

Mesure photogrammétrique des déformations = Photogrammetrische Vermessung

Objektyp: **Chapter**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **85 (1993)**

Heft 9

PDF erstellt am: **29.06.2024**

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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 mesuration 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'aérotriangulation, 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'aérotriangulation 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]).

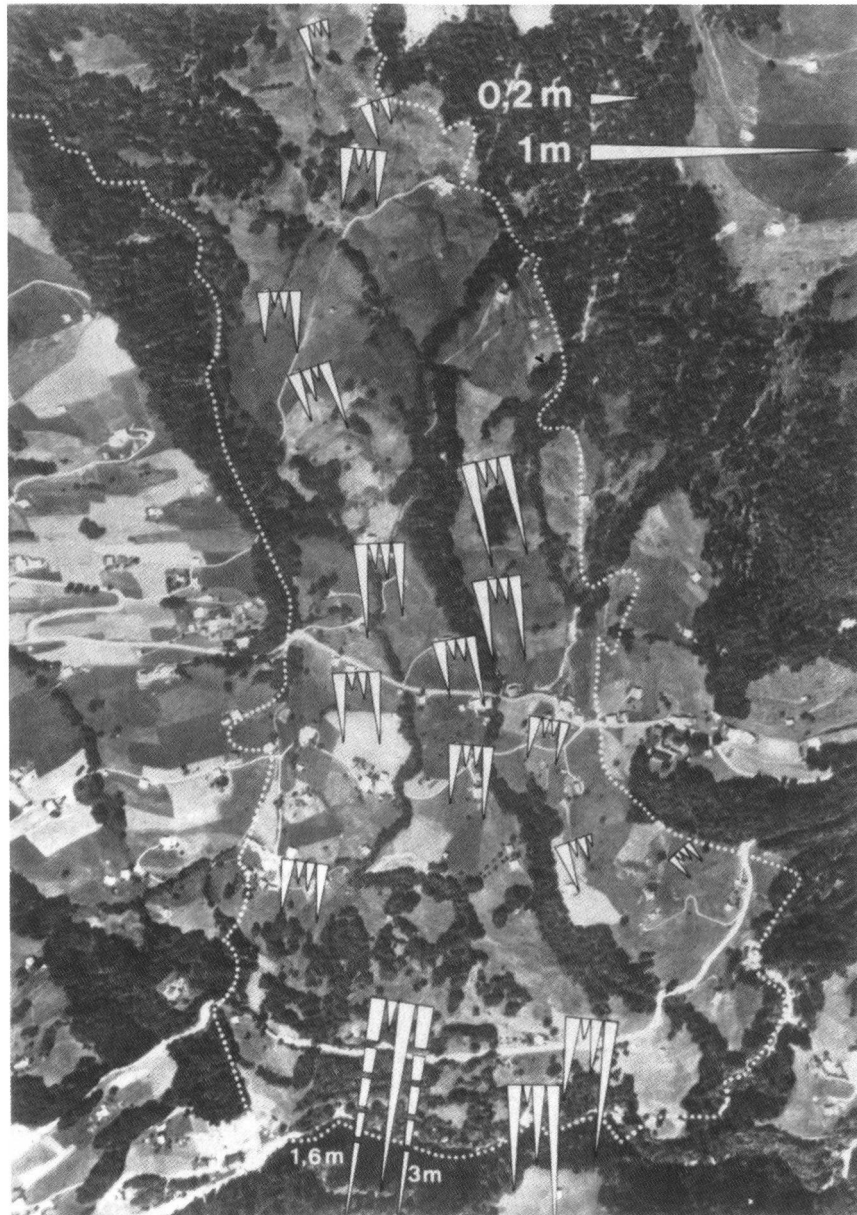


Bild 5.1. Analyse von Geländerutschungen aus Luftaufnahmen des Bundesamts für Landestopographie von 1957, 1969, 1974, 1980 und 1982. Die Pfeile zeigen die mittleren jährlichen Verschiebungen (aus Kölbl O., Stuby J.J. [20]).

5.5 La photogrammétrie utilisée pour la surveillance des ouvrages de retenue

5.5.1 Contrôle photogrammétrique 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 photogrammétrique terrestre, la surface utilisable de l'image serait de 20 × 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 photogrammétrique 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 photogrammétriques 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 photogrammétriques 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 × 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 Pradervand 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'égaux 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.

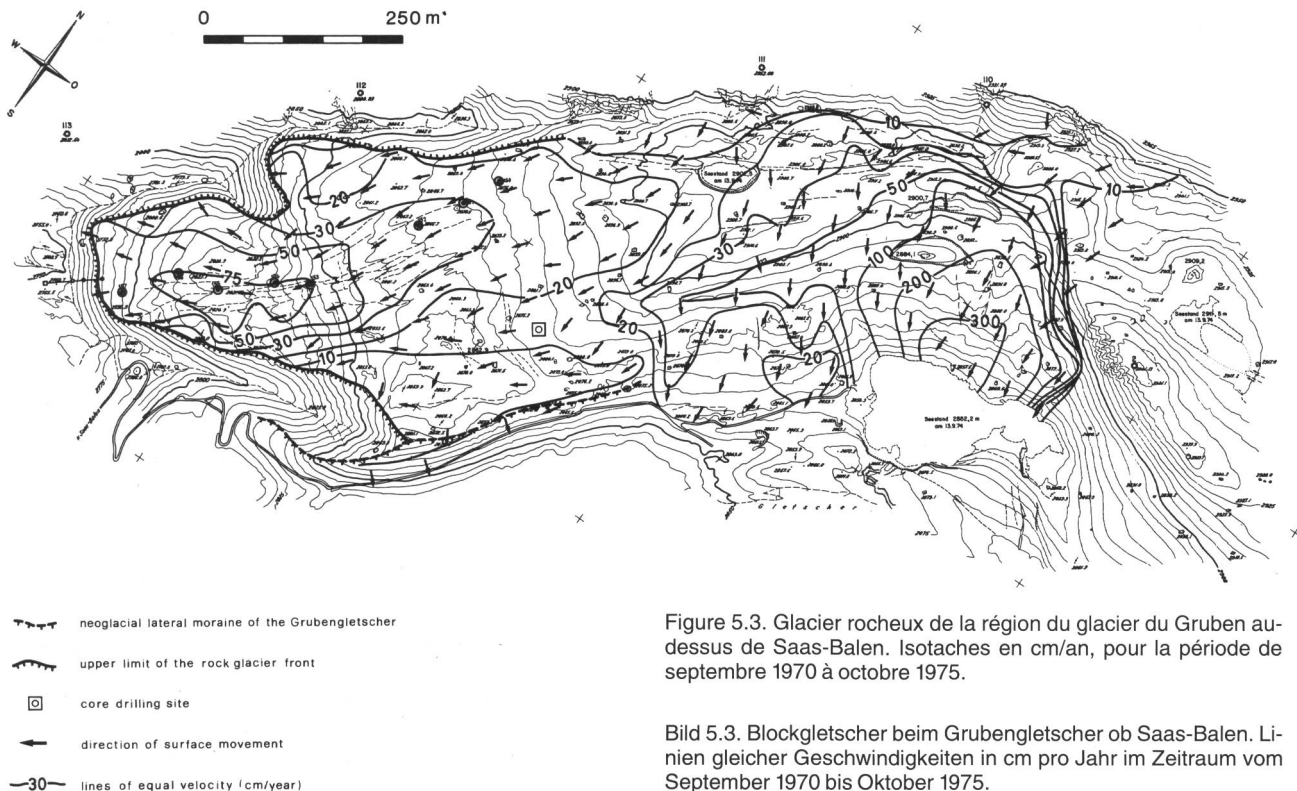


Figure 5.3. Glacier rocheux de la région du glacier du Gruben au-dessus de Saas-Balen. Isotaches en cm/an, pour la période de septembre 1970 à octobre 1975.

Bild 5.3. Blockgletscher beim Grubengletscher ob Saas-Balen. Linien gleicher Geschwindigkeiten in cm pro Jahr im Zeitraum vom September 1970 bis Oktober 1975.

Selon la précision exigée, différentes méthodes peuvent être envisagées:

Lorsque des déplacements de quelques centimètres par année peuvent se révéler critiques, des points signalés doivent être mesurés par le procédé précis de l'aéro-triangulation décrit plus haut, selon la méthode des faisceaux. La mesure test au Heinzenberg décrite par Grün et al. [18] et les travaux de Pradervand sur le champ d'essai d'Echallens [19] peuvent servir d'exemple.

Lorsque les déformations sont de l'ordre de quelques décimètres entre deux mesures consécutives et que par conséquent une haute précision n'est pas exigée, on peut renoncer à la coûteuse matérialisation des points dans le terrain ainsi qu'à leur signalisation. Des objets naturels tels que des blocs, des puits, etc. serviront de points de contrôle des déformations. Il est cependant recommandé dans tous les cas de signaler les points fixes utilisés pour ajuster les modèles uniques ou les ensembles. Des mesures photogrammétriques de glissements de terrain avec des objets naturels pour repères ont été effectuées déjà depuis un certain temps. On se référera aux travaux de l'Institut de photogrammétrie de l'EPFL «Mesure de déplacement du terrain à l'aide de photographies multitemporaires» [20] (figure 5.1).

Une méthode par laquelle les déformations d'une surface d'une certaine étendue peuvent être déterminées avec précision par la photogrammétrie repose sur l'observation stéréoscopique des variations visibles sur les photos, entre deux prises de vue, par suite du mouvement de certains objets dans le terrain. En rattachant par vue stéréoscopique les parties d'image inchangées, il n'est plus nécessaire d'identifier les points particuliers apparaissant sur chaque image. La méthode ne convient cependant que pour des zones d'étendue limitée puisque les photos doivent contenir une partie commune de terrain stable.

Ce procédé a été décrit par Finsterwalder en 1930 [21] pour la restitution de prises de vue terrestre de glaciers. Par ce procédé, on a déterminé les lignes d'égaux défor-

de unterbleiben. Als Deformationskontrollpunkte werden natürliche Objekte wie Blöcke, Schächte usw. ausgewertet. Es empfiehlt sich aber in jedem Fall, die Festpunkte zur Einpassung der Einzelmodelle oder des Bildverbandes zu signalisieren. Photogrammetrische Rutschvermessungen mit natürlichen Objekten werden schon seit einiger Zeit ausgeführt; es sei hier auf die Arbeiten des Photogrammetrischen Institutes der ETH Lausanne «Mesure de déplacement du terrain à l'aide de photographies multitemporaires» [20] verwiesen (Bild 5.1).

Eine Methode, mit der Verschiebungen flächenhaft und mit guter Genauigkeit photogrammetrisch vermessen werden können, beruht auf dem stereoskopischen Beobachten der Abbildungsänderungen, die durch die Objektwanderungen im Zeitraum zwischen den Aufnahmen stattfanden. Mit dem Zuordnen gleicher Bildpartien durch stereoskopisches Sehen müssen nicht mehr einzelne, in beiden Bildern identische Punkte identifiziert werden. Die Methode ist aber nur für Gebiete mit beschränkter Ausdehnung anwendbar, denn in den Photos muss auch unbewegtes Gelände abgebildet sein.

Das Verfahren wurde von Finsterwalder 1930 [21] zur Auswertung terrestrischer Gletscheraufnahmen beschrieben. Nach diesem Prinzip wurden die Verformungen des absturzgefährdeten Hänggletschers am Weisshorn als Linien gleicher Deformationen kartiert (Bild 5.2). Die Gletscher wurden für diese Auswertungen zweimal täglich mit einer automatischen Kamera aufgenommen.

Die Anwendung dieser Methode zur Ausmessung von Luftaufnahmen ist im Aufsatz [22] vorgestellt. Ein Beispiel dazu ist die Bestimmung der Kriechgeschwindigkeit am Blockgletscher im Gebiet des Grubengletschers [23] ob Saas-Balen (Bild 5.3).

5.5.3 Allgemeine Geländeüberwachungen mit Photos

Periodische photographische Aufnahmen ab terrestrischen Standorten oder aus der Luft – von Hand oder mit

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

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

5.5.3 Surveillance photographique du terrain

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

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

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

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

6. Exploitation, précision et fiabilité

Alessandro Carosio et Hubert Dupraz

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

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

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

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

6. Auswertung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Alessandro Carosio und Hubert Dupraz

6.1 Grundzüge und Ziele der geodätischen Deformationsmessungen und -analysen

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

Die Deformationsanalyse seitens der Vermessungsspezialisten umfasst im wesentlichen:

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