

Photogrammetrische Flussbettvermessung

Thomas Geisler¹, Maria del Pilar Caballo-Perucha²

¹ Dipl.-Ing., Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz

² Dipl.-Ing., MAS, Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Graz

KURZFASSUNG

Im Hermann-Grengg-Laboratorium der TU Graz wird die Methode der digitalen Photogrammetrie zur räumlichen Vermessung von Flussmodellen eingesetzt. Dieser Beitrag möchte sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die praktische Anwendung des Verfahrens erläutern. Nach Meinung der Autoren weist die photogrammetrische Flussbettvermessung zahlreiche Vorteile auf, weshalb das Verfahren in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnte.

1 MOTIVATION

Für die Beantwortung vieler Aufgabenstellungen im wasserbaulichen Versuchswesen ist eine wirklichkeitsgetreue Modellierung der Flusssohle erforderlich. Die erreichbare Genauigkeit hängt dabei auch von der Art der Dokumentation der entstandenen Sohlmorphologie ab. Bei der Erstellung einer Zusammenschau vorhandener Verfahren zur Flussbettvermessung stieß einer der Autoren auf Arbeiten, die über den erfolgreichen Einsatz photogrammetrischer Messverfahren berichteten (Geisler et al. 2003). In Zusammenarbeit mit dem Institut für Digitale Bildverarbeitung wurden an der TU Graz noch im selben Jahr Versuche durchgeführt, die viel versprechende Ergebnisse lieferten. Im Rahmen eines vom Verband der Elektrizitätsunternehmen Österreichs (VEÖ) finanzierten Forschungsprojektes konnte die photogrammetrische Flussbettvermessung in Graz weiter verfolgt und in ein operationell einsetzbares Verfahren übergeführt werden.

2 MESSVERFAHREN

2.1 Grundlagen

Die photogrammetrische Flussbettvermessung beruht wie das menschliche Sehen auf dem Prinzip der Doppelbildmessung. Zwei von unterschiedlichen Standpunkten aufgenommene Bilder eines Objektes ermöglichen die dreidimensionale Rekonstruktion desselben nach dem Verfahren des räumlichen Vorwärtseinschnittes; jeder Objektpunkt kann durch den Schnitt zweier Bildstrahlen bestimmt werden. In Abbildung 1 auf der nächsten Seite sind die Augen auf P gerichtet, die Bilder von P entstehen in F' und F''. Für die Bilder P'₁ und P''₁ des vor P liegenden Objektpunktes P₁ sind die Abstände F'P'₁ und F''P''₁ verschieden. Nach ihrer Differenz F''P''₁ - F'P'₁, der Parallaxe p_H, wird der räumliche Tiefenunterschied beurteilt. Der in derselben Entfernung wie P liegende Objektpunkt P₂ zeigt keine Parallaxe, da für ihn F'P'₂ = F''P''₂ ist. P₂ wird daher in der gleichen Entfernung gesehen wie P.

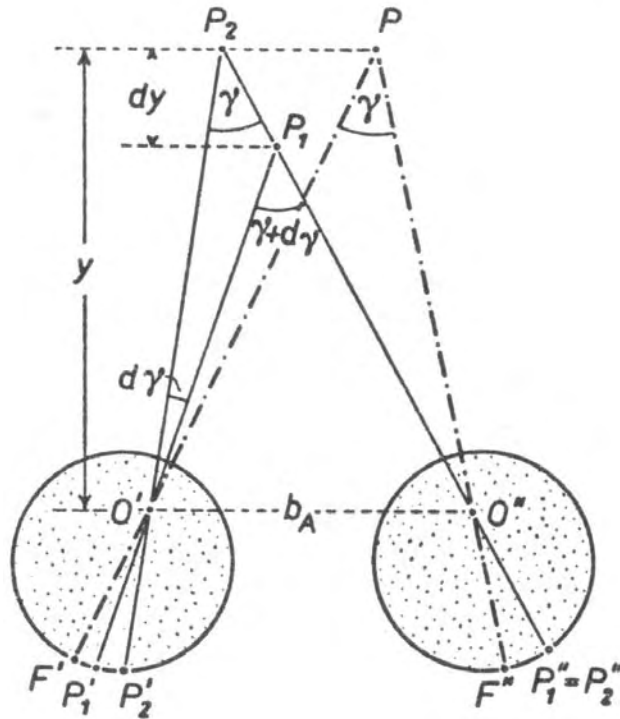


Abbildung 1: Natürliches räumliches Sehen (Lehmann 1969).

Die Abbildung eines Objektpunktes durch ein Kameraobjektiv geschieht mittels eines Strahlenkegels, für dessen Öffnung der Durchmesser der Öffnungsblende maßgeblich ist. Anders als bei einer Lochkammer erhält man dadurch keine ideale Abbildung, die durch das einfache Gesetz der Zentralprojektion beschrieben werden kann. Sofern man aber die Abweichungen von diesem Gesetz kennt und berücksichtigt, genügt es für die praktische Anwendung, von der Vorstellung der idealen Abbildung auszugehen. Mathematisch wird die Transformation zwischen Raum- und Bildkoordinaten eines Objektes über die Grundgleichungen der projektiven Geometrie beschrieben:

$$u = \frac{\bar{a}_1 X + \bar{a}_2 Y + \bar{a}_3 Z + \bar{a}_4}{\bar{c}_1 X + \bar{c}_2 Y + \bar{c}_3 Z + \bar{c}_4}, \quad v = \frac{\bar{b}_1 X + \bar{b}_2 Y + \bar{b}_3 Z + \bar{b}_4}{\bar{c}_1 X + \bar{c}_2 Y + \bar{c}_3 Z + \bar{c}_4} \quad (1)$$

wobei u, v die Bildkoordinaten und X, Y, Z die Raumkoordinaten darstellen. Die Parameter \bar{a}_i, \bar{b}_i und \bar{c}_i ($i = 1,4$) beschreiben die gegenseitige Lage von Bildebene und Projektionszentrum (Daten der inneren Orientierung) und die räumliche Lage der Kamera (Daten der äußeren Orientierung).

2.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung erfasst die Geometrie der Bilderzeugung in der Kamera. Sie wird von der Brennweite f , den Koordinaten u_0, v_0 des Hauptpunktes der Kamera und den Verzeichnisparametern des Objektivs bestimmt. Bei handelsüblichen Spiegelreflexkameras ändert sich die innere Orientierung mit dem Objektiv und den Aufnahmeeinstellungen, weshalb für photogrammetrische Bildaufnahmen stets mit exakt derselben, zuvor kalibrierten Konfiguration gearbeitet werden muss.



Abbildung 2: Kalibrationsfeld am Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie

Die Daten der inneren Orientierung für die gewählte Konfiguration (Nikon D70 mit 35mm-Objektiv und späteren Aufnahmeeinstellungen) wurden anhand von Aufnahmen eines Kalibrationsfeldes (Abbildung 2). In diesem Kalibrationsfeld der TU Graz befanden sich gleichmäßig verteilt Punkte, deren Raumkoordinaten sehr genau bestimmt waren. Aus den zugehörigen Bildpunkten kann die Transformationsmatrix $T_{3 \times 4}$ mit Hilfe des DLT-Algorithmus (*direct linear transformation*) berechnet werden (Kraus et al. 1997):

$$T = \begin{pmatrix} f_u r_{11} + u_0 r_{31} & f_u r_{12} + u_0 r_{32} & f_u r_{13} + u_0 r_{33} & f_u X + u_0 Z \\ f_v r_{21} + v_0 r_{31} & f_v r_{22} + v_0 r_{32} & f_v r_{23} + v_0 r_{33} & f_v Y + v_0 Z \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Der DLT-Algorithmus minimiert die verbleibenden Fehler aus der projektiven Transformation, ohne jedoch systematischen Abbildungsfehler des Objektivs zu berücksichtigen. Diese als Verzeichnung bezeichneten Fehler ändern sich mit der Position am Bild. Um den Einfluss der Verzeichnung bei der Bildauswertung zu berücksichtigen, wurde die innere Orientierung mit dem am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien entwickelten Programm ORIENT weiter verbessert.

2.3 Äußere Orientierung

Für die Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen muss die Lage der Kamera im Raum, die äußere Orientierung, bekannt sein. Sie wird durch die drei Raumkoordinaten des Projektionszentrums und durch drei Winkel, die die Lage der Aufnahmerichtung und der Bildebene in Bezug auf das Raumkoordinatensystem festlegen, bestimmt. Die äußere Orientierung wird für jedes Bild anhand von

Passpunkten, d.h. Punkten, deren Raumkoordinaten bereits bekannt und die im Bild einwandfrei erkennbar sind, abgeleitet. Dazu wird das am Institut für Digitale Bildverarbeitung entwickelte Programm CALWIN verwendet. CALWIN ermittelt die Transformationsmatrix $T_{3 \times 4}$ für jede Kameraposition oberhalb des Flussbettes mit dem DLT-Algorithmus. Der verbleibende Fehler entspricht der Differenz aus gemessenen und berechneten 2D-Bildkoordinaten und darf maximal 0,6 Bildpixel betragen.

Die Passpunkte zur äußeren Orientierung der Aufnahmen bestehen aus weiß lackierten Metallkugeln ($D = 15 \text{ mm}$), die auf beiden Seiten der Flussachse oberhalb des Wasserspiegels angebracht sind. Die Metallkugeln wurden so montiert, dass sie von zwei Theodoliten aus erkennbar waren. Die Kugelform erleichtert das genaue Einmessen und zugleich die halbautomatische Identifikation der Kugelmittelpunkte in CALWIN. Die Vermessung der Kugelmittelpunkte, deren Koordinaten zur äußeren Orientierung herangezogen wurden, durch Mitarbeiter des Instituts für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme konnte in einem Arbeitstag abgeschlossen werden. Die Auswertung der Messungen von den beiden Standpunkten ergab Standardabweichungen in der horizontalen Lage von maximal 0,1 mm. Die Differenzen in der Bestimmung der Höhenwerte betragen maximal 0,28 mm (Lienhart 2004). Die Passpunkte blieben auch über längere Zeit ausreichend stabil, wie eine Wiederholungsmessung nach acht Monaten gezeigt hat.

3 MESSVORGANG

3.1 Aufnahmetechnik

Das Verfahren wird derzeit an einem Modell eines österreichischen Flusskraftwerkes im Maßstab 1:40 eingesetzt. Bei dem Kraftwerk kommt es zu unerwünschten Geschiebeanlandungen im Unterwasserbereich, die im Modellversuch mit Hilfe der photogrammetrischen Flussbettvermessung dokumentiert werden. Bei den Aufnahmen wurde ein möglichst einfaches Vorgehen angestrebt, um die Methode für den täglichen Einsatz tauglich zu machen. Auf den Aufbau einer eigenen Messbrücke sowie auf spezielle Ausleuchtung wurde daher verzichtet. Als Standort für die Kamera Nikon D70 dient der Längsträger des Hallenkranes. Aus dem Abstand der Kamera über dem Flussbett (4,5 m) und der Modellbreite (3 m) ergibt sich der notwendige Bildwinkel (62°) bzw. die Brennweite des zu verwendenden Objektivs (35 mm).

Pro Bild müssen zumindest acht Passpunkte sichtbar sein, um die äußere Orientierung durchführen zu können. Der Abstand der Passpunkte wurde sicherheitshalber ein wenig kleiner gewählt, sodass auf jeder Seite der Flussachse meist sechs (insgesamt zwölf) Passpunkte erkennbar sind. Fotografiert wird mit dem eingebauten Blitz der Nikon D70, um die Passpunkte gleichmäßig von oben auszuleuchten. Die Entfernungseinstellung wird durch Abschalten des Autofokus konstant gehalten, um die Kamera mit exakt denselben Aufnahmeeinstellungen wie bei der Kalibrierung der Kamera zu betreiben. Nach jeder Aufnahme wird der Kran um zwei Passpunkte (etwa 80 cm) längs der Flussachse verfahren, wodurch sich eine Überlappung von ungefähr 60 % ergibt. Für den gesamten, leicht gekrümmten Unterwasserbereich ($L = 12 \text{ m}$) sind 16 Aufnahmen notwendig. Die im JPG-Format gespeicherten Bilder werden auf einen Laptop übertragen und ausgewertet.

3.2 Bildauswertung

Nach der Korrektur der Objektivverzeichnung erfolgt die äußere Orientierung der Bilder in CALWIN. Den einzelnen Passpunkten werden Punktnummern aus einer Liste zugewiesen. Aus dem Kontrast zwischen den weißen Passpunkten und dem schwarzem Untergrund errechnen sich die Kugelmittelpunkte, deren Koordinaten für die äußere Orientierung verwendet werden. Anschließend werden die Raumkoordinaten der Kamerastandorte und die Aufnahmerichtungen gespeichert.

Die restliche Bildauswertung erfolgt mit einer adaptierten Version des Tunnelvermessungssystems DIBIT, das vom Institut für Digitale Bildverarbeitung in enger Zusammenarbeit mit DIBIT Messtechnik GmbH entwickelt wurde. DIBIT wird zur Aufnahme, Überwachung, Steuerung, Dokumentation und Qualitätssicherung von Vortrieben und Untertagebauwerken eingesetzt. Teile der Software können jedoch auch für andere Anwendungen verwendet werden.

Die digitale Bildauswertung setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- Lokalisierung homologer Punkte auf den Aufnahmen (*matching*) zur Bestimmung der Disparitäten eines Bildpaares; diese werden als S/W-Bild (*disparity map*) gespeichert, wobei der Grauwert jedes Pixels die Größe der zugehörigen Parallaxe angibt; eine Kombination aus Kreuzkorrelation und HFVM (*hierarchical features vector matching*) steigert die Genauigkeit (Caballo-Perucha 2003);
- Berechnung der Raumkoordinaten der aufgenommenen Objekte aus der inneren und äußeren Orientierung, den zugehörigen Disparitäten und den jeweiligen Bildkoordinaten; die dabei verwendete Methode (Bauer 1999) ist besonders geeignet, Unsicherheiten aus der Kamerakalibrierung und dem Bildmatching auszugleichen;

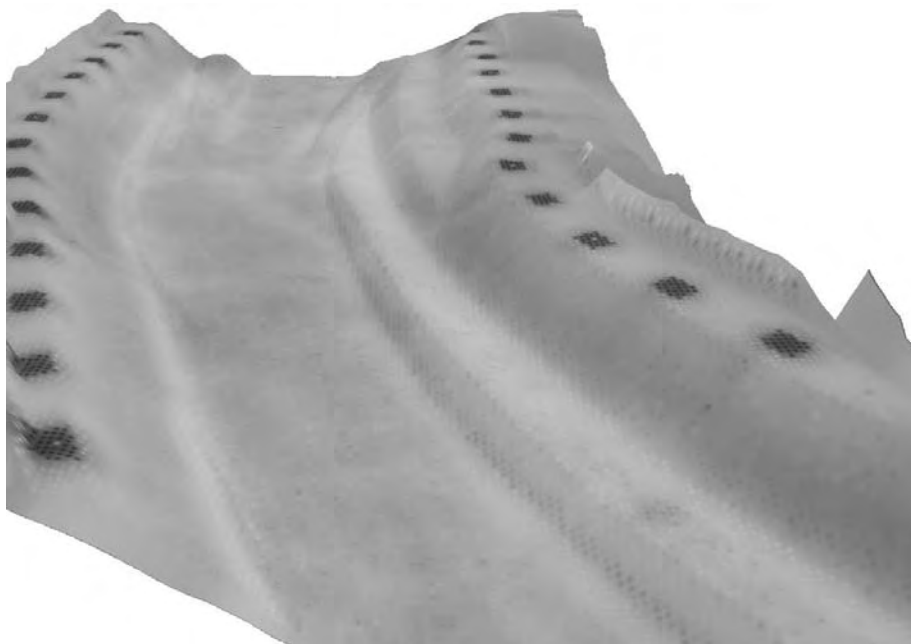


Abbildung 3: Dreidimensionale Rekonstruktion des Flussbetts

- Erstellung eines digitalen Höhenmodells (DHM) durch Zusammenfügen und Einpassen der Raumkoordinaten in ein dreidimensionales Gitter (5 x 5 mm Raster); beim abschließenden Export in eine Textdatei kann die Textur der Flusssohle ausgegeben werden, um ein Orthofoto des Aufnahmegebietes zu erstellen.

Die gesamte Bildauswertung läuft auf einem herkömmlichen Laptop (Pentium 4 mit 2,80 GHz und 512 MB RAM). Der Zeitaufwand für die Vermessung der erwähnten Unterwasserstrecke mit 16 Aufnahmen beträgt minimal etwa 2 Stunden und setzt sich wie folgt zusammen: Überspielen der Bilder, Anlegen eines neuen Projektes und Durchführen der Verzeichniskorrektur (30 min); Identifikation der Passpunkte in CALWIN zur Bestimmung der äußeren Orientierung (etwa 2 min pro Bild = 30 min); Bildauswertung in DIBIT und Ausgabe des digitalen Höhenmodells (60 min).

4 DIGITALES HÖHENMODELL

4.1 Darstellung und Analyse

Die Analyse und Darstellung der über 1,4 Mio. Einzelpunkte des Aufnahmegebietes erfolgt mit dem Programm SURFER. Zahlreiche Visualisierungsmöglichkeiten lassen (fast) keine Wünsche offen. Für eine naturgetreue Darstellung kann das Höhenmodell beispielsweise mit dem Orthofoto überlagert werden (Abbildung 3). Werden die Aufnahmen der Sandablagerungen mit dem Höhenmodell des leeren Flussbetts verglichen, lässt sich das Volumen der Ablagerungen ermitteln. Dadurch ist eine einfache Quantifizierung der Ablagerungen möglich. SURFER bietet darüber hinaus die Möglichkeit, sämtliche Vorgänge zu automatisieren, woraus sich eine erhebliche Zeitersparnis bei der abschließenden Darstellung und Analyse ergibt.

4.2 Genauigkeit

Um die Qualität der Messergebnisse zu überprüfen, wurden diese mit Daten eines Laserdistanzensors vom Typ WELOTEC OWLF 4060 verglichen. Der Sensor arbeitet nach dem Prinzip der optischen Triangulation und weist einen Linearitätsfehler von ± 2 mm und eine Auflösung von 0,03 bis 0,6 mm auf. Als Testfläche diente ein 2 x 2 großer Flussabschnitt, der vom Laserdistanzsensor mit dem in Graz entwickelten Positioniersystem in einem 10 x 10 mm Raster abgetastet wurde. Vergleichende Profilschnitte (Abbildung 4) zeigen eine gute Übereinstimmung der beiden Verfahren, wobei die Höhenabweichungen im Bereich der Flusssohle überwiegend kleiner als 2 mm sind.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Unter Berücksichtigung der Vielzahl an nicht exakt bestimmbar Parametern, die dem wasserbaulichen Versuchswesen zugrunde liegen (Wasserführung, Vermessung der Flusstopografie, Rauheit, Geschiebezusammensetzung, etc.), kann die erzielbare Genauigkeit der photogrammetrischen Flussbettvermessung als ausreichend angesehen werden. Zusammenfassend bietet das Verfahren gegenüber herkömmlichen Methoden folgende Vorteile:

- Ausreichende Genauigkeit bei hoher Punktdichte; andere Verfahren können den Abstand zum Flussbett zwar mit höherer Genauigkeit bestimmen, der notwendige Positioniermechanismus muss jedoch mit großer Aufwand aufgebaut und betrieben werden.
- Ausgabe der Textur; das Orthofoto als unmittelbares Ergebnis der Bildauswertung ermöglicht eine realistische Darstellung der Flusslaufes; ein händisches Aneinanderfügen von Bildern für die Versuchsdokumentation entfällt.

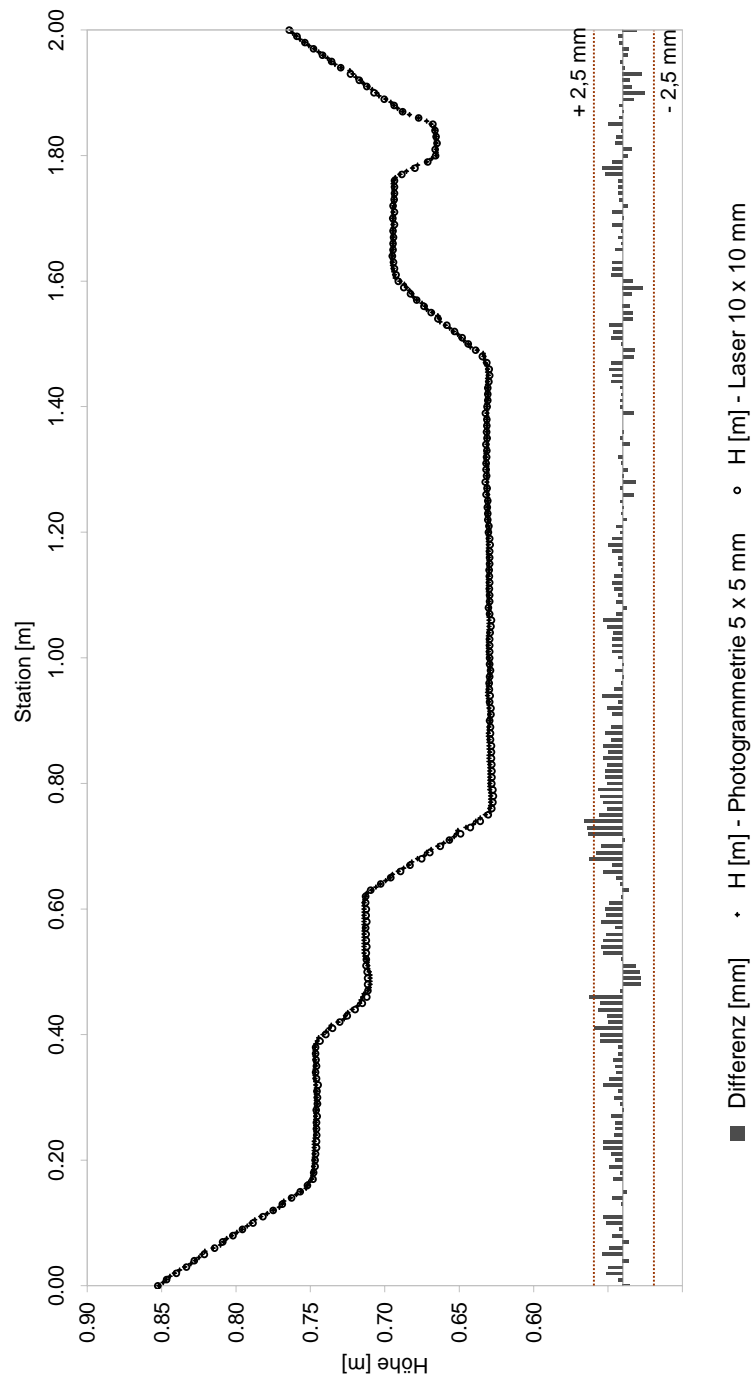


Abbildung 4: Exemplarischer Vergleich zwischen photogrammetrischer Flussbettvermessung und den Daten der Laserdistanzmessung.

- Rasche Ergebnisse; für die Vergleichsmessung (40.401 Punkte) benötigte das in Graz entwickelte Laserabtastsystem mehr als 48 Stunden; mit Hilfe der photogrammetrischen Flussbettvermessung kann dieselbe Fläche in weniger als zwei Stunden rekonstruiert werden (einschließlich der Bildaufnahmen im Labor).
- Hohe Flexibilität; durch geringfügige Adaptierungen können andere Objektive oder neue Passpunkte verwendet werden; das System kann auf diese Weise kostengünstig bei mehreren Flussmodellen gleichzeitig eingesetzt werden; zudem können auch gekrümmte Flussläufe vermessen werden, indem die der Auswertung zugrunde liegende Flussachse entsprechend verändert wird.
- Geringer Aufwand; für den Einsatz ist neben einem herkömmlichen PC und einer digitalen Spiegelreflexkamera einzig ein Hallenkran oder eine ähnliche Plattform notwendig, von der aus die Aufnahmen getätigt werden können; die Bestimmung der inneren Orientierung und die Vermessung der Passpunkte ist einmal durchzuführen und kann an externe Fachleute vergeben werden;
- Günstige Anschaffung; der relativ geringe Aufwand macht das System auch finanziell attraktiv; eine Spiegelreflexkamera ist in vielen Wasserbaulaboratorien meist schon vorhanden; die Bildauswertesoftware kostet mit Sicherheit weniger als der Aufbau eines Positioniersystems oder der Kauf eines Laserscanners.

Aus den genannten Gründen wird die photogrammetrische Flussbettvermessung am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Kürze bei einem weiteren Modellversuch eingesetzt werden.

LITERATUR

Bauer, A. (1999): Locus Reconstruction. User Manual. Institut für Digitale Bildverarbeitung, Joanneum Research Graz, Version 2.05 (unveröffentlicht).

Caballo-Perucha, M. P. (2003): Development and analysis of algorithms for the optimisation of automatic image correlation. Master Thesis, Postgradualer Universitätslehrgang Weltraumtechnik, Graz.

Geisler, T., Breitenstein, S., Hammer, A., Mayr, D., Klasinc, R. (2003): Hydraulic modeling - Mapping of river bed. - in: Hydroinformatics and Advanced Data Technology in Engineering Practice, XXX. IAHR Congress, Thessaloniki, pp. 449-456.

Lehmann, G. (1969): Photogrammetrie. Sammlung Göschen, Band 1188/1188a, Verlag Walter de Gruyter & Co., Berlin, p. 43.

Lienhart, W. (2003): Einmessung von Referenzzielen für photogrammetrische Vermessungen. Technischer Bericht WB002-1, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz (unveröffentlicht).

Kraus K., Jansa J., Kager H. (1997): Photogrammetry. Advanced Methods and Applications. Vierte Auflage, Band 2, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, pp. 99-101.