

## 3-D Punktmessung an einer Staumauer

### Aufgabe:

Staumauern zeigen saison- und wasserstandsbedingte Deformationen, welche bei Kronenhöhen von 100 – 200 Metern in der Kronenmitte typischerweise bis zu 15 cm betragen können. Aus Sicherheitsgründen sind Deformationsmessungen in regelmäßigen Zeitabständen vorgeschrieben. Zu diesen Messungen gehören Lotungen, Alignements und Dehnungsmeßstreifen auf und in der Mauer. Zudem werden üblicherweise geodätische Strecken- und Richtungsnetze gemessen, wobei die Koordinaten von Pfeilerpunkten auf der Krone und auf Kanzeln an der Luftseite der Mauer sowie von Referenzpunkten außerhalb der Mauer bzw. ihres Widerlagers bestimmt werden. Dabei werden Genauigkeiten von etwa einem Millimeter erzielt, die Anzahl der Mauerpunkte ist jedoch wegen des Signalisierungs- und Meßaufwandes meist sehr klein.

In einer Pilotstudie im Rahmen des Diplomvermessungskurses der ETH Zürich 1997 wurde die Anwendbarkeit photogrammetrischer Verfahren der Deformationsmessung an Staumauern evaluiert, zunächst mit dem Ziel der Ergänzung bzw. Verdichtung geodätischer Messungen. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades bei der Auswertung erlaubt die Photogrammetrie die Aufnahme einer deutlich größeren Anzahl von Meßpunkten, was es dem Staumauerbetreiber erlaubt, über die reine Deformationsanalyse hinaus beispielsweise auch Schereffekte zu untersuchen. Die Studie wurde an der Staumauer Nalps im Schweizer Kanton Graubünden durchgeführt. Bei der Staumauer Nalps handelt es sich um eine Betonmauer mit einer Kronenlänge von 480m und einer Höhe von 100m auf der Luftseite. Die maximalen Deformationen der Mauer betragen in Abhängigkeit vom Wasserstand sowie saisonalen und kurzfristigen Temperatureffekten etwa 80 mm.



Abb. 1: Staumauer Nalps

**Datenakquisition und -verarbeitung:**

Aufgrund der sehr hohen Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit wurden Punkte an der Staumauer durch Zielmarken signalisiert. Im Gegensatz zu den Meßpfeilern für die geodätische Netzmessung, welche schon während der Bauphase angebracht wurden, mußten die Zielmarken für die photogrammetrische Punktbestimmung im Rahmen der Pilotstudie nachträglich angebracht werden. Dabei wurden im alpinistischen Stil insgesamt 60 regelmäßig verteilte Zielmarken aufgeklebt. Um eine Bildkoordinatenbestimmung mit Subpixelgenauigkeit zu ermöglichen und einen Durchmesser von mindestens 4-5 Pixeln im Bild zu gewährleisten, wurden die Zielmarken als weiße Kunststoffscheiben mit einem Durchmesser von 25 cm auf schwarzem Hintergrund realisiert; zusätzlich wurde eine zentrische Markierung für eine Referenzmessung per Theodolit integriert.

Für die Aufnahmen stand eine digitale Stillvideokamera Kodak DCS460 mit 3060 x 2036 Pixel CCD Sensor zur Verfügung. Zwei unabhängige Datensätze wurden mit einem 18 mm und einem 28 mm Objektiv aufgenommen. Die Aufnahmen wurden zum Teil von terrestrischen Standpunkten und zum Teil von einem Helikopter aus gemacht. Referenzkoordinaten wurden durch geodätische Netzmessung beschafft.



Abb. 2: Anbringen von Zielmarken an der Staumauer

Projektparameter Staumauer Nalps:

	Kamera	Objektiv	Aufnahmen	Maßstab	Strahlen / Punkt
Nalps - 18	DCS460	18 mm	34	8200	14.7
Nalps - 28	DCS460	28 mm	41	6400	13.8

Im Rahmen der Pilotstudie wurden die Bilddaten halbautomatisch verarbeitet: Signalisierte Punkte wurden durch einen Operateur identifiziert und durch Least-Squares Template Matching automatisch gemessen. Eine volle Automatisierung der Auswertung der Bilddaten weiterer Kampagnen ist möglich, war jedoch nicht Ziel der Pilotstudie. Die 3-D Koordinaten der signalisierten Punkte wurden durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt. Der Block wurde auf geodätisch bestimmte Paßpunkte gelagert.

**Resultate:**

Die Bündelblockausgleichung der Bildverbände führte zunächst zu nicht zufriedenstellenden Punktgenauigkeiten. Als Ursache dafür wurden Instabilitäten der inneren Orientierung der Kamera identifiziert – ein bekanntes Problem bei digitalen Stillvideokameras. Diese Instabilitäten wurden durch eine Parametrisierung mit einer eigenen inneren Orientierung für jedes Bild kompensiert. Aufgrund der geringen Tiefenausdehnung der Mauer bedingte dies die Verwendung einer größeren Anzahl von Paßpunkten. Gute Ergebnisse wurden mit einer Lagerung des Bildverbandes auf 12 Paßpunkte erzielt.

Die Topographie in der Umgebung der Staumauer bot zu wenige Standpunkte für die Realisierung einer optimalen Netzgeometrie und verursachte zudem einige Sichtbeschränkungen. Da auch der Helikopter nur für sehr kurze Zeit zur Verfügung stand, ergaben sich für die Punkte am rechten und linken Rand teilweise zu wenige Strahlen und ungünstige Strahlenschnitte. Um dennoch für einen optimierten Einsatz des Verfahrens repräsentative Aussagen treffen zu können, wurde die Genauigkeitsanalyse auf 20 Neupunkte im deformationstechnisch relevantesten mittleren Teil der Mauer beschränkt. Die folgende Tabelle faßt die wichtigsten Ergebnisse zusammen:

	innere Genauigkeit				äußere Genauigkeit		
	$\hat{\sigma}_0$ [µm]	$\hat{\sigma}_X$ [mm]	$\hat{\sigma}_Y$ [mm]	$\hat{\sigma}_Z$ [mm]	$\mu_X$ [mm]	$\mu_Y$ [mm]	$\mu_Z$ [mm]
Nalps - 18	0.58	3.0	3.0	1.9	3.7	2.8	2.4
Nalps - 28	0.55	2.8	1.6	2.4	3.5	1.8	2.5

Die Standardabweichungen der Neupunktkoordinaten aus der Bündelblockausgleichung ( $\sigma_{XYZ}$ ) liegen bei 2-3 mm und werden durch die Abweichungen zur geodätischen Referenzmessung ( $\mu_{XYZ}$ ) weitgehend bestätigt. Die X-Koordinate zeigt hier senkrecht zur Mauer.

Die Ergebnisse der photogrammetrischen Punktbestimmung erreichen noch nicht ganz das Genauigkeitsniveau einer guten geodätischen Netzmessung. Aufgrund einiger Suboptimalitäten in der Pilotstudie besteht jedoch noch Raum für Verbesserungen:

- Die Standardabweichungen der Gewichtseinheit betrug nur etwa  $1/15$  Pixel, während in anderen Anwendungen derselben Kamera mehrmals Werte von  $1/40$  -  $1/50$  Pixel erreicht wurden. Dies ist u.a. auf die Signalisierung mit eher zu kleinen Zielmarken zurückzuführen.
- Die Netzgeometrie war insbesondere an den Seiten der Mauer zu schwach. Bei konsequentem Einsatz eines Helikopters und insgesamt noch höherer Redundanz können hier noch wesentliche Verbesserungen erzielt werden.
- Die geometrischen Instabilitäten der Kamera erzwangen die Verwendung einer unrealistisch großen Anzahl von Paßpunkten. Bei Verwendung einer stabileren Kamera könnte der Bedarf auf etwa 4-6 Paßpunkte reduziert werden.

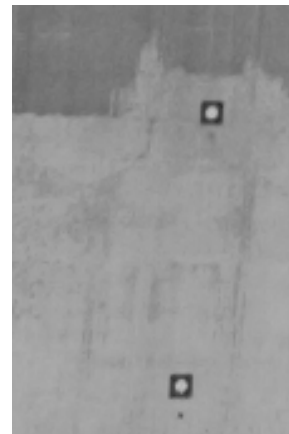


Abb. 3: Zielmarken im Bild

Mit diesen Verbesserungen kann ein Genauigkeitspotential erwartet werden, welches demjenigen geodätischer Netzmessungen kaum mehr nachsteht. Allerdings kann die Photogrammetrie nicht alle im Rahmen der Deformationsmessung auftretenden Probleme lösen. Insbesondere für die Bestimmung von Paßpunkten und die für die für eine Deformationsanalyse benötigten sicheren Punkte außerhalb des Widerlagers der Mauer empfiehlt sich die Kombination mit geodätischen Strecken- und Richtungsnetzen oder GPS-Messungen. Die Photogrammetrische Punktbestimmung eignet sich somit primär zu einer effizienten Verdichtung geodätischer Messungen.

**Literaturhinweise**

Maas, H.-G., 1998: Photogrammetric techniques for deformation measurements on masonry reservoir walls. Invited Paper for the IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Eisenstadt/Austria, pp. 319-324

Maas, H.-G., 1998: Ein Ansatz zur Selbstkalibrierung von Kameras mit instabiler innerer Orientierung. 18. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF (Hrsg. Albertz/Dech), Publikationen der DGPF, S. 47-53

Auf der Maur, C., Erny, D., Maas, H.-G., 1999: Photogrammetrische Deformationsmessungen an der Staumauer Nalps - eine Anwendung der Nahbereichsphotogrammetrie auf grosse Bauwerke. VPK 9/99, S. 479-482

**Kontakt:**

Adresse	Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung Technische Universität Dresden Helmholtzstr. 10 01062 Dresden		
Tel.:	+49 (0)351 - 4633 2859	Fax:	+49 (0)351 - 4633 7266
E-Mail:	<a href="mailto:hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de">hmaas@rcs.urz.tu-dresden.de</a>		
Internet:	<a href="http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~hmaas/hg_maas.html">http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~hmaas/hg_maas.html</a>		