
Automatisierte Oberflächendokumentation von Talsperren mittels bildunterstützter Totalstationen

Slaven KALENJUK¹, Werner LIENHART¹, Harald WACKENREUTHER²

¹ Technische Universität Graz { slaven.kalenjuk, werner.lienhart }@tugraz.at

² Verbund Hydro Power GmbH harald.wackenreuther@verbund.com

Zusammenfassung

Das Verhalten von großen Talsperren wird mit einer Vielzahl von verschiedenen messtechnischen Sensoren überwacht. Visuelle Inspektionen sind ebenso ein wesentlicher Bestandteil der Überwachungsmaßnahmen wie die regelmäßige Dokumentation des Zustands der Betonoberflächen. In diesem Beitrag wird eine neue Methode zur Oberflächendokumentation von Talsperren mit Scan- und Bilddaten moderner Totalstationen vorgestellt. Geometrie und Bildinformation werden zu einem texturierten Oberflächenmodell kombiniert, woraus entzerrte Fotos zur indirekten Messung auf der Maueroberfläche abgeleitet werden. Außerdem wird ein neues Systemkonzept präsentiert, in dem Betonschäden vor Ort automatisiert erkannt und hochauflösend zur detaillierten Dokumentation erfasst werden. Es wird gezeigt, dass Veränderungen auf der Maueroberfläche mithilfe multitemporaler, entzerrter Bildsequenzen der Schadstellen, basierend auf Bildverarbeitungsalgorithmen, detektiert und vermessen werden können. Die mit dem vorgeschlagenen Ansatz erzielten Ergebnisse bieten eine neue Datengrundlage zur objektiven Beurteilung des Zustandes von Talsperren.

1 Visuelle Inspektion und Dokumentation von Talsperrenoberflächen

1.1 Bedeutung der Oberflächendokumentation

Betonschäden, wie z.B. Risse, Ausblühungen, Abplatzungen, Bewehrungskorrosion, etc., sind oft Anzeichen für Veränderungen im Gefüge des Betons. Es ist anzustreben, solche Veränderungen möglichst früh und objektiv zu erkennen. Auf diese Weise können rechtzeitig Gegenmaßnahmen getroffen bzw. Sanierungen eingeleitet werden. Langzeit-Alterungsprozesse der Maueroberflächen müssen dokumentiert werden, damit sie nachvollziehbar verfolgbar sind.

1.2 Stand der Technik

Bei vielen Betonsperren, wie z.B. bei jenen die von Verbund Hydro Power GmbH betrieben werden, erfolgt die Erfassung des Betonzustandes und etwaiger Schadstellen mit handelsüblichen Digitalkameras. Fotos werden vor Ort aufgenommen und in einer CAD Zeichnung referenziert. Dabei wird die Position, Größe sowie der Typ der Schadstelle dokumentiert (siehe Abb. 1 rechts).

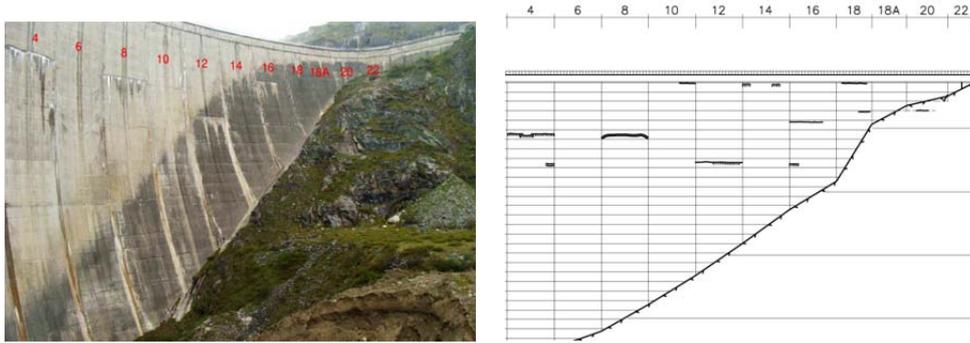


Abb. 1: Foto der luftseitigen Maueroberfläche der Drossensperre von Block 4 bis 22 (links, VERBUND (2011, S. 11)), CAD Zeichnung desselben Mauerausschnitts mit Darstellung der vorhandenen Schadstellen (rechts, VERBUND (2011, S. 13))

Das beschriebene Verfahren funktioniert einfach und zuverlässig, birgt aber folgende Schwächen:

- Die Zugänglichkeit für Nahaufnahmen ist oft schwierig (abseilen ist notwendig).
- Die metrische Dimensionierung von Schadstellen oder die Quantifizierung derer Veränderungen ist nur bedingt möglich.
- Kleine Schadstellen können unentdeckt bleiben, wenn sie vor Ort nicht als solche erkannt werden. Die Auflösung von Übersichtsfotos ist zu gering, um kleinere Schadstellen nachträglich im Büro zu erkennen.

Die genannten Defizite führten dazu, dass verschiedene neue Ansätze zur Objekterfassung mithilfe von Drohnen (SENSEFLY, 2016) oder Laserscannern und Telekameras (CAMP ET AL., 2013) getestet und eingesetzt wurden. Im Folgenden wird ein neuer Ansatz zur Dokumentation der Maueroberfläche mit modernen Totalstationen vorgestellt.

2 Oberflächendokumentation mit modernen Totalstationen

Mit der ständigen Entwicklung und Erweiterung des Funktionsumfangs moderner Totalstationen entstehen zunehmend neue Anwendungsfelder. Zum Zwecke der Dokumentation der Maueroberfläche von Talsperren werden eine rasche automatisierte reflektorlose Distanzmessung (Terrestrial Laser Scanning, TLS) und die Möglichkeit zur Aufnahme von Fotos (Imaging) vorausgesetzt. Beispiele für solche am Markt erhältliche Produkte sind: Leica MS50/60, Topcon IS-3 und Trimble S7/S9/SX10. Obwohl die Abtastrate mit jener eines 3D Laserscanners und die Bildqualität mit Fotos einer Telekamera nicht vergleichbar sind, bietet die Integration von Scanfunktionalität und Bilderfassung in einer Totalstation aber entscheidende Vorteile:

- Scan- und Bilddaten werden über die Stationierung im Koordinatensystem der Totalstation referenziert. Die Verknüpfung von Punktwolken erfolgt direkt bei der Aufnahme und bedarf daher keiner weiteren Prozessierung.

- Durch die Kalibrierung der Kamera sind der Abstand von Projektionszentrum zum Teleskopzentrum und die Verschwenkung der Kamera gegenüber dem Teleskop bekannt. Für jedes aufgenommene Foto ist somit die äußere Orientierung direkt bestimmt.

2.1 Arbeitsfluss

Das Ziel der Untersuchungen war es, ein digitales dreidimensionales Oberflächenmodell von Talsperren durch die Kombination von Scan- und Bilddaten einer Totalstation zu berechnen. Erste Ansätze mit Daten eines Prototyps sind in GONG ET AL. (1999) beschrieben. Im vorgestellten Arbeitsfluss (siehe Abb. 2) werden die Daten zunächst getrennt prozessiert.

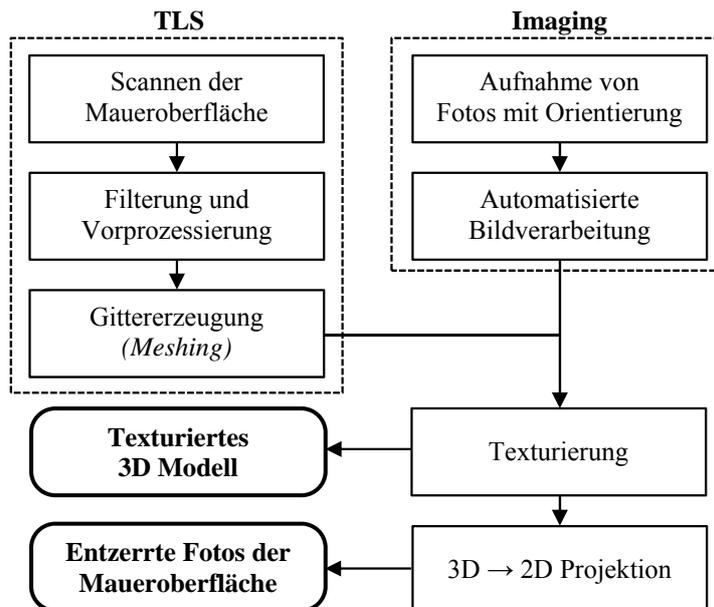


Abb. 2: Arbeitsfluss zur Ableitung texturierter 3D Modelle und entzerrter Bilder aus Scan- und Bilddaten einer modernen Totalstation

Mehrere Punktwolken werden zu einer Gesamtwolke vereint, Ausreißer werden eliminiert und etwaige größere Löcher werden mit „Pseudobeobachtungen“ aufgefüllt. Dies ist notwendig um im nächsten Schritt ein Drahtgittermodell aus der diskreten Punktwolke abzuleiten (Vermaschung o. engl. Meshing). Oftmals werden die Punkte in einem Dreiecksmuster miteinander verknüpft, weshalb in diesem Zusammenhang auch der Begriff der Triangulation verwendet wird.

Von der ganzen Mauer werden überlappende Fotos aufgenommen. Radiometrische Unterschiede (d.h. Kontrast- und Helligkeitsunterschiede) benachbarter Bildtexturen können mit Bildverarbeitungsalgorithmen automatisiert ausgeglichen werden.

Mithilfe der Orientierungsparameter kann die Position der Bildtexturen auf dem Drahtgittermodell korrekt rekonstruiert werden. In der Texturierung werden die Bildinhalte den

Dreiecken des Gittermodells zugewiesen (Bilder werden auf die Dreiecksflächen projiziert). Damit werden Geometrie und Bildinformationen miteinander kombiniert, sodass die Bilder in Folge entzerrt werden können.

2.2 Ergebnisse

Das vorgestellte Verfahren wird am Beispiel der Drossensperre (Kaprun, Salzburg) demonstriert. Aus Gründen der Zeitersparnis wurden Messungen mit den Totalstationen Leica MS50 (siehe Abb. 3 links) und Leica MS60 simultan durchgeführt. Die resultierende Punktwolke umfasst in etwa 10 Mio. Punkte bei einem mittleren Punktabstand von $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ (siehe Abb. 3 rechts).

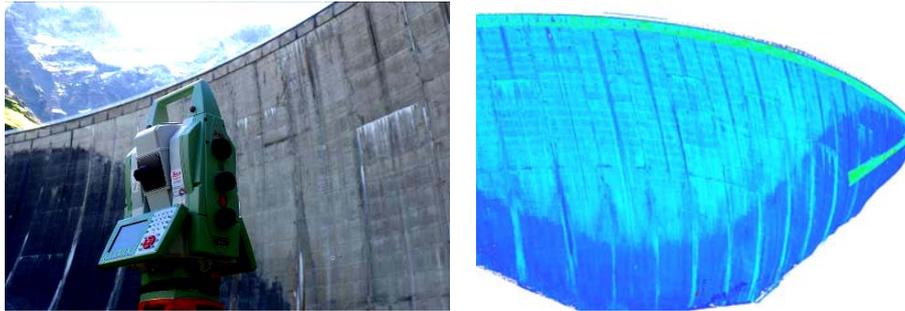


Abb. 3: Leica MS50 bei der Datenaufnahme der Drossensperre (links), Punktwolke mit Intensitätsinformation (rechts)

Um Artefakte aufgrund des Messrauschens zu minimieren, wurde ein gleitender Mittelwert über die Punktwolke gerechnet, sodass eine mittlere Länge für die Dreiecksseiten von 0,3 m resultiert. Mit der Überblickskamera (6,7 mgon/px) wurden zirka 200 Bilder aufgenommen. Zusätzlich wurden von bekannten Schadstellen (siehe Abb. 1 rechts) selektiv hochauflösende Fotos mit der Koaxialkamera (0,6 mgon/px) erfasst und zusammen mit den Überblicksfotos zur Texturierung des Oberflächenmodells verwendet (siehe Abb. 4).



Abb. 4: Texturiertes Oberflächenmodell der Drossensperre von Block 4 bis 20 (selber Ausschnitt wie in Abb. 1)

Mithilfe des Oberflächenmodells wurden anschließend entzerrte Bildsequenzen von den auf der Maueroberfläche befindlichen Schadstellen (siehe Abb. 5) generiert. Sie dienen als detaillierte Dokumentation zur genauen Verfolgung der Entwicklung von Betonschäden. Das Potential von bildgebenden Totalstationen zur Kartierung und Verfolgung von Schadstellen auf Betonbauwerken ist z.B. in WASMEIER (2009) unterstrichen.



Abb. 5: Entzerrte Bildsequenz der Schadstelle im Block 16 auf der Maueroberfläche der Drossensperre (1 px entspricht 5 mm auf der Mauer)

2.3 Anmerkungen zur vorgestellten Methode

Die Qualität des Oberflächenmodells ist von den atmosphärischen Bedingungen bei der Datenaufnahme abhängig. Während sich Regen und Nässe negativ auf die Präzision der Scandaten auswirken, sollten Fotoaufnahmen bei direkter Sonneneinstrahlung oder bei schlechten Lichtverhältnissen vermieden werden. Die limitierten Aufnahmeeinstellungen bei den am Markt verfügbaren bildunterstützten Totalstationen führen entweder zu übersättigten oder zu dunklen, verrauschten Fotos. Aus diesem Grund wird die Durchführung der Messungen an bewölkten, hellen Tagen empfohlen.

Die Qualität des vorgestellten Verfahrens zur Ableitung eines Oberflächenmodells wurde am Beispiel der Sperre Hierzmann (Steiermark) evaluiert (KALENJUK, 2016). Die geometrische Genauigkeit des Modells wurde mittels zweier Punktwolken, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 aufgenommen wurden, bestimmt. Die Normalabstände der Punktwolke von t_2 wurden zum Oberflächenmodell gerechnet, welches selbst aus den Scandaten von t_1 abgeleitet wurde. Es zeigt sich, dass für den Großteil der Maueroberfläche durchschnittliche Abweichungen von ± 5 mm erzielt wurden (siehe Abb. 6). Diese Abweichungen resultieren aus der Scanpräzision unter den gegebenen Bedingungen: schnellster Messmodus und Aufnahmeentfernungen von bis zu 150 m (MAAR. & ZOGG, 2014). Systematiken sind bei dunklen, feuchten und teilweise moosbedeckten Flächen (± 10 mm) sowie bei Kanten (z.B. beim Überlauf) zu erkennen (± 20 mm).

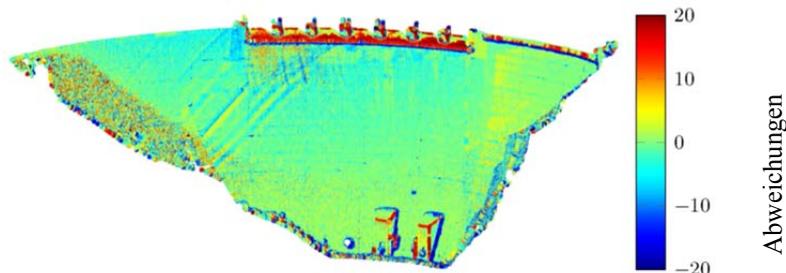


Abb. 6: Evaluierung der geometrischen Übereinstimmung zweier Punktwolken der Sperre Hierzmann, dargestellt sind Normalabstände der Punktwolke von Epoche t_2 zum Oberflächenmodell von Epoche t_1

Aufgrund des geringen Gesichtsfelds der Koaxialkamera wäre eine sehr große Anzahl an Fotos zur Abdeckung der gesamten Maueroberfläche notwendig. Aus diesem Grund werden Fotos mit der Überblickskamera bevorzugt aufgenommen und nur ausgewählte Bereiche mit der 30-fachen Vergrößerung des Teleskops fotografiert. Im nachfolgenden Kapitel wird gezeigt, wie diese besonderen Bereiche auf der Oberfläche automatisiert erkannt und erfasst werden können.

3 Bildbasierte Detektion von Betonschäden

Die Idee besteht darin, die menschliche Wahrnehmung von Betonschäden so gut wie möglich in einem Computeralgorithmus nachzuvollziehen. Da sich die genannten Schadstellen (siehe Kapitel 1.1) vor allem als visuelle Unregelmäßigkeiten auf der Maueroberfläche erkennen lassen, werden Fotos mit der Überblickskamera von der gesamten Mauer aufgenommen (siehe z.B. Abb. 7 links), auf einen Laptop geladen und vor Ort mithilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen analysiert.

Die Untersuchung auf derartige Unregelmäßigkeiten erfolgt mit Bildgradienten, welche die erste Ableitung der Grauwertintensitäten benachbarter Pixel darstellen. Mit einem adaptiven Schwellwert werden Pixel mit besonders großen Gradienten zu den Nachbarpixeln segmentiert. Die räumliche Verteilung der selektierten Pixel dient als Kriterium zur Identifizierung zusammenhängender Schadstellenregionen, welche mithilfe eines minimal umgebenden Rechtecks (MUR) vereinfacht repräsentiert werden (siehe Abb. 7 rechts).



Abb. 7: Originalfoto aufgenommen mit der Überblickskamera von der Sperre Hierzmann (links), dasselbe Foto überlagert mit den Ergebnissen der Schadstellendetektion und der definierten Mauerumrisslinie (rechts)

Mit dem Raumbezug der Fotos ist eine Unterscheidung zwischen Maueroberfläche und sonstigem Bildinhalt im Algorithmus möglich. Somit kann beispielsweise Vegetation vor oder hinter der Maueroberfläche in der Schadstellendetektion ausgeschlossen werden (z.B. Bäume im Hintergrund von Abb. 7). Hierfür ist eine einmalige Messung diskreter Punkte notwendig um die Umrisslinie der zu analysierenden Maueroberfläche dreidimensional zu erfassen. Nach jeder Stationierung werden die Absteckelemente zu diesen Punkten mit bekannten Koordinaten gerechnet. Mithilfe des bekannten Kameramodells (innere und äußere Orientierung) können die Umrisspunkte in den Bildraum transformiert und somit die Umrisslinie im Bild rekonstruiert werden (siehe Abb. 7 rechts). Diese Polylinie wird schließlich zur Filterung aller Ergebnisse innerhalb der rekonstruierten Maueroberfläche verwendet.

Umgekehrt ist es mithilfe der Orientierungsparameter gleichermaßen möglich, Bildpunkte in Horizontal- und Vertikalwinkel umzurechnen. So wird das MUR der detektierten Schadstellen im Bild dazu verwendet, die Koordinaten auf der Maueroberfläche durch reflektorlose Distanzmessung zu ermitteln. Diese dienen zur Aufnahme hochauflösender Scan- und Bilddaten der identen Ausschnitte auf der Maueroberfläche bei der nächsten Messung (z.B. erst wieder in 3 Jahren). Dies ermöglicht somit einen zuverlässigen Vergleich entzerrter Bilddaten von Betonschäden zur Erfassung derer Veränderungen.

4 Automatisierte Erfassung von Veränderungen auf der Maueroberfläche

Die Veränderungsdetektion (engl. „Change Detection“) aus digitalen Bildern bildet einen wichtigen Forschungsschwerpunkt in der Fernerkundung. Heute existieren unzählige Algorithmen zur automatisierten Erfassung von Veränderungen auf Basis multitemporaler Bilddaten. Wie sich zeigt, können einige dieser Algorithmen genauso gut bei entzerrten Bildsequenzen von Schadstellen auf einer Talsperre wie bei Luftbild- oder Satellitenbilddaufnahmen großer Landschaften eingesetzt werden.

4.1 Pixelbasierte Veränderungsdetektion

In der pixelbasierten Veränderungsdetektion wird davon ausgegangen, dass die Grauwertintensitäten aller Pixel bei gleichen Bildausschnitten ident sind. Prinzipiell sollte das Differenzbild also nur an jenen Pixeln ungleich null sein, wo tatsächlich Veränderungen aufgetreten sind. In der Praxis können sich die Bildmatrizen erheblich voneinander unterscheiden, weshalb in der Regel eine Vorprozessierung notwendig ist (siehe Abb. 8).

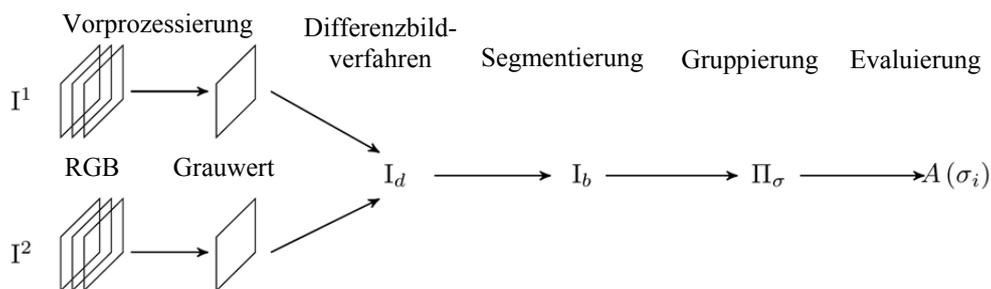


Abb. 8: Arbeitsfluss zur Detektion von Veränderungen in entzerrten Bildsequenzen, in Anlehnung an NIEMEYER ET AL. (2007)

Nachfolgend ist das vorgeschlagene Prozedere für die Erfassung von Veränderungen auf der Maueroberfläche von Talsperren beschrieben:

1. **Vorprozessierung:** Die Information aus den RGB-Kanälen wird zu einem Grauwertkanal zusammengefasst. Radiometrische Unterschiede (Kontrast, Helligkeit) werden durch die Anpassung der statistischen Momente (Mittelwert, Standardabweichung) der Bildmatrizen aneinander angeglichen. Um die richtigen Pixel der Bilder I^1 und I^2 miteinander zu vergleichen, wird eine Bildregistrierung über eine affine Bildtransformation realisiert.

Die Parameter werden entweder über merkmalsbasierte Detektion von homologen Punkten (z.B. Scale-invariant feature transform, kurz SIFT) oder über die Bildkorrelation (z.B. Enhanced Correlation Coefficient Maximization, kurz ECC) bestimmt.

2. **Differenzbildverfahren:** Die angepassten Bildmatrizen werden voneinander subtrahiert (ergibt Matrix I_d). Vorausgesetzt wird, dass dieselben Dimensionen vorliegen (selbe Breite und Höhe in Pixeln). Mit einem Gauß-Filter wird das Differenzbild zusätzlich geglättet, womit das Bildrauschen reduziert bzw. die geringen Unsicherheiten in der Texturierung eliminiert werden.
3. **Segmentierung:** Mit einem adaptiven Schwellwertverfahren können die tatsächlich veränderten Pixelregionen von den durch lokale Helligkeitsunterschiede bedingten Grauwertdifferenzen unterschieden werden (Binärbild I_b).
4. **Gruppierung:** Die einzelnen segmentierten Pixel werden durch Gruppierung zu zusammenhängenden Clustern gruppiert, d.h. zu Regionen auf der Maueroberfläche, die visuelle Veränderungen aufweisen (es resultiert eine „Karte der Veränderungen“ Π_σ). Mit diesem Schritt werden zusätzlich vereinzelt Ausreißer eliminiert, wodurch die restlichen Grauwertunterschiede in den Bildmatrizen herausgefiltert werden.
5. **Evaluierung:** Mit der metrischen Information der entzerrten Bilder kann das Ausmaß der Veränderung quantifiziert werden. Mit der Gaußschen Trapezformel wird die Flächenänderung für die individuellen Cluster berechnet ($A(\sigma_i)$).

4.2 Evaluierung

An einer zugänglichen Schadstelle an der Sperre Hierzmann wurde die vorgeschlagene Methode zur Veränderungsdetektion evaluiert. Dazu wurde ein Bereich der Schadstelle mit Rasierschaum besprüht, um eine Zunahme der bereits vorhandenen Ausblühung zu simulieren (siehe Abb. 9 links). Dieser Bereich kann mit dem vorgeschlagenen Ansatz eindeutig erkannt (siehe Abb. 9 rechts) und quantifiziert werden (38650 mm²).



Abb. 9: Entzerrte Bildsequenz (2 mm/px) von Fotos der Koaxialkamera einer Schadstelle (links), Binärbild I_b mit segmentierten Pixeln aufgrund distinktiver Grauwertdifferenzen (rechts)

Die Genauigkeit der Quantifizierung von Veränderungen wurde in Versuchen mit Referenzobjekten mit bekannter Fläche untersucht. Von unterschiedlichen Standpunkten mit verschiedenen Distanzen und Aufnahmewinkeln wurden Scan- und Bildaufnahmen der Maueroberfläche durchgeführt, bevor und nachdem ein A4 Blatt angebracht wurde. Der Ist-Soll Vergleich zeigt, dass Flächenänderungen mit einer Genauigkeit von unter 1% der Gesamtfläche bestimmt werden können (KALENJUK, 2016).

5 Resümee

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur Oberflächendokumentation von Talsperren mit Scan- und Bilddaten einer modernen Totalstation gezeigt. Die vorgeschlagene Methode ist für Vermesser leicht durchführbar und erfordert, verglichen mit anderen neu aufgekommenen Verfahren (z.B. Drohnenvermessung), einen geringeren Arbeitsaufwand. Die Qualität der Dokumentation ist allerdings sehr stark von den gegebenen Lichtverhältnissen abhängig.

Im Gegensatz zu reinen Fotoaufnahmen werden Geometrie und Bildtexturen im Oberflächenmodell miteinander kombiniert. Durch die Georeferenzierung der Bildinhalte wird zusätzlich Kenntnis über Position und Größe erlangt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit Messungen auf der Maueroberfläche durchzuführen, ohne direkten Zugang zur Maueroberfläche selbst zu benötigen. Die dabei erzielbare räumliche Auflösung der Bildtexturen ist dank der Koaxialkamera (1 px entspricht in etwa 1 mm bei 100 m Entfernung) vergleichbar mit den Ergebnissen anderer Verfahren.

Ebenso wichtig wie das Erfassen von Schadstellen ist die Erfassung von deren Veränderungen. Für beide Szenarien wurden daher auf Bildverarbeitungsalgorithmen basierende Lösungsansätze entwickelt. Die vorgeschlagene Methode zur Oberflächendokumentation und -überwachung kann den beurteilenden Bauingenieur jedoch nicht ersetzen. Sie stellt ihm aber ein Werkzeug zur Verfügung, das ihn bei der Detektion von Schadstellen unterstützt und die Dokumentation objektiviert.

Literatur

- CAMP, G., CARREAUD, P., LANÇON H. (2013): Large Structures: Which Solutions for Health Monitoring? In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-5(W2). S. 137-141.
- GONG, D., HUANG Y. D., BALL S. L. (1999): A laser scanning videotheodolite for 3d visualisation and metrology. In: ISPRS Archives XXXII-5/W13. Onuma, Japan.
- KALENJUK, S. (2016): Surface evaluation of large concrete dams with state-of-the-art total stations, Masterarbeit, TU Graz, 90 S.
- MAAR, H. & ZOGG, H.-M. (2014): WFD – Wave Form Digitizer Technology. White Paper, Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Schweiz. 16 S.
- NIEMEYER, I., MARPU, P.R., NUSSBAUM, S. (2007): Change detection using object features. In: 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. S. 2374–2377.
- SENSEFLY (2016): Documenting a large dam with senseFly's albris inspection drone. – Fallstudie. https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/user-cases/2016/senseFly-Case-Study-Tseuzier-Dam.pdf.
- VERBUND (2011): Rissaufnahme der luftseitigen Maueroberfläche. Kraftwerk Kaprun – Oberstufe, interner Bericht. 16 S.
- WASMEIER, P. (2009): Grundlagen der Deformationsbestimmung mit Messdaten bildgebender Tachymeter, Dissertation, Technische Universität München. 169 S.