

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 97 (1999)

Heft: 9

Artikel: Photogrammetrische Deformationsmessungen an der Staumauer Nalps : eine Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie auf grosse Bauwerke

Autor: Maur, C. Auf der / Erny, D. / Maas, H.-G.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235573>

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: 13.01.2026

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

Photogrammetrische Deformationsmessungen an der Staumauer Nalps

Eine Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie auf grosse Bauwerke

An der Staumauer Nalps in Graubünden wurde eine Pilotstudie über die Anwendbarkeit der Nahbereichsphotogrammetrie auf Deformationsmessungen an grossen Bauwerken durchgeführt. Die Photogrammetrie kann nicht alle Probleme, die Deformationsmessungen an Staumauern betreffen, lösen. Sie kann jedoch ein sehr nützliches Instrument für die Verdichtung von konventionellen geodätischen Messungen darstellen, vor allem wenn eine grosse Anzahl von Punkten in kurzen Zeitabständen gemessen werden müssen. Die photogrammetrische Datenaufnahme kann innerhalb von Minuten durchgeführt werden, wenn vernünftige Lösungen für die Signalisation von Staumauern gefunden werden können. Die Auswertung kann grösstenteils automatisiert werden. Es ist möglich, mit den heute erhältlichen hochauflösenden Stillvideokameras Genauigkeiten in der Grössenordnung von 2–3 mm zu erreichen, wobei in Zukunft mit weiteren Genauigkeitsverbesserungen gerechnet werden kann.

Le barrage de Nalps aux Grisons a fait l'objet d'une étude pilote sur l'applicabilité de la photogrammétrie à courte distance en matière de mesure de déformations de grands ouvrages. La photogrammétrie n'est pas en mesure de résoudre tous les problèmes concernant la mesure des déformations de barrages. Elle représente cependant un instrument très utile pour la densification de mesures géodésiques conventionnelles, surtout quand il s'agit de mesurer un grand nombre de points en de courts intervalles de temps. Le levé de données photogrammétriques peut être exécuté en quelques minutes dans la mesure où il est possible de trouver des solutions raisonnables pour la signalisation des barrages. L'exploitation des données, dans une large mesure, peut être automatisée. Il est possible, aujourd'hui, d'atteindre des précisions de l'ordre de 2–3 mm avec les caméras vidéo numériques à haute résolution qu'on peut acquérir actuellement, alors qu'on peut s'attendre, à l'avenir, à d'autres améliorations de la précision.

Nella diga in cemento armato di Nalps nei Grigioni è stato condotto uno studio pilota relativo all'applicazione della fotogrammetria ravvicinata sulla misura delle deformazioni delle dighe. La fotogrammetria non è in grado di risolvere tutti i problemi pertinenti alle misure di deformazione delle dighe. Tuttavia, questo può essere uno strumento molto prezioso per l'infittimento delle convenzionali misure geodesiche, specialmente quando si tratta di misurare un gran numero di punti in brevi intervalli di tempo. Il rilievo fotogrammetrico dei dati è realizzabile in un paio di minuti quando si tratta di trovare delle ragionevoli soluzioni per la segnalazione di dighe. Inoltre, gran parte della valutazione può essere automatizzata. Oggi con le nuove videocamere ad alta risoluzione è possibile pervenire a precisioni nell'ordine di grandezza di 2–3 mm benché il futuro prospetti già ulteriori livelli di precisione.

C. Auf der Maur, D. Erny, H.-G. Maas

Einleitung

Methoden der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie für die Bestimmung von 3D-Koordinaten in industriellen Anwendungen haben in den letzten zehn Jahren schnelle Verbreitung gefunden. Mit der Verwendung von hochauflösenden Kameras, stark redundanten Bilddatensätzen sowie geeigneten geometrischen und stochastischen Modellen der Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung sind Genauigkeiten besser als 1:100 000 der Objektausdehnung erreichbar. Zusammen mit günstigen Hardwarekosten und schneller Datenaufnahme und Datenauswertung macht dieses Genauigkeitspotential die digitale Nahbereichsphotogrammetrie zu einem interessanten Werkzeug für 3D-Messungen in vielen verschiedenen neuen Anwendungsbereichen.

Verglichen mit anderen 3D-Koordinatenmessmethoden zeigt die Photogrammetrie vor allem Vorteile, wenn eine grosse Anzahl von Zielmarken wiederholt gemessen werden muss. Dies ist bei Deformationsmessungen oft der Fall. Ein Beispiel für die Anwendung der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie auf Deformationsmessungen grosser Bauwerke ist die Durchführung einer Pilotstudie an der Staumauer Nalps in Graubünden. Die Staumauer hat eine Höhe von etwa 100 Metern und eine Länge von 480 Metern. Sie kann, abhängig vom Wasserstand, der Temperatur und Eisbildung, Deformationen von bis zu 80 mm erfahren und muss in regelmässigen Zeitabständen überwacht werden. Deformationsmessungen an Staumauern werden vorwiegend mit geodätischen Messungen durchgeführt. Neben Lotungen, Dehnungsmessstreifen und Alignements werden üblicherweise geodätische Netzmessungen für die Bestimmung von 3D-Koordinaten an der Luftseite der Mauer verwendet; die erreichbare Genauigkeit bei geodätischen Netzmessungen mit Theodolit und elektrooptischem Distanzmesser liegt in der



Abb. 1: Staumauer Nalps, Graubünden.

Größenordnung von einem Millimeter. Die Verwendbarkeit von GPS ist beschränkt, unter anderem weil Satellitensignale in der Umgebung von Staumauern oft nur schlecht empfangen werden können.

Die Photogrammetrie wurde bisher für diese Art von Anwendung als nicht genügend genau betrachtet. Zudem erweist sich die Signalisierung als schwierig, und die Messung von für eine zuverlässige Deformationsanalyse oft unabdingbaren Fernzielen stellt grosse Probleme für die photogrammetrische Netzplanung und Datenaufnahme. Andererseits bieten die Methoden der digitalen Photogrammetrie eine schnelle, ökonomische und vielseitige Möglichkeit für 3D-Deformationsmessungen. Die Genauigkeiten, welche mit grossformatigen Stillvideokameras erreicht werden können, sind nunmehr so gut, dass eine Neuevaluation der photogrammetrischen Techniken für Deformationsmessungen an Staumauern gerechtfertigt scheint. Vor allem wenn eine grosse Anzahl Punkte gemessen werden muss, scheint die Verwendung der digitalen Photogrammetrie für die Verdichtung von konventionellen geodätischen Messungen vielversprechend.

Das Ziel der Pilotstudie in Nalps war daher, die Anwendbarkeit und das Genauigkeitspotential der heutigen photogrammetrischen Methoden für die 3D-Objektkoordinaten-Bestimmung an Staumauern zu testen. Eine ähnliche Studie wurde bereits 1994 an der Staumau-

er Luzzzone durchgeführt (Kersten et al., 1995); das Genauigkeitspotential der Methode erwies sich jedoch damals als noch nicht ausreichend.

Datenaufnahme

Es wurden 60 gut verteilte Messpunkte an der Luftseite der Mauer signalisiert. Die Signalisation der Punkte erfolgte mit schwarzen Platten, auf die ein rundes weisses Signal mit einem Durchmesser von 25 cm sowie eine kleine zentrierte Zielmarke für Referenzmessungen mit dem Theodolit angebracht wurden. Der durchschnittliche Durchmesser der Signale auf den digitalen Bildern beträgt 3–5 Pixel. Diese Grösse der Signale muss als Kompromiss verstanden werden zwischen den Anforderungen der Messmethode (erfordert grosse Signale für Subpixel-Genauigkeit in der Bildkoordinaten-

Bestimmung) und praktischen Einschränkungen (erfordert kleine Signale). Mit einer Abseil-Aktion wurden die Signale an die Staumauer geklebt (Abb. 2). Für eine professionelle Nutzung der Methode ist das Signaldesign und das Anbringen an die Staumauer noch zu optimieren; vorzugsweise sollte die Signalisierung schon bei der Planung und beim Bau der Staumauer integriert werden.

Für die photogrammetrische Aufnahme wurde eine digitale Stillvideokamera Kodak DCS460 mit einem 3060 x 2036 Pixel CCD Sensor und einer Speicherkapazität für 42 unkomprimierte Bilder auf einer internen PCMCIA Disk verwendet. Als autonome Einheit zur computerunabhängigen Akquisition und Speicherung hochauflösender digitaler Bilder stellt diese ein ideales Werkzeug für die Photogrammetrie in Feldanwendungen dar. Zwei unabhängige Datensätze wurden mit einem 18 mm Objektiv und einem 28 mm Objektiv aufgenommen. Im ersten Projekt wurden insgesamt 34 Bilder aufgenommen, davon 6 zur Optimierung der Netzgeometrie aus einem Helikopter. Als Wiederholungstest wurde eine zweite Serie von Bildern mit der gleichen Kamera erfasst, diesmal mit einem 28 mm Objektiv. Für diesen Test wurden 41 Bilder gemacht, davon wiederum 6 vom Helikopter aus. Aus Zeitgründen wurden die Kampagnen in einer kurzen Zeitspanne durchgeführt und können nicht als zwei verschiedene Epochen angesehen werden, so dass sie nicht für eine Deformationsanalyse verwendet werden können,



Abb. 2: Anbringen der Zielmarken an der Staumauer.

sondern ausschliesslich für eine Analyse des Genauigkeitspotentials von 3D-Koordinatenmessungen. Referenzkoordinaten der Zielmarken, die als Kontrollpunkte verwendet werden, wurden durch Theodolitbeobachtungen mit Vorwärtschnitten von drei Stationen aus bestimmt. Dabei wurde für die meisten Zielmarken eine Standardabweichung von 2 mm in allen drei Koordinatenrichtungen erreicht. Wegen der limitierten Sichtbarkeit und der nicht optimalen Netzgeometrie mussten am linken und rechten Rand der Mauer signifikant schlechtere Standardabweichungen in Kauf genommen werden.

Auswertung der Daten

Die Bilddaten wurden halbautomatisch ausgewertet (Auf der Maur et al. 1997/98): signalisierte Punkte wurden in allen Bildern von einem Operateur identifiziert und dann automatisch durch Least Squares Template Matching mit Subpixel-Genauigkeit gemessen. Mit diesen Bildkoordinaten und geodätisch bestimmten Passpunkten wurden die 3D-Objektkoordinaten aller Signale durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt. Wenn bei Deformationsmessungen Objektkoordinaten aus früheren Epochen verwendet werden können, kann diese Prozedur für Wiederholungsmessungen weitgehend automatisiert werden.

Die Signale konnten in 6 bis 23 Bildern gemessen werden, mit einem Durchschnitt von 14 Strahlen pro Punkt und von 22 Punkten pro Bild. Verschiedene Passpunktverteilungen wurden in der Bündelblockausgleichung getestet, wobei die geodätisch bestimmten Koordinaten der übrigbleibenden Punkte für eine Kontrolle der äusseren Orientierung verwendet wurden. Um Objektivverzerrung, innere Orientierung und andere systematische Fehler der Kamera zu kompensieren, wurden Zusatzparameter eingeführt. Die Kodak DCS460 ist bekannt für ihre mechanischen Stabilitätsprobleme, welche zu einer instabilen inneren Orientierung und einer u.U. deutlichen Verschlechterung

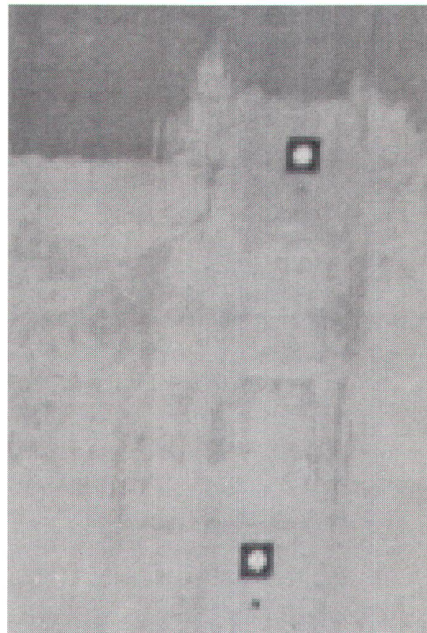


Abb. 3: Zielmarken in einem Bildausschnitt.

der Resultate photogrammetrischer Messungen führt. Dies kann zum Teil kompensiert werden, indem ein teilweise projektiver Ansatz mit iterativer Bestimmung einer inneren Orientierung für jede Aufnahme gewählt wird (Maas, 1998).

Resultate

Die Resultate der photogrammetrischen Datenauswertung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Y-Richtung, welche zugleich die Richtung mit den grössten Deformationen ist, steht senkrecht zur Staumauer. Wegen den relativ schlechten Referenzkoordinaten der äusseren Punkte der Mauer, wurde die Kontrollpunktanalyse auf 20 Punkte im mittleren Teil der Mauer beschränkt. Obwohl auch die photogrammetrische Netzgeometrie für diese äusseren Punkte nicht optimal war, wurden sie bei der Ausgleichung mit einbezogen. Mit einer ausge dehnten Nutzung des Helikopters, was

für eine professionelle Nutzung der Methode eindeutig empfohlen wird, kann die Netzkonfiguration wesentlich verbessert werden.

Setzt man die Standardabweichungen in Relation zur Breite der Staumauer, so erhält man eine relative Genauigkeit der photogrammetrisch bestimmten 3D-Koordinaten von besser als 1:100 000. Die inneren Genauigkeitsparameter werden durch die aus Kontrollpunkten ermittelten Abweichungen bestätigt. Dennoch ist der Gewichtseinheitsfehler von ca. 1/15 Pixel, verglichen mit den in industriellen Anwendungen der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie üblicherweise erreichten Werten um 1/50 Pixel, nicht optimal. Als Ursache dafür können eine Reihe von Problemen angesehen werden:

- Die durch die Instabilität der Kamera entstehenden Probleme werden durch den gewählten Ansatz nur teilweise kompensiert; auch wurde die Sensortopographie des CCD Sensors nicht weiter untersucht.
- Die Grösse der Signale muss als Kompromiss angesehen werden. Mit grösseren Signalen kann eine bessere Messgenauigkeit im Bildraum erwartet werden.
- Die terrestrischen Bilder, die Helikopter-Bilder und die Theodolit-Daten wurden aus organisatorischen Gründen an verschiedenen Tagen unter ziemlich unterschiedlichen Wetterbedingungen aufgenommen; dies könnte bereits eine kleine Deformation der Staumauer verursacht haben.

Mit dem Verwenden von 12 Passpunkten war die Netzgeometrie stark genug, um eine unabhängige innere Orientierung für jedes Bild zu bestimmen; auf diese Weise konnten die Effekte der Instabilität des Kamerakörpers mindestens teilweise kompensiert werden. Diese Parametrisierung schwächt jedoch die Netzgeometrie.

Projekt	$\hat{\sigma}_0$ [μm]	Theoretische Genauigkeit [mm]			Kontrollpunkt RMS [mm]		
		$\hat{\sigma}_x$	$\hat{\sigma}_y$	$\hat{\sigma}_z$	μ_x	μ_y	μ_z
DCS460-18	0.58	3.0	3.0	1.9	3.7	2.8	2.4
DCS460-28	0.55	2.7	2.8	1.6	3.5	1.8	2.5

Simulationen haben gezeigt, dass mit einer geometrisch stabilen Kamera bei der Verwendung von weniger Passpunkten eine bessere Genauigkeit im Objektraum erreicht werden kann.

Trotz allem ist die Genauigkeit dank der grossen Anzahl Beobachtungen pro Punkt bereits akzeptabel, wenngleich noch nicht vollständig befriedigend. Dabei muss noch angemerkt werden, dass die Standardabweichungen der geodätischen Koordinaten nicht viel kleiner sind als die der photogrammetrisch bestimmten Koordinaten, und erstere daher sicher nicht uneingeschränkt als Referenzkoordinaten betrachtet werden können.

Mit einer verbesserten Signalisierung und einer durch konsequenten Einsatz eines Helikopters optimierten Netzgeometrie können mit der gleichen Kamera wahrscheinlich noch deutlich bessere Resultate erzielt werden. Zudem ist der Trend zu grösseren CCD Sensoren ungebrochen: Geeignete Kameras mit Sensoren von 4096 x 4096 Pixel und mehr werden bald kommerziell erhältlich sein und dürften zu einer weiteren Genauigkeitssteigerung führen.

Schlussfolgerung

Obwohl die Resultate noch nicht ganz befriedigend sind, hat die Pilotstudie gezeigt, dass die digitale Photogrammetrie

eine interessante Option für die Bestimmung von 3D-Koordinaten und Deformationsvektoren von signalisierten Punkten an Staumauern darstellt. Die RMS-Koordinatendifferenzen zwischen photogrammetrisch bestimmten 3D-Koordinaten und geodätisch bestimmten Koordinaten liegen in der Grössenordnung von nur 2–3 mm in allen drei Richtungen. Mit einigen Suboptimalitäten in der Pilotstudie bezüglich Signalisation, Netzkonfiguration und mechanischer Stabilität der Kamera sowie der fortschreitenden Entwicklung in der Sensortechnologie kann eine weitere Verbesserung des Genauigkeitspotentials vorausgesagt werden. Obwohl photogrammetrische Methoden nicht alle Probleme lösen können, die im Zusammenhang mit Deformationsmessungen an Staumauern auftreten, kann diese als eine interessante Alternative für die Verdichtung von geodätischen Netzen dienen.

Dank

Die Autoren danken Erwin Degonda und den Kraftwerken Vorderrhein für die grosse Unterstützung; Ivan Bürcher und Beat Isler für die gute Zusammenarbeit bei der Signalisation, der Feldarbeit und der Datenauswertung; Adrian Ryf für seine Unterstützung bei der geodätischen Datenaufnahme und Datenauswertung.

Literatur:

1. Auf der Maur, C., Bürcher, I., Erny, D., Isler, B., 1997/98: Photogrammetrische Punktbestimmung an der Staumauer Nalps. Diplomarbeiten IGP, ETH Zürich.
2. Kersten, Th., Maas, H.-G., Piezzi, K., Schmassmann, E., 1995: Photogrammetrische Punktbestimmung bei der Überwachung von Staumauern. VPK 4/95.
3. Maas, H.-G., 1998: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. DGPF-Jahrestagung, München.

Claudia Auf der Maur
Swissphoto Vermessung AG
Dorfstrasse 53
CH-8105 Regensdorf-Watt
e-mail: claudia.aufdermaur@swissphoto.ch

David Erny
Jordi + Kolb AG
Bärenstutz 15
CH-3110 Münsingen
e-mail: geo@jordikolb.ch

Hans-Gerd Maas
TU Delft
Thijsseweg 11
NL-2629JA Delft
Niederlande
e-mail: h.-g.maas@geo.tudelft.nl

WELTMARKE **HAFF**



Zeicheninstrumente für:
Schule - Technik - Vermessung

Bitte verlangen Sie Unterlagen über:
Demandez la documentation sur:
☐ Schulreisszeuge / *compas pour école*
☐ Gesamtkatalog / *Catalogue général*
☐ Planimeter / *Planimètre*

B.I.S. KOHLER
Maraîche 11
1802 Corseaux
Tel. 021 921 54 19
Fax 021 922 99 19

Firma / Maison: _____

Str. Rue: _____

PLZ Ort / NP Lieu: _____

Tel. _____

Wir offerieren Ihnen eine **Praktikumsstelle** in

Ingenieurvermessung und als CAD-Zechner für Energieversorgung

Antritt: per sofort



Bewerbungen an
SCHENKEL VERMESSUNGEN AG
Lindenbachstrasse 9
CH-8006 Zürich
Telefon 01/361 07 00
Telefax 01/361 56 48