdeutigkeiten bei vernünftigen Satellitenkonstellationen (4 bis 5 Satelliten sichtbar) innerhalb von fünf Minuten zuverlässig gelöst werden können. Selbst unter A/S-Bedingungen («Anti Spoofing» d.h. der P-Code auf der zweiten GPS-Frequenz ist nicht verfügbar) ist nach heutigem Erkenntnisstand mit keiner Verschlechterung der Leistungsfähigkeit in diesen Distanzbereichen zu rechnen.

Basierend auf diesen grundlegenden Merkmalen der Vermessung mit dem GPS haben sich im Verlaufe der letzten fünf Jahre einige satellitengestützte Vermessungsmethoden entwickelt von denen zwei Verfahren näher vorgestellt werden. Es ist dies das «Rapid Static»-Verfahren und das «Stop and Go»-Verfahren. Beide Verfahren eignen sich für die rationelle Vermessung von Detailpunkten mit hoher Genauigkeit.

2.1 Das «Rapid Static»-Verfahren

Das «Rapid Static»-Verfahren hat sich direkt aus dem klassisch statischen Messen mit GPS entwickelt, indem die Messzeit auf das absolute Minimum zur Lösung der Mehrdeutigkeiten reduziert worden ist. Diese Technik ist nur durch den Einsatz von ausgeklügelten Suchalgorithmen für die ganzzahligen Phasenmehrdeutigkeiten möglich geworden. Musste man beim klassisch statischen Verfahren mindestens 45 bis 60 Minuten auf einem Punkt bleiben, genügen beim «Rapid Static»-Verfahren bereits 2 bis 5 Minuten. Das Verfahren präsentiert sich dem Anwender in folgender Form (siehe Bild 1). Ein erster Empfänger wird auf einem bekannten Punkt, dem sog. Referenzpunkt, stationiert und in Betrieb genommen. Für diesen Referenzpunkt müssen die Koordinaten im Satellitenkoordinatensystem (WGS-84) mit einer Genauigkeit von besser als 5 m bekannt sein. Ein zweiter Empfänger wird auf einem zu bestimmenden Punkt stationiert (z. B. Punkt 1 in

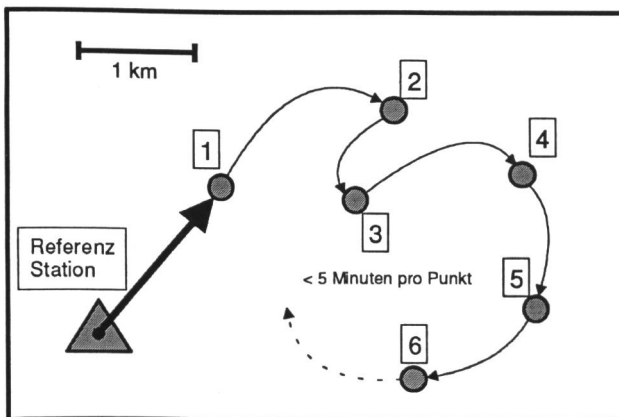


Bild 1. Das «Rapid Static»-Verfahren.

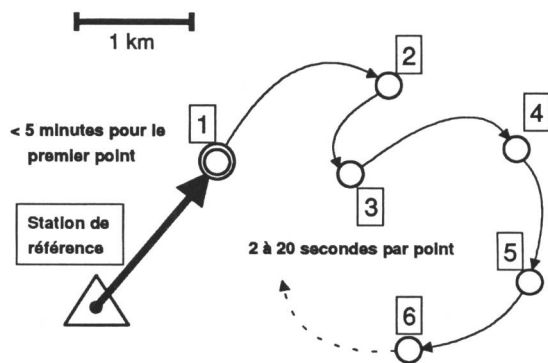


Figure 2. Le mode Stop and Go.

points à déterminer. Les données de la station de référence ainsi que celles recueillies sur les différents points sont alors analysées en commun sur un ordinateur équipé du logiciel GPS. L'analyse de chaque point dure 2 à 3 minutes environ et se déroule de façon entièrement automatique. Les coordonnées des points à déterminer par rapport à la station de référence offrent une plage de précision de 5 à 10 mm en planimétrie et de 15 à 30 mm en altimétrie.

Le mode Statique Rapide se caractérise par un rendement et une précision élevés et surtout par la facilité d'emploi des appareils sur le terrain. Entre-temps, l'analyse des données est devenue un travail de routine et ne demande pas de connaissances spéciales en GPS.

2.2 Le mode Stop and Go

Cette méthode se base sur le fait que les récepteurs GPS utilisés à des fins géodésiques sont en mesure de capter et de mesurer les signaux émis par les satellites, même lorsque le récepteur est en mouvement. Comme nous savons que les valeurs d'ambiguïté sont valables jusqu'à la coupure du signal (p. ex. par de grands arbres, les sommets de montagne, etc.), on peut déplacer un récepteur GPS d'un site à l'autre, sans qu'il soit nécessaire de redéterminer les valeurs d'ambiguïté sur le point visé. Toutefois, si ces valeurs sont connues, une époque suffit pour déterminer les coordonnées. La méthode se présente comme suit (voir figure 2). Un premier capteur est stationné sur le point de référence et mis en service. Un deuxième capteur est positionné sur un point quelconque à déterminer puis mis en marche. Le capteur commence à en-

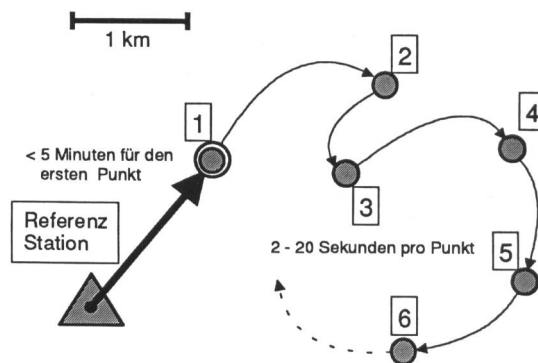


Bild 2. Das «Stop and Go»-Verfahren.

Bild 1), wobei keine direkte Sichtverbindung zwischen dem Referenzpunkt und dem zu vermessenden Punkt vorhanden sein muss. Sobald alle sichtbaren Satelliten empfangen werden (idealerweise 5, zurzeit für 80% des Tages gewährleistet), müssen sämtliche Messungen (Code- und Phasenmessungen) auf beiden Stationen während maximal 5 Minuten aufgezeichnet werden. Der Empfänger auf Station 1 wird abgeschaltet, zum zweiten zu bestimmenden Punkt transportiert (Punkt 2 in Bild 1) und dort von neuem in Betrieb genommen. Nach Datenaufzeichnung für diesen Punkt wiederholt sich das Messverfahren für sämtliche zu bestimmenden Punkte. Die Daten der Referenzstation sowie die Daten, die auf den verschiedenen Punkten gesammelt worden sind, werden nun gemeinsam auf einem Rechner mit der vorhandenen GPS-Software ausgewertet. Die Auswertung dauert pro Punkt 2 bis 3 Minuten und läuft vollständig automatisch ab. Damit liegen die Koordinaten relativ zur Referenzstation der zu bestimmenden Punkte mit Genauigkeiten für die Position im Bereich von 5 bis 10 mm und für die Höhe von 15 bis 30 mm vor.

Das «Rapid Static»-Verfahren zeichnet sich aus durch die hohe Wirtschaftlichkeit, die ansprechende Genauigkeit und vor allem durch die einfache Handhabung der Geräte im Feld. Die Datenauswertung ist mittlerweile zur Routinearbeit geworden und setzt keinerlei GPS-spezifisches Wissen voraus.

2.2 Das «Stop and Go»-Verfahren

Das «Stop and Go»-Verfahren baut auf dem Umstand auf, dass die im geodätischen Gebrauch stehenden GPS-

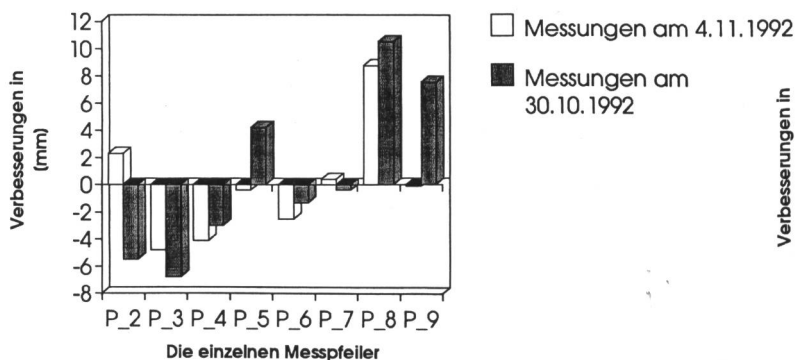


Figure 3. Erreur de distance résultant de la détermination en Stop and Go.

Figure 4. Erreur altimétrique résultant de la détermination en Stop and Go. Le pilié P 00 a été pris comme référence.

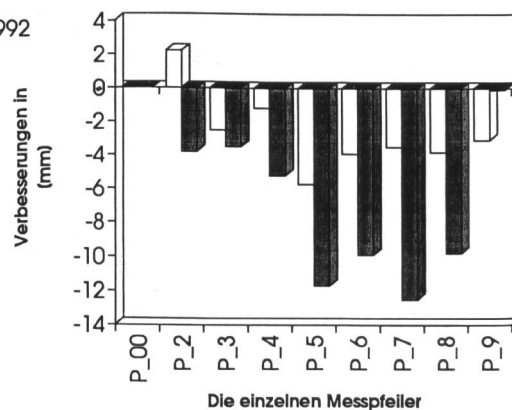


Bild 3. Distanzfehler aus der Bestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren.

Bild 4. Höhenfehler aus der Bestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren. Der Pfeiler P00 ist dabei als Referenz gewählt worden.

registrar les données de mesure dès qu'il reçoit au moins quatre, dans le cas idéal cinq satellites. Cinq minutes plus tard, on peut être certain que ces données suffisent à calculer la résolution des ambiguïtés. Sans arrêter le capteur, on le déplace sur le prochain site (p. ex. station 2, figure 2) tout en veillant à maintenir le contact avec au moins quatre satellites. Après la mise en station sur le nouveau point, l'enregistrement de deux à trois époques suffit pour la détermination des coordonnées avec une précision de 10 à 20 mm. On répète cette procédure jusqu'à ce que tous les points à déterminer aient été mesurés. Les données de mesure enregistrées sont alors analysées de la même façon que dans le mode Statique Rapide avec le logiciel GPS disponible. Selon le rendement de l'ordinateur utilisé, l'analyse de chaque point pour Stop and Go dure environ une minute ou moins.

Une fois que les coordonnées du premier point sont connues (point 1 dans la figure 2), on peut effectuer l'initialisation des ambiguïtés avec deux à trois époques (durée de mesure de 5 à 10 secondes).

Ce mode présente des avantages économiques évidents. Au premier abord, le transport du récepteur d'une station à l'autre semble problématique. En revanche, l'expérience a montré que le système est bien plus robuste qu'il n'en a l'air. En effet, les grandes distances entre les points peuvent être parcourues en voiture, l'antenne étant fixée sur le toit. Dans un terrain impraticable, le capteur (ou seulement l'antenne) est transporté d'un point à l'autre sur une canne spéciale. De cette manière, il est possible de mesurer de grandes quantités de points en très peu de temps. Même si les ambiguïtés se perdent de temps à autre, on peut faire une réinitialisation en moins de cinq minutes en un point quelconque.

3. Résultats

Pour illustrer la précision de la méthode, nous allons présenter ci-dessous les résultats de deux mesures Stop and Go réalisées en octobre et novembre 1992 sur la distance d'étalement EDM, le long du Rhin à Heerbrugg (canton de St-Gall). Chaque pilier de mesure a été occupé pendant 20 secondes environ et, dans ce laps de temps, quatre époques ont été enregistrées. Pour ce test, l'analyse fait ressortir une erreur moyenne de 2,3 mm pour la détermination de la distance en Stop and Go et une erreur moyenne de 4,1 mm pour la différence de hauteur.

4. Conclusion

Méthodes de mesure assistées par satellites, le Statique Rapide et le Stop and Go permettent à l'utilisateur d'effectuer de façon rationnelle et précise des levés de détail sur de courtes distances (3 à 6 km). Ces deux modes sont utilisés avec succès dans les levés techniques, l'arpentage parcellaire, le cadastre et pour la surveillance de zones de terrain critiques. Deux conditions sont nécessaires à l'emploi de ces types d'opération: un terrain praticable et le contact direct et simultané des deux stations avec au moins quatre satellites. La localisation par GPS offre plusieurs avantages: elle ne dépend pas des conditions climatiques, le point de référence peut être choisi sur un terrain stable et le contact visuel entre les points sur le terrain n'est pas nécessaire. De plus, avec cette méthode, les tâches fastidieuses consistant à déterminer des points de station supplémentaires pour les instruments deviennent superflues lorsqu'il n'y a pas de contact visuel entre les points. Les précisions (1σ) obtenues sont de 3 à 10 mm pour la position et de 10 à 30 mm pour l'altitude.

Empfänger in der Lage sind, die Satellitensignale zu empfangen und auszumessen, auch wenn der Empfänger bewegt wird. Da nun die Mehrdeutigkeiten solange Gültigkeit haben, bis die Verbindung zum Satelliten unterbrochen wird (z.B. durch hohe Bäume, Bergspitzen usw.), kann ein GPS-Empfänger von einer Station zur anderen transportiert werden, ohne die Mehrdeutigkeiten auf dem Zielpunkt neu bestimmen zu müssen. Sind die Mehrdeutigkeiten jedoch bekannt, genügt eine Messepoche, um die Koordinaten bestimmen zu können. Das Verfahren präsentiert sich dem Anwender in folgender Form (siehe Bild 2). Ein erster Empfänger wird auf dem Referenzpunkt stationiert und in Betrieb genommen. Ein zweiter Empfänger wird auf einem beliebigen zu bestimmenden Punkt stationiert und ebenfalls in Betrieb genommen. Sobald mindestens vier, idealerweise fünf Satelliten empfangen werden, beginnt der Empfänger mit dem Aufzeichnen der Messdaten. Nach fünf Minuten kann mit Sicherheit angenommen werden, dass die Mehrdeutigkeiten mit diesem Datenmaterial gelöst werden können. Ohne den Empfänger abzustellen, wird er nun zur nächsten Station transportiert (z.B. Station 2 in Bild 2). Dabei ist zu beachten, dass die Verbindung zu mindestens vier Satelliten gehalten werden kann. Nach Stationierung auf dem neuen Punkt genügt das Aufzeichnen von zwei bis drei Messepochen für die Bestimmung der Koordinaten mit der für «Stop and Go» beschriebenen Genauigkeit von 10 bis 20 mm. Dieses Prozedere wird wiederholt, bis sämtliche zu bestimmenden Punkte vermessen sind. Die aufgezeichneten Messdaten werden analog dem «Rapid Static»-Verfahren mit der verfügbaren GPS-Software ausgewertet. Die Auswertung für das «Stop and Go»-Verfahren dauert pro Punkt eine Minute oder kürzer, je nach Rechenleistung des verfügbaren PCs.

Sind die Koordinaten für den ersten Punkt bekannt (Punkt 1 in Bild 2), kann die Initialisierung der Mehrdeutigkeiten mit zwei bis drei Messepochen bewerkstelligt werden (Messdauer von 5 bis 10 Sekunden).

Die wirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens sind offensichtlich. Der Transport des Empfängers von der einen Station zur nächsten Station scheint auf den ersten Blick recht problematisch. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass das Verfahren robuster ist als es scheint. Grössere Distanzen zwischen einzelnen Punkten können durchaus mit dem Auto überbrückt werden, indem die Antenne auf dem Autodach befestigt wird. In unwegsamem Gelände wird der Empfänger (oder nur die Antenne) auf einem speziellen Stab von Punkt zu Punkt getragen. Mit diesem Verfahren können in kürzester Zeit grosse Punktmengen vermessen werden. Selbst wenn die Mehrdeutigkeiten ab und zu durch ein Abdecken der Satelliten verlorengehen, kann die Initialisierung in weniger als fünf Minuten an einem beliebigen Ort wiederholt werden.

3. Resultate

Zur Illustration der Genauigkeit der Verfahren werden im folgenden die Resultate von zwei «Stop and Go»-Messungen präsentiert, die im Oktober und im November 1992 auf der EDM-Eichstrecke auf dem Rheindamm bei Heerbrugg (SG) durchgeführt worden sind. Dabei ist jeder Messpfeiler während etwa 20 Sekunden besetzt worden. Während dieser Zeit wurden in der Regel 4 Messepochen aufgezeichnet. Die Auswertung hat für diesen Test einen mittleren Fehler für eine Distanzbestimmung mit dem «Stop and Go»-Verfahren von 2,3 mm und einen mittleren Fehler für die Höhendifferenz von 4,1 mm ergeben.

4. Zusammenfassung

Die «Rapid Static»- und die «Stop and Go»-Methode bieten dem Anwender ein satellitengestütztes Vermessungsverfahren zur rationellen und genauen Bestimmung von Detailpunkten in kleinräumigen Gebieten (3 bis 6 km). Diese Verfahren werden in der Ingenieurvermessung als auch in der Parzellar- und Katastervermessung erfolgreich angewendet. Die Überwachung kritischer Geländepartien kann mit diesen satellitengestützten Methoden für bestimmte Aufgaben sehr rationell durchgeführt werden. Voraussetzungen sind die Begehrbarkeit des Geländes

Annexe n° 3: Prévention et correction des influences d'erreurs systématiques du GPS

Les influences systématiques peuvent en premier lieu provenir des *satellites*, plus particulièrement lorsque les exploitants du système provoquent des dysfonctionnements et des dégradations intentionnelles. Le DoD a décidé d'altérer artificiellement la qualité des données envoyées par les satellites et la précision des paramètres des horloges. La précision des éphémérides «Broadcast» diffusées par les satellites avant l'introduction de «selective availability (SA)» est suffisante pour des réseaux d'une amplitude de 5 km environ. Toutefois, il peut résulter des erreurs systématiques d'orbites avec le SA, surtout pour des mesures brèves de quelques minutes à moins d'une heure. Celles-ci influencent plus particulièrement l'échelle et l'orientation spatiale du réseau. On obtient une estimation sommaire de l'influence des erreurs d'orbites avec la formule empirique de *Bauersima* [10]:

$$db/b = dr/r$$

où: db = erreur de la ligne de base de longueur b ; dr = erreur d'orbites; r = distance moyenne jusqu'au satellite (~ 25000 km). Afin de pouvoir garantir par exemple l'influence des *erreurs d'orbites* à $db < 1$ mm pour une ligne de base $b = 5$ km, on exige des orbites de haute qualité avec des écarts maxima $dr < 5$ m. Celles des éphémérides «Broadcast» diffusées par les satellites ne répondent pas – sous SA – à ces exigences pour des périodes d'observation de quelques minutes. Par conséquent, il faut examiner la qualité des orbites et, en cas de besoin, se procurer les orbites précises calculées ultérieurement. Ces dernières pourront par exemple être obtenues au Center for orbit determination in Europe (Code) à Berne. Elles sont déterminées par des réseaux supérieurs de poursuite (tracking) européens ou mondiaux. Ce centre est exploité par l'Institut astronomique de l'Université de Berne (AIUB) en collaboration avec l'Institut de géodésie appliquée (IfaG) de Francfort, de l'Institut géographique national (IGN) de Paris, du Statens Kartverk norvégien et de l'Office fédéral de topographie (S+T) à Wabern.

Les signaux à micro-ondes des satellites rencontrent sur leur parcours différentes couches atmosphériques, plus particulièrement les couches ionosphériques chargées électriquement. Les signaux y subissent des retards qui peuvent systématiquement influencer les mesures ainsi que les résultats. L'influence de l'*ionosphère* peut conduire à des erreurs d'échelle des lignes de base jusqu'à quelques ppm, avant tout lors de mesures diurnes. Comme les ondes L1 et L2 sont influencées différemment par l'ionosphère, il est judicieux de calculer une combinaison linéaire L3 «sans ionosphère» des deux mesures, à partir des mesures simultanées des deux ondes porteuses.

und die direkte, gleichzeitige Sichtverbindung auf beiden Stationen zu mindestens vier Satelliten. Die Vorteile der GPS-gestützten Verfahren liegen in der Wetterunabhängigkeit, dem Umstand, dass der Referenzpunkt in stabilem Gelände gewählt werden kann und dass die Sichtverbindung zwischen Punkten im Gelände nicht gewährleistet sein muss. Zudem entfallen aufwendige Arbeiten zur Bestimmung von zusätzlichen Instrumentenstandorten, sofern das Gelände nicht von einem einzelnen Punkt eingesehen werden kann. Die Genauigkeiten (1σ) dieser Verfahren liegen für die Position im Bereich von 3 bis 10 mm und für die Höhe im Bereich von 10 bis 30 mm.

Anhang Nr. 3: Vermeidung und Korrektur von systematischen Fehlereinflüssen bei GPS

Systematische Einflüsse können primär von den *Satelliten* herrühren, wenn diese von den Systembetreibern gewollte Verschlechterungen oder gar Funktionsstörungen aufweisen. Denn das DoD hat Massnahmen ergriffen, die Qualität der ausgesendeten Satelliten-Bahndaten sowie die Genauigkeit der Satelliten-Uhrparameter künstlich zu verschlechtern. Die Genauigkeit der ausgesendeten «Broadcast»-Ephemeriden war vor der Einführung der «selective availability (SA)» für Netze von ca. 5 km Ausdehnung stets ausreichend. Mit SA können jedoch vor allem bei kurzen Messzeiten (Minuten bis eine Stunde) systematische Fehler aus Satelliten-Bahnfehlern resultieren. Diese beeinflussen den Massstab und die räumliche Orientierung der Netze. Eine grobe Abschätzung des Einflusses von Satelliten-Bahnfehlern erhält man mit der Faustformel von *Bauersima* [1]: $db/b = dr/r$ wobei: db = Fehler an der Basislinie der Länge b ; dr = Bahnfehler des Satelliten; r = mittlere Distanz zum Satellit (~ 25000 km). Um z. B. bei einer Basislinienlänge von $b = 5$ km den Einfluss der Satelliten-Bahnfehler auf die Basis $db < 1$ mm garantieren zu können, sind Bahndaten von hoher Qualität mit maximalen Abweichungen $dr < 5$ m nötig. Die von den Satelliten ausgesendeten «Broadcast»-Ephemeriden genügen unter SA diesen Anforderungen über kurze Zeitperioden (einige Minuten) nicht. Die Qualität der Bahndaten ist somit zu überprüfen. Notfalls sind nachträglich berechnete, sogenannte präzise Bahnen zu beschaffen. Solche genaueren, durch Bahnbestimmung aus simultan erfassten Messungen von übergeordneten europa- oder weltweiten Trackingnetzen berechneten Bahndaten können z. B. vom Center for orbit determination in Europe (Code) in Bern bezogen werden. Dieses Center wird vom Astronomischen Institut der Universität Bern (AIUB) in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Geodäsie (IfaG) in Frankfurt, dem Institut géographique national (IGN) in Paris, dem norwegischen Statens Kartverk und dem Bundesamt für Landestopographie (L+T) in Wabern betrieben. Die Mikrowellensignale der Satelliten durchlaufen auf ihrem Weg zum Empfänger die verschiedenen Atmosphärenschichten, insbesondere auch die elektrisch aufgeladene Ionosphärenschicht. Dabei erfahren die Signale Verzögerungen, welche die Messungen und damit die Resultate systematisch beeinflussen können. Der Einfluss der *Ionosphäre* kann vor allem bei Tagesmessungen zu Massstabsabweichungen der Basislinien bis zu einigen ppm führen. Da die L1- und L2-Wellen in der Ionosphäre unterschiedlich stark beeinflusst werden, gelingt es, aus den simultanen Messungen an beiden Trägerwellen eine «ionosphärenfreie» Linearkombination L3 der beiden Messwerte zu berechnen.

On tente de contourner cette technique pour des lignes de base courtes car le bruit de fond des phases L3 est environ trois fois plus élevé que celui de L1 et L2. Dans ce cas, ou lorsqu'un réseau présente un mélange de mesures à une et à deux fréquences, le Berner GPS Software peut calculer un modèle de la teneur en électrons de l'ionosphère, ce qui permet ultérieurement la correction des mesures L1 et L2. Un tel modèle permet de déterminer la déformation de l'échelle en dessous de 1 ppm due aux influences ionosphériques. La solution finale présente alors une restitution corrigée avec ce modèle des mesures de phase L1 et L2. A titre de contrôle, une solution L3 sera calculée à chaque fois avec la combinaison linéaire sans ionosphère, dans laquelle l'échelle ne sera théoriquement pas modifiée. Mais la solution L3 indique une erreur moyenne environ 3 fois plus grande des observations de phase, ce qui conduit dans un petit réseau de 10 km environ à diminuer la précision relative en planimétrie et en altimétrie. L'expérience acquise avec les réseaux de 6 barrages montre que l'erreur globale (rms) des 7 paramètres des transformations d'Helmert avec les solutions L3 est en moyenne 2 fois supérieure à celle issue des solutions L1/L2.

Les signaux des satellites, semblables aux micro-ondes de la mesure électronique de distance (MED), subissent d'autres retards (déformations) dans les couches inférieures de l'atmosphère (*réfraction troposphérique*), qui devront être corrigés avec des modèles appropriés. Les modèles atmosphériques standard ou les modèles s'appuyant sur des données météorologiques mesurées pourront s'appliquer pour la correction de la réfraction troposphérique. Ce paramètre peut aussi être estimé à l'aide des mesures GPS pour chaque station et session. Les différences relatives non modélisées de la troposphère peuvent également causer des écarts altimétriques de quelques millimètres dans des réseaux locaux, plus particulièrement lorsque la température et l'humidité de l'air sont élevées. L'expérience montre que les erreurs provoquées par les effets de la troposphère n'influencent pratiquement pas les coordonnées planimétriques. On peut renoncer à relever les données météo dans un petit réseau sans grandes différences d'altitude et sans exigences particulières pour ces dernières.

Le Berner GPS Software dispose pour la correction de la réfraction troposphérique de plusieurs modèles avec ou sans prise en compte des données météo locales mesurées. Comme solution standard (1), c'est chaque fois la correction troposphérique zénithale qui est calculée sur la base d'une atmosphère standard. Les données météo des stations individuelles ne sont en principe pas introduites pour de petits réseaux. Par contre, on calculera deux modèles supplémentaires à partir du modèle standard (1): (2) Estimation des paramètres troposphériques locaux, c'est-à-dire une correction zénithale résiduelle par station et par session de données GPS; (3) Estimation d'un modèle troposphérique local avec une prise en compte altimétrique linéaire des altérations troposphériques zénithales des signaux. Alors que le modèle standard (1) suffit amplement la plupart du temps pour les terrains plats et livre souvent de meilleurs résultats, le modèle complémentaire apporte quant à lui de meilleurs résultats dans des réseaux avec de grandes différences d'altitude. La réfraction troposphérique, sur les sessions de plusieurs heures, ne se répercute, selon la modélisation choisie, que sur les altitudes des points, et constitue pour la précision de celles-ci le facteur limitant.

Bei kurzen Basislinien versucht man diese Technik zu umgehen, da das Rauschen der L3-Phasen ca. dreimal grösser ist als dasjenige von L1 und L2. In diesem Fall oder falls in einem Netz eine Mischung von Ein- und Zweifrequenzmessungen vorliegt, können bei der Berner GPS-Software aus den Differenzen zwischen den L1- und L2-Phasenmessungen Parameter eines Einschicht-Modelles des Elektronengehaltes der Ionosphäre gerechnet werden, die nachträglich der Korrektur der L1- und L2-Messungen dienen. Ein solches Modell erlaubt es üblicherweise, den durch Ionosphäreneinflüsse verzerrten Massstab auf unter 1 ppm genau zu bestimmen. Die Schlusslösung stellt dann eine mit diesem Modell korrigierte Auswertung der L1- und L2-Phasenmessungen dar. Zur Kontrolle wird jeweils eine Lösung mit der ionosphärenfreien Linearkombination L3 gerechnet, bei welcher der Massstab theoretisch unverfälscht ist. Die L3-Lösung weist aber einen ca. dreimal grösseren mittleren Fehler der Phasenbeobachtungen auf, was in kleinen Netzen bis ca. 10 km zu entsprechend geringerer relativer Lage- und Höhengenaugkeit führt. Die Erfahrung in den 6 Staumauernetzen zeigt, dass der Gesamtfehler (rms) der 7-Parameter-Helmert-Transformationen mit den L3-Lösungen durchschnittlich um den Faktor 2 grösser ist als mit den L1/L2-Lösungen.

Ähnlich wie die Mikrowellen bei der elektronischen Distanzmessung (EDM) erfahren die Satellitensignale in der unteren Atmosphärenschicht weitere Signalverzögerungen (*troposphärische Refraktion*), welche mit geeigneten Modellen korrigiert werden müssen. Standard-Atmosphärenmodelle oder Modelle, welche sich auf gemessene Meteodaten stützen, können zur Korrektur der troposphärischen Refraktion beigezogen werden, oder es kann pro Station und Session ein Troposphären-Parameter aus den GPS-Messungen selber geschätzt werden. Nicht modellierte relative Unterschiede in der Troposphäre können auch in lokalen Netzen, insbesondere bei hohen Temperaturen und hohen Luftfeuchtigkeiten, fehlerhafte Höhenunterschiede von einigen Millimetern verursachen. Erfahrungsgemäss bewirken die Troposphäreneffekte Höhenfehler während die Lagekoordinaten grösstenteils unbeeinflusst bleiben. Auf die Erfassung von Meteodaten kann im allgemeinen verzichtet werden, insbesondere falls in kleinen Netzen ohne grosse Höhendifferenzen nur eine beschränkte Höhengenaugkeit erzielt werden soll.

Zur Korrektur der troposphärischen Refraktion stehen bei der Berner GPS-Software verschiedenste Modelle mit oder ohne Berücksichtigung lokal gemessener Meteodaten zur Verfügung. Als Standardlösung (1) wird jeweils die sog. troposphärische Zenitkorrektur unter Verwendung einer Standardatmosphäre berechnet. Individuelle Stations-Meteodaten werden normalerweise in kleinen Netzen nicht eingeführt. Dagegen werden ausgehend vom Standardmodell (1) zwei zusätzliche Modelle berechnet: (2) Schätzen von lokalen Troposphären-Parametern, d.h. einer Rest-Zenitkorrektur pro Station und Session aus den GPS-Messdaten; (3) Schätzen eines lokalen Troposphärenmodells mit linearer Höhenabhängigkeit der troposphärischen zentralen Laufzeitverzögerung. Während in flachem Gelände das Standardmodell (1) meist vollaufgenügt und oft gar die besten Resultate liefert, bringt insbesondere das Zusatzmodell (3) in Netzen mit grossen Höhenunterschieden leicht bessere Resultate. Bei Sessionen über mehrere Stunden wirkt sich die troposphärische Refraktion resp. ihre unterschiedliche Modellierung jedoch praktisch nur auf die Punkthöhen aus, wobei sie zum begrenzenden Genauigkeitsfaktor wird.

Annexe n° 4: Exemples de mesures GPS

Réseaux GPS de Montsalvens et de Rossens; résultats de la compensation combinée du réseau de Montsalvens 1990.

Le réseau Montsalvens [17] a servi d'exemple pour les résultats d'une compensation avec le programme LTOP. Les mesures GPS de ce réseau ont été effectuées en 2 jours, en juillet et en octobre 1990. L'orientation et l'échelle ont été définies par les mesures GPS.

Anhang Nr. 4: Beispiele von GPS-Messungen

GPS-Netze Montsalvens und Rossens; Resultate der kombinierten Ausgleichung im Netz Montsalvens 1990.

Als Beispiel für die Resultate einer Ausgleichung mit dem Programm LTOP soll das Netz Montsalvens [17] dienen. In diesem Netz wurden an je zwei Tagen im Juli und Oktober 1990 GPS-Messungen durchgeführt. Die Orientierung und der Massstab des Netzes werden durch die GPS-Messungen definiert.

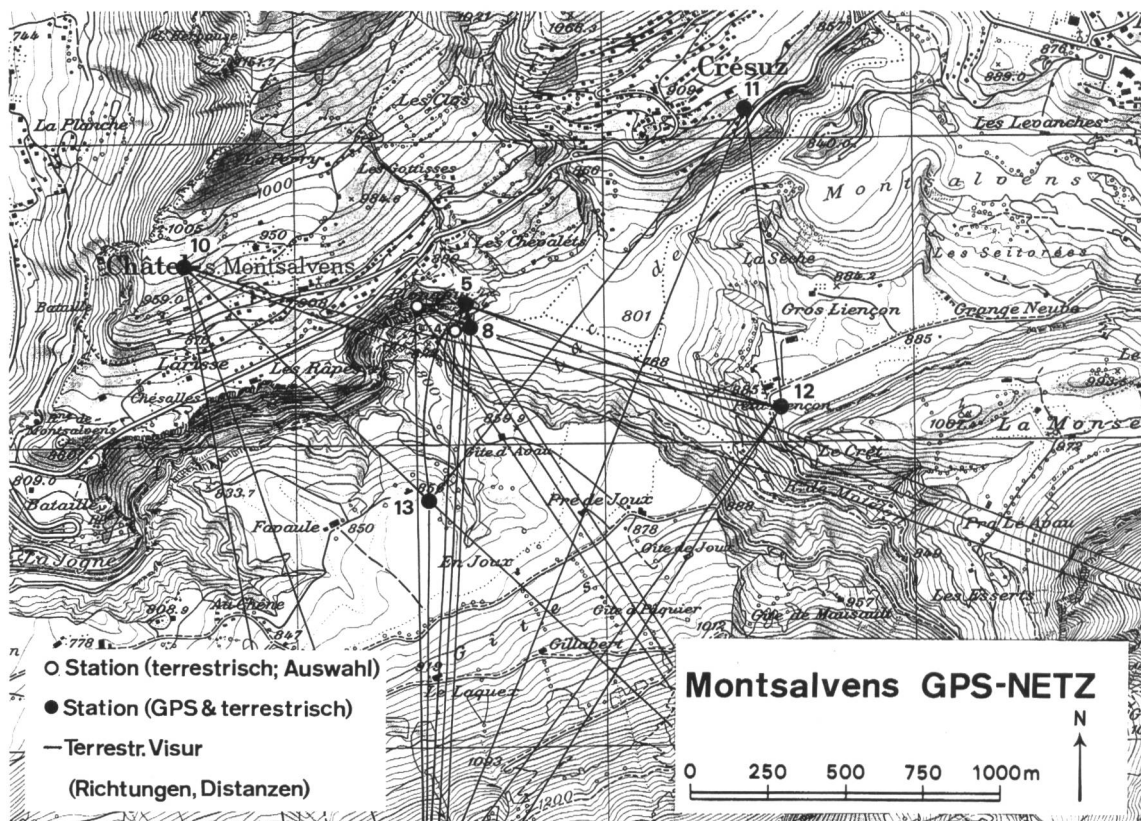


Figure 1. Réseau GPS et mesures de rattachement de Montsalvens.

Bild 1. GPS-Netz und terrestrische Anschlussmessungen Montsalvens.

Tableau 1. Valeurs a priori de la compensation globale combinée.

Erreur moyenne de centrage	0,2 mm
Erreur moyenne d'une direction	3 ^{cc}
Erreur moyenne d'un angle vertical	4 ^{cc}
Erreur moyenne d'une distance	0,3 mm + 0,5 ppm
Erreur moyenne GPS en planimétrie	1,5 mm
Erreur moyenne GPS en altimétrie	3,0 mm

Tabelle 1. A-priori-Annahmen der kombinierten Gesamtausgleichung.

Mittlerer Zentrierfehler	0,2 mm
Mittlerer Fehler der Richtungen	3 ^{cc}
Mittlerer Fehler der Höhenwinkel	4 ^{cc}
Mittlerer Fehler der Distanzen	0,3 mm + 0,5 ppm
Mittlerer Fehler der GPS Lage	1,5 mm
Mittlerer Fehler der GPS Höhe	3,0 mm

Tableau 2. Résultats de la compensation en planimétrie et en altimétrie.

	Situation	Altitude
Erreur moyenne des translations des centres de gravité par session GPS	0,9 mm	1,9 mm
Nombre d'observations surabondantes	151	60
Facteur de variance a posteriori (total)	1,11	1,00
Facteur de variance a posteriori (GPS)	1,07	0,75
Facteur d'échelle (EDM)	1,02 ± 0,54 ppm	

Tabelle 2. Resultate der kombinierten Lage- und Höhenausgleichung.

	Lage	Höhe
Mittlere Fehler der Translationen der Schwerpunkte pro GPS-Session	0,9 mm	1,9 mm
Überbestimmungen	151	60
A-posteriori-Varianzfaktor (total)	1,11	1,00
A-posteriori-Varianzfaktor (GPS)	1,07	0,75
Massstabsfaktor (EDM)	1,02 ± 0,54 ppm	

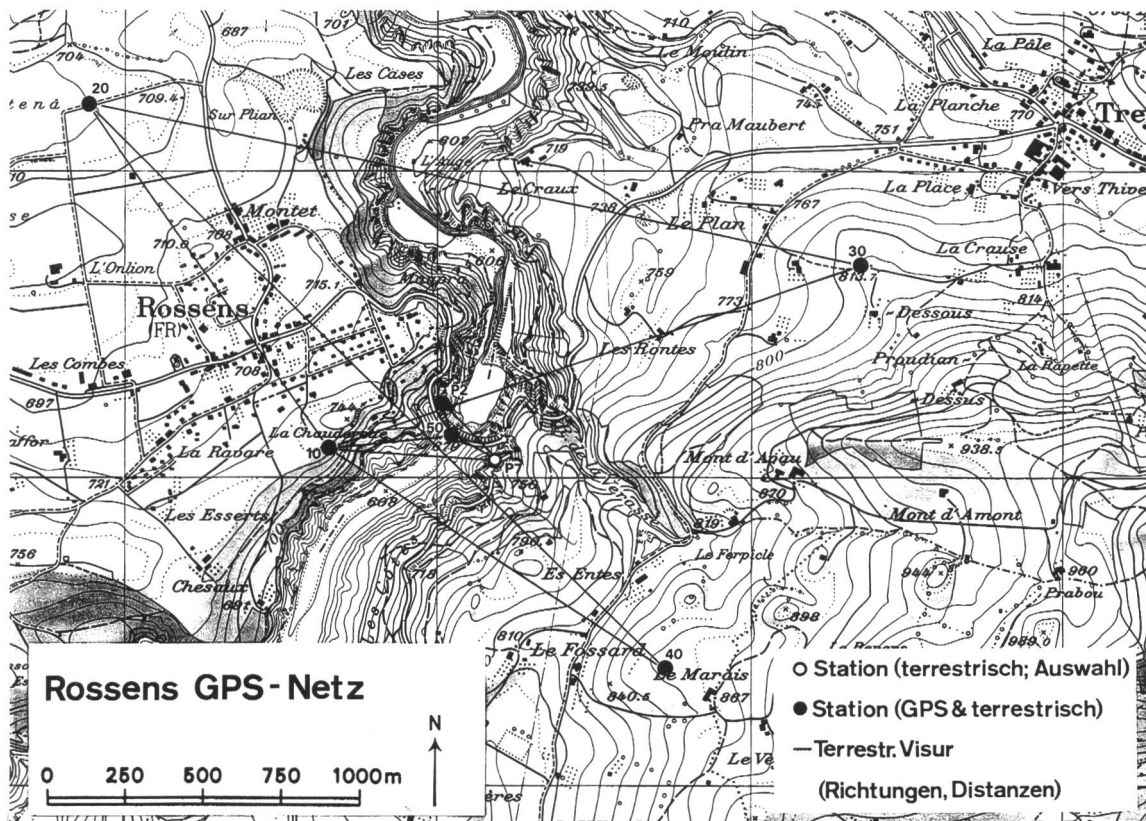


Figure 2. Réseau GPS et mesures de rattachement de Rossens.

Bild 2. GPS-Netz und terrestrische Anschlussmessungen Rossens.

Tableau 3. Résidus [en mm] des coordonnées GPS issues de la compensation globale incluant les mesures terrestres.

Station	V _Y	V _X	V _H
3 juillet			
9005	-0,7	0,8	0,8
9010	0,5	1,0	0,1
9011	-0,9	-0,2	-1,0
9012	1,5	-0,3	-0,8
9013	-0,4	-1,3	0,9
23 octobre			
9005	-0,7	2,8	-2,5
9010	1,3	-3,0	5,4
9011	0,5	-1,6	-1,1
9012	-0,5	1,9	-0,5
9013	-0,6	-0,1	-1,3

Station	V _Y	V _X	V _H
4 juillet			
9005	-0,6	1,0	0,8
9008	-0,4	-0,3	-1,2
9010	0,2	2,4	-3,1
9011	-1,3	1,2	0,4
9012	0,3	-3,8	2,0
9013	2,3	-0,6	1,1
24 octobre			
9005	-0,4	2,3	-1,2
9010	0,7	-2,1	-1,0
9011	0,5	0,5	2,2
9012	0,3	-0,2	0,2
9013	-1,1	-0,4	-0,1

Tabelle 3. Verbesserungen [in mm] an den GPS-Koordinaten aus der Gesamtausgleichung mit terrestrischen Messungen.

Station	V _Y	V _X	V _H
3. Juli			
9005	-0,7	0,8	0,8
9010	0,5	1,0	0,1
9011	-0,9	-0,2	-1,0
9012	1,5	-0,3	-0,8
9013	-0,4	-1,3	0,9
23. Oktober			
9005	-0,7	2,8	-2,5
9010	1,3	-3,0	5,4
9011	0,5	-1,6	-1,1
9012	-0,5	1,9	-0,5
9013	-0,6	-0,1	-1,3

Station	V _Y	V _X	V _H
4. Juli			
9005	-0,6	1,0	0,8
9008	-0,4	-0,3	-1,2
9010	-0,2	2,4	-3,1
9011	-1,3	1,2	0,4
9012	0,3	-3,8	2,0
9013	2,3	-0,6	1,1
24. Oktober			
9005	-0,4	2,3	-1,2
9010	0,7	-2,1	-1,0
9011	0,5	0,5	2,2
9012	0,3	-0,2	0,2
9013	-1,1	-0,4	-0,1

Literatur

- [1] Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren (1989): Messanlagen zur Talsperrenüberwachung; Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz; überarbeiteter Sonderdruck aus «wasser, energie, luft – eau, énergie, air», 78 (1986), Heft 7/8, CH-5401 Baden. Comité National Suisse des Grands Barrages (1989): Dispositif d'auscultation des barrages; concept, fiabilité et redondance; Tiré à part revu de «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 78 (1986), Heft 7/8, CH-5401 Baden.
- [2] Stengele, R.: Aktuelle Probleme der Talsperrenüberwachung am Beispiel der Staumauer Sella, 1991, Bericht 180 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- [3] Kahmen, H.: Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie. Ingenieurvermessung 84.
- [4] Aeschlimann, H., und Clement, A.: Die automatische Messanlage Vicosoprano. VPK 7/92, S. 392.
- [5] Aeschlimann, H.: Möglichkeiten von automatischen Messsystemen. Ingenieurvermessung 92.
- [6] Katowski, O.: Ein Präzisionspolar-Messsystem (PPMS) im Einsatz bei Überwachungsmessungen und dynamischer Absteckung. Ingenieurvermessung 92.
- [7] Niemeier, W., Wunderlich, T., Dr.: Geodetic Monitoring of Dams, A Comparison of Various Concepts. Proceedings of 5th Int. Symposium on Deformation Measurements, Fredricton N. B., Canada, 1988.
- [8] Keller, W.: Das Programmsystem Helmert/77 zur Berechnung allgemeiner geodätischer Netze.
- [9] Niemeier, W., und Tenger, D.: PANDA – «A menu-driven software package», Proceedings of 5th Int. Symposium on Deformation Measurements, Fredericton N.B., Canada, 1988.
- [10] Bauersima, I.: NAVSTAR/Global Positioning System (GPS III). Mitteilungen der Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald, Nr. 10, Astronomisches Institut der Universität Bern, 1983.
- [11] Chablais, H.: Le réseau actuel de triangulation et le nouveau réseau national. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 12/1992.
- [12] Frei, E., Ryf, A., und Scherrer, R.: Das GPS (Global Positioning System) und seine Anwendungsmöglichkeiten in der Ingenieurvermessung. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, ETH Zürich, 21.–26. September 1992, Dümmlers, Bonn, 1992.
- [13] Geiger, A., Kahle, H.-G., Schneider, D., Rothacher, M., Beutler, G. und Gurtner, W.: Das GPS-Testnetz Turtmann, Netzanalyse und Messkampagne 1985. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 7/1986.
- [14] Geiger, A., und Schmidt, M. J.: Das Global Positioning System GPS: NAVSTAR – ein Navigationssystem für zivile und militärische Nutzung. Vermessung, Photogrammetrie und Kulturtechnik 7/1992.
- [15] Rothacher, M., Beutler, G., Gurtner, W., und Schildknecht, Th.: Documentation for Bernese GPS Software Version 3.0., Astronomisches Institut der Universität Bern, 1988.
- [16] Schneider, D., und Wunderlin, N.: RAUMTRI, Dreidimensionale Netzausgleichung in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem. Bericht Nr. 45, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, 1981.
- [17] Wiget, A. A., und Schneider, D.: Erfahrungen mit GPS in Staumauer-Überwachungsnetzen. XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, ETH Zürich, 21.–26. September 1992, Dümmlers, Bonn, 1992.
- [18] Grün, A., Runge, A.: Projekt Heinzenberg-Präzisionsphotogrammetrie im Gebirge, VPK 7/87 pg. 271.
- [19] Pradervand, J. C.: Mensuration numérique par photogrammétrie – test comparatif. VPK 12/92 pg. 721.
- [20] Kölbl, O., Stuby, J.-J.: Mesure de déplacement du terrain à l'aide de photographies multitemporaires.
- [21] Finsterwalder, R.: Geschwindigkeitsmessungen an Gletschern mittels Photogrammetrie. Zeitschrift für Gletscherkunde, Band 19, p. 251 ff., 1931.
- [22] Flotron, A.: Verschiebungsmessungen aus Luftbildern. Mitteilung Nr. 41, 1979. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.
- [23] Häberli, W., King, L., Flotron, A.: Surface Movement and Lichen-cover Studies at the Active Rock Glacier near the Grubengletscher. Arctic and Alpine Research, Vol. 11, No. 4, 1979.
- [24] Carosio, A.: Verfahren der multivariaten Statistik zur Beurteilung der Resultate und der Zuverlässigkeit geodätischer Messsysteme. IGP-ETH, Zürich, 1983.
- [25] Carosio, A.: Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung. IGP-ETH Zürich, 1992.
- [26] Guedes, Q. M., und Coelho, P. S. M.: Statistical behaviour model of dams. Commission internationale des grands barrages. Quinzième congrès des grands barrages, Lausanne 1985, Q.56–R.16.
- [27] Witte, B., und Schmidt, H.: Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. Wittwer 1989, Kap. 11.6.
- [28] Kahmen, H.: Le système tachéométrique GEOROBOT à visé automatique, VPK 3/87, S. 99.
- [29] Matthias, H.: Der Roboter-Theodolit Topomat, VPK 8/91, S. 427.
- [30] Emch + Berger Zürich AG, Automatisches Messsystem, Broschüre Emch + Berger 1993.
- [31] Prospekte und Handbücher von Sensoren aller Art, Kataloge und Handbücher zu Computerezubehör, Handbücher zu Telekommunikationssoftware.
- [32] Frei, E.: Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System (GPS), Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 44, Schweizerische Geodätische Kommission, 1991.
- [33] Schwarz, J., Schubernigg, M.: Static, Rapid Static, Stop and Go and Kinematic Measurements on the FGCS Test Network, Maryland, U.S.A., Leica AG, Heerbrugg, Schweiz, 1992.

Schweizerisches Nationalkomitee für grosse Talsperren – Comité national suisse des grands barrages – Swiss national committee on large dams.

Sekretariat c/o Nordostschweizerische Kraftwerke AG (NOK), Parkstrasse 23, CH-5401 Baden, Fax 056/203845.

Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung c/o Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach, CH-3001 Bern, Fax 031/61 54 51.