

Verteilte faseroptische Dehnungsmessungen in der RCC Talsperre Fundão / Brasilien

von Roland Hoepffner, Markus Aufleger und Douglas E. Moser

Vorspann

Im folgenden Beitrag wird von der Installation von Glasfaserkabeln zur verteilten faseroptischen Dehnungsmessung in einer 43 m hohe RCC Staumauer in Brasilien berichtet. Messungen wurden während der drei Tage des ersten Einstaus durchgeführt. Die Ortszuordnung der vorgespannten Kabel im Beton war problemlos möglich und es konnten keine signifikanten Dehnungsänderungen oder Risse gemessen werden. In einem 20 m langen RCC-Probekörper konnten Risse von deutlich unter einem Millimeter Breite festgestellt und lokalisiert werden.

Distributed fiber optic strain measurements in the RCC dam Fundão / Brazil

by Roland Hoepffner, Markus Aufleger and Douglas E. Moser

Abstract

This paper reports on the installation of fiber optic strain sensing cables into a 43 m high RCC dam in Brazil. The distributed fiber optic strain measurements were carried out during the three days of the first impoundment. The location of the pre-stained cables in the concrete could be related to the measurements without difficulties. No significant changes in strain or even cracks could be observed. In a 20 m long RCC specimen, cracks of considerably less than 1 mm width could be determined and located.

1 Einleitung

Nach einem knappen Jahr Bauzeit wurde die Walzbetonstaumauer (Roller Compacted Concrete) der Wasserkraftanlage Fundão im Süden Brasiliens im Mai 2006 erstmals eingestaut. Während der Bauphase wurden neben konventionellen Messeinrichtungen wie Temperaturfühlern auch Glasfaserkabel in drei Bauwerksblöcken installiert. Zum Einen waren dies konventionelle Telekommunikationskabel zur verteilten Temperaturmessung und zum Anderen spezielle Kabel zur verteilten faseroptischen Dehnungsmessung, die nach aktuellem Kenntnisstand der Autoren erstmals in einer RCC Staumauer installiert wurden.

Verteilte faseroptische Temperaturmessungen wurden bereits mehrfach in Betonstaumauern angewandt [1]. Sie ermöglichen die umfassende Beobachtung der Hydratationswärmeentwicklung, der anschließenden Abkühlung und des langfristigen Temperaturverhaltens im Inneren des Bauwerks [2]. Aufgrund der Dehnungsbehinderung im Massivbeton kann es nach dem Abbinden und dem drauffolgenden Abkühlen, was mit einer Volumenreduzierung einhergeht, zur Ausbildung von Rissen im und an der Oberfläche des Bauwerks kommen. An der Oberfläche sind diese thermischen Risse durch visuelle Kontrolle relativ leicht auszumachen. Anders verhält es sich mit Transversalrissen im Inneren des Bauwerks und Längsrissen parallel zur Mauerachse. Diese bleiben im Inneren verborgen und können auch durch konventionelle, punktuelle Messungen nicht geortet werden [3].

Ziel der aktuellen Untersuchungen war die Erkennung und Ortung von Regionen mit großen Dehnungsspitzen sowie Rissen im Beton. In einer engen Kooperation der Technischen Universität München mit dem Forschungsinstitut LACTEC (Curitiba / Brasilien) und dem Hersteller eines verteilten faseroptischen Dehnungssensors (SENSORNET, Großbritannien) konnte neben der Erstanwendung an der Staumauer Fundão ein umfassendes Forschungsprogramm zum Einsatz dieser Technologie im Massenbeton realisiert werden.

2 Messeinrichtung zur verteilten Dehnungsmessung

Das Prinzip der verteilten faseroptischen Dehnungsmessung ähnelt dem der verteilten Temperaturmessung. Ein kohärenter Lichtimpuls (Laser) wird in eine Singlemode-Glasfaser eingekoppelt. An jeder Stelle der Faser wird das Licht zurückgestreut. Teile des rückgestreuten Lichts erfahren Frequenzverschiebungen, welche die Informationen über Temperatur und Dehnung in der Glasfaser enthalten. Die sogenannte Brillouin-Streuung ist sowohl abhängig von der Temperatur als auch von der Dehnung in der Glasfaser. Der Ort der entsprechenden Frequenzverschiebung des rückgestreuten Lichts wird über die Laufzeit zwischen ausgesandtem und reflektiertem Licht bestimmt. Dieses Verfahren ist im allgemeinen bekannt als B Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR [4]). Aufgrund physikalischer Beschränkungen kann die Ortsauflösung bei diesem Verfahren nicht genauer als etwa 1 m sein. Das Dehnungskabel muss im Gegensatz zum Kabel für Temperaturmessungen besondere Anforderungen erfüllen. Während das Kabel für Temperaturmessungen ausschließlich die Schutzfunktion für die Fasern zu erfüllen hat, muss beim Dehnungskabel ein guter Kraftschluss zwischen Glasfaser, Mantel und Beton gegeben sein. Die vom Beton auf die Glasfaser übertragene Dehnung hängt vom konstruktiven Aufbau des Kabels ab. Die Längskraftübertragung zwischen Faser und Kabelmantel muss groß genug sein, um die Verformungen des umgebenden Betons nach innen zu übertragen. Andererseits ist zur Vermeidung von Kabelbrüchen ein ausreichender

Schlupf notwendig. Die Optimierung dieses kritischen Zusammenhangs ist eine der wesentlichen Aufgabenstellungen für weitere Untersuchungen.

Für die verteilten Dehnungsmessungen in der Staumauer Fundão und an dem RCC-Versuchskörper wurde ein Dehnungsmesslaser der Firma Sensor-net aus Großbritannien zur Verfügung gestellt. Deren DTSS (für Distributed Temperature and Strain Sensor) ermöglicht eine integrierte Analyse der Frequenzverschiebung und deren Intensität [5]. Hierdurch soll grundsätzlich eine Temperaturkompensation ohne Vergleichsmessungen an einer parallel verlaufenden verteilten faseroptischen Temperaturmessung an einer mechanisch unbelasteten Faser möglich sein.

3 Verteilte Dehnungsmessungen in einer RCC Staumauer in Brasilien

3.1 Projektübersicht

Die 43 m hohe Talsperre Fundão befindet sich im Süden Brasiliens im Staat Paraná, etwa 300 km westlich von Curitiba. Sie staut das Wasser des Rio Jordão, welches zur Energieerzeugung abgearbeitet wird. Die RCC Mischung enthält einen sehr geringen Zementanteil von etwa 50-55 kg/m³ und etwa 20-25 kg/m³ Flugasche. Neben konventionellen Messeinrichtungen wie Temperaturfühler wurden zusätzlich Fiber Bragg Grating (FBG) Sensoren eingebaut. Einige davon waren für die Messung lokaler Temperaturen, andere zur Messung lokaler Dehnungen konfiguriert. Zusätzlich wurden 1,2 km Telekommunikationskabel mit schützender Stahlummantelung installiert. Die synchrone Messung von Temperaturen mit zwei verschiedenen DTS Lasersystemen (Distributed Temperature Sensing), verteilten Dehnungen mittels einer DTSS und zweierlei FBGs ist bisher einmalig im Bereich der Überwachung von Betonstaumauern mittels faseroptischer Methoden.

3.2 Einbau der Glasfaserkabel zur verteilten Dehnungsmessung

Der Einbau der Dehnungsmesskabel erfolgte durch geschulte und erfahrene Techniker von LACTEC während der gesamten Bauphase. Das Kabel ist eine Spezialanfertigung der Firma Sensor-net. Vier Glasfasern, zwei Singlemode und zwei Multimode, sind eingebettet in Kevlarfasern und umhüllt von einer flexiblen Plastikummantelung, die unter Vakuumbedingungen aufgebracht wurde und somit einen guten Kraftschluss gewährleistet.

Insgesamt wurden etwa 830 m des Dehnungskabels in drei Blöcken im mittleren Bereich der Talsperre verbaut. In **Bild 1** sind die entsprechenden Blöcke 9, 11 und 15 mit den eingebauten Kabeln dargestellt. Der Einbau der Kabel setzte ein hohes Maß an Sorgfalt

voraus. Bei einem Durchmesser von etwa 6 mm, geschützt lediglich von der Plastikummantelung und den Kevlarfasern, mussten Überfahrten durch schwere Baugeräte dringend vermieden bzw. die Kabel temporär entsprechend geschützt werden.

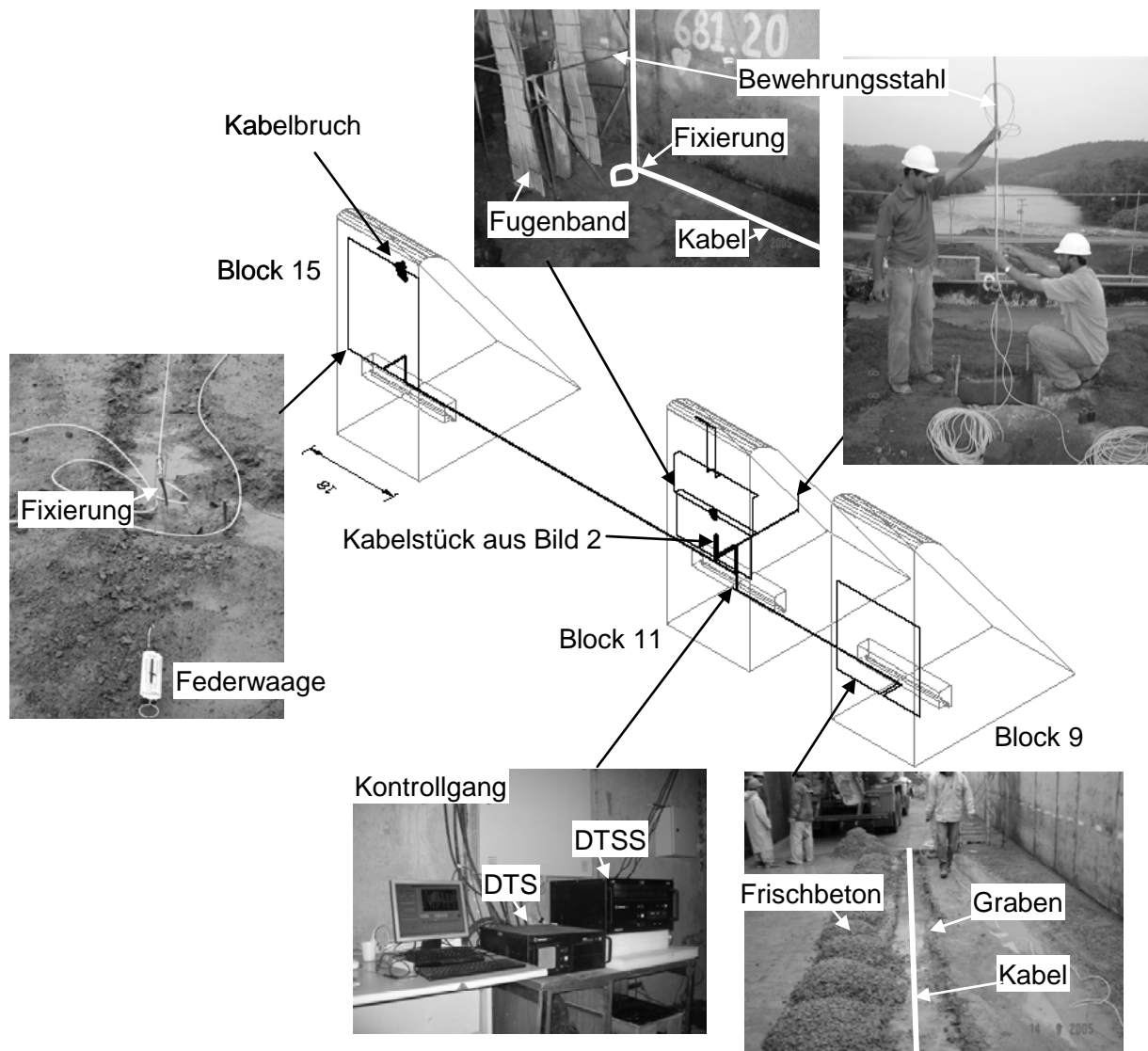


Bild 1: Lage und Einbau der Dehnungsmesskabel in der RCC Staumauer Fundão

Zum horizontalen Verlegen der Kabel wurden kleine Rinnen in die aktuelle RCC Lage geschlagen und nach dem Einbau der Kabel händisch mit Beton verfüllt. Vertikal geführte Kabel wurden am Bewehrungsstahl entlang der Fugenbänder befestigt. Die Kabel wurden mit einer Kraft zwischen 20 und 60 N vorgespannt und mit Draht, Nägeln und Gewebeklebeband befestigt, ohne das Kabel übermäßig zu quetschen oder in kleinem Radius zu biegen. Um im Fall einer Beschädigung trotz allem messen zu können wurden die Kabel jeweils in Schleifen eingebaut, welche im Kontrollgang zu einem durchgehenden Messstrang verbunden wurden. Die Messungen wurden zentral aus dem Kontrollgang in Block 11 durchgeführt.

Beim Einbau der Kabel wurde das Kabel an zwei Stellen durchtrennt, wobei eine Stelle sofort erkannt wurde und eine Reparatur ohne Verluste möglich war. An einer anderen Stelle in Block 11 wurden hohe Lichtverluste festgestellt, welche aber kaum Einfluss auf die Messungen hatten.

3.3 Ergebnisse der Dehnungsmessungen während des Einstaus

Die ersten Dehnungsmessungen wurden während des dreitägigen Einstaus im Mai 2006 durchgeführt. Exemplarisch sind in **Bild 2** die Dehnungen dargestellt, welche an dem in Bild 1 fett gekennzeichneten Kabelstück auftraten. Dieses Kabel wurde vom Kontrollgang durch einen Instrumentenschacht auf die entsprechende Höhe geleitet und von dort im Beton horizontal Richtung Wasserseite geführt. Dort wurde es vertikal 4 m an einem Bewehrungsstahl befestigt und entlang derselben Strecke wieder zurückgeführt.

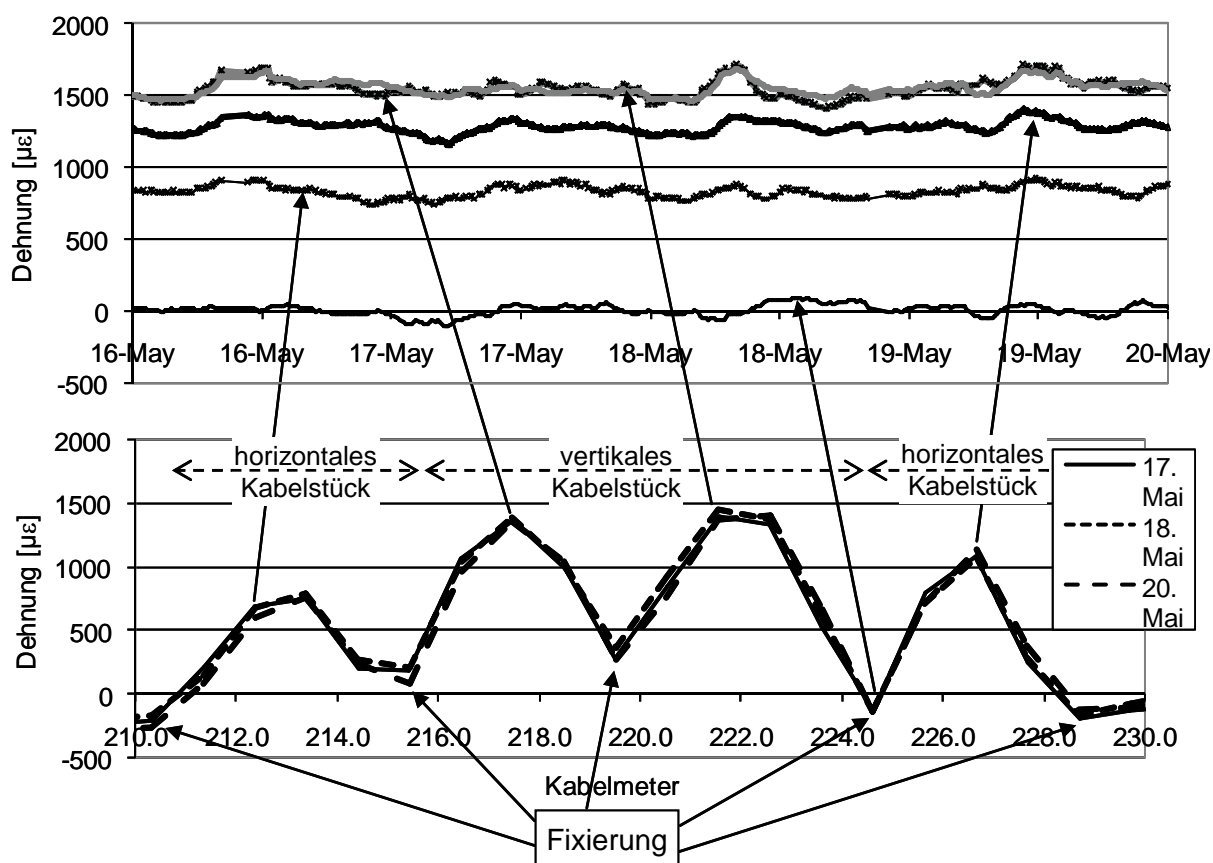


Bild 2: Verteilte Dehnungsmessungen in Block 11 während des Einstaus

Im unteren Bereich von **Bild 2** sind die Dehnungen im Kabel zwischen Kabelmeter 210 und 230 mit den entsprechenden zeitlichen Verläufen der markierten Punkte im oberen Diagramm in **Bild 2**, dargestellt. Die unterschiedlichen Beträge der Dehnung sind auf die unterschiedliche Vorspannung, die über den gesamten Verlauf der eingebauten Kabel zwischen 1.000 und 7.000 $\mu\epsilon$ beträgt (1 $\mu\epsilon$ entspricht 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ Dehnung), zurückzuführen.

In dem kurzen Zeitraum der Messungen sind keine signifikanten Dehnungsänderungen zu erkennen, die außerhalb der Messgenauigkeit liegen. Die Ortsauflösung von 1 m war prinzipiell ausreichend, nur im Bereich abrupter Dehnungsänderungen ist ein Einfluss zu erkennen (z. B. bei Kabelmeter 219,5 wo die Dehnung an der Verankerung eigentlich 0 sein müsste). Zudem wäre rechnerisch eine konstante Anfangsdehnung zwischen zwei Fixpunkten zu erwarten, welche durch die Ortsauflösung so nicht dargestellt werden konnte. Die Vorspannung ermöglichte eine sehr gute Ortszuordnung der Kabel im Beton, sollte allerdings etwa 20 N nicht überschreiten, da sonst das Rauschen im Messsignal zunimmt.

4 Verteilte Dehnungsmessungen zur Risserkennung in einem RCC Probekörper

Zusätzlich zu den Untersuchungen an der Talsperre in Brasilien fanden an der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München Versuche zur Risserkennung in Beton an einem RCC-Körper statt. Dieser hatte eine Länge von 20 m, eine Breite von 1 m und eine Höhe von 1,2 m. Eine detaillierte Beschreibung des Körpers und einige Ergebnisse zu diesen Versuchen wurden bereits von Moser et al in 2007 veröffentlicht [6]. Der Horizontalschnitt durch den RCC Balken in **Bild 3** zeigt die unterste der drei Ebenen, in welche Dehnungskabel eingebaut wurden. Die Umlenkrollen wurden beim Einbau zur Gewährleistung einer konstanten Vorspannung sowie einer möglichst verlustfreien Richtungsänderung im Kabel verwendet. Da der Verbund zwischen Kabel und Beton sehr gut ist, kommt den Umlenkrollen nach dem Aushärten des Betons keine weitere Bedeutung mehr zu.

In Ebene 1 quert das Kabel den Rissbereich drei Mal. Die Messungen zeigen keine Dehnungen vor der Entstehung des Risses und bereits deutliche Dehnungsspitzen zu einem Zeitpunkt, an dem der Riss im RCC Block von außen noch kaum sichtbar, also deutlich kleiner als 1 mm, war. Nach einer weiteren Vergrößerung des Risses einen Tag darauf, sind nicht nur deutliche Dehnungen im Bereich des Risses, sondern auch an den Umlenkrollen zu erkennen.

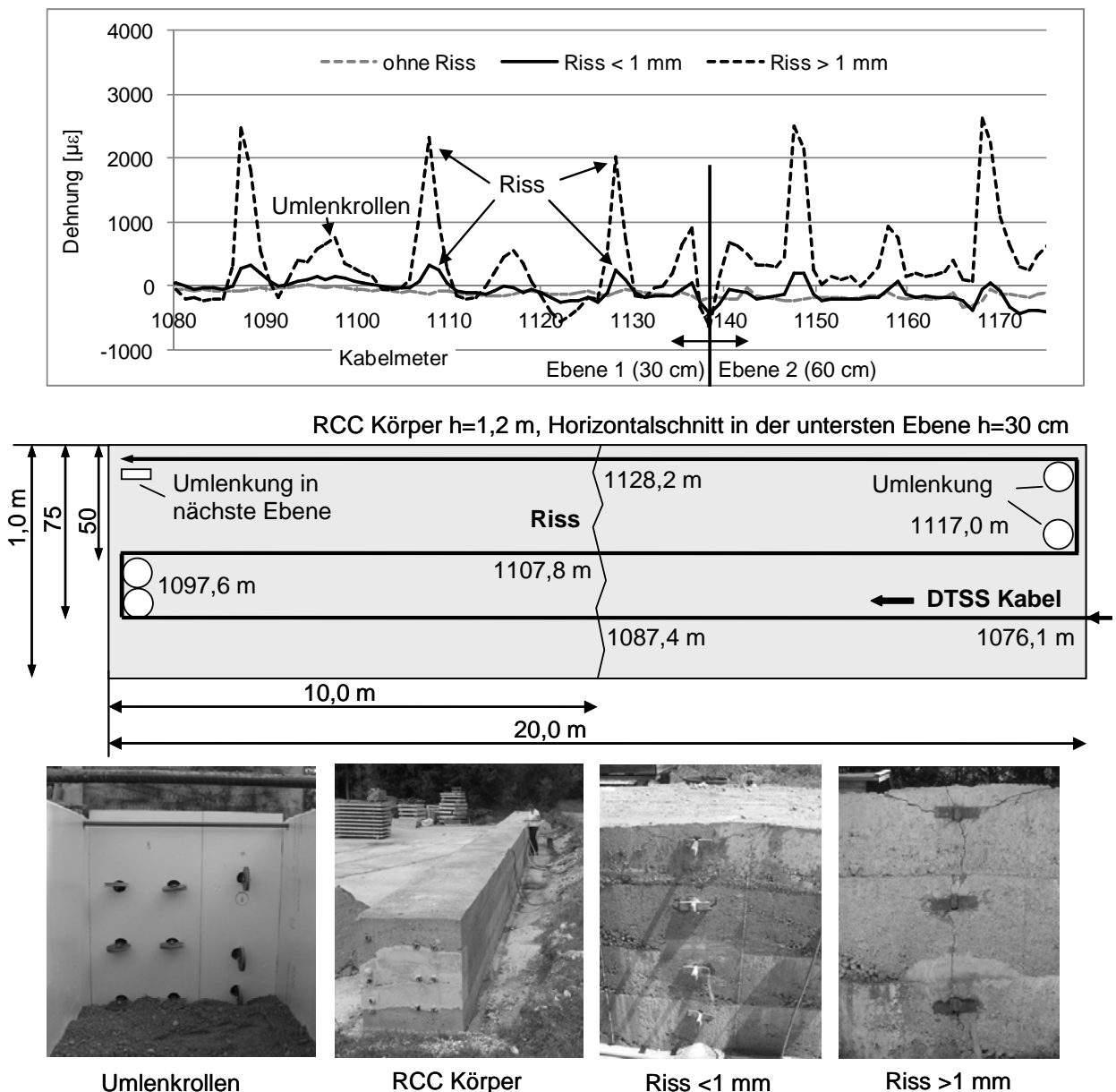


Bild 3: Dehnungsmessungen zur Risserkennung in einem RCC Körper

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messungen nach dem Einbau der Dehnungsmesskabel in der RCC Staumauer Fundão in Brasilien zeigen die grundsätzliche Möglichkeit der Installation und anschließender Messungen von faseroptischen Dehnungskabeln in Massenbeton. Die Ortszuordnung der vorgespannten Kabelstrecken war problemlos möglich. Die Dehnungsmessungen während des Einstaus zeigten wie erwartet noch keine Bereiche erhöhter Dehnung oder Risse im Beton. Die ergänzend durchgeführten Versuche an einem 20 m langen RCC-Probekörper zeigen deutlich, dass sich verteilte faseroptische Dehnungsmessungen in RCC trotz der Ortsauflösung von nur 1 m grundsätzlich gut zur Erkennung und Ortung von Rissen eignen. Da die Beträge der Dehnungen im Bereich des Risses in allen Kabeldurchgängen ähnlich

sind, könnte es möglich sein, von Dehnungsdifferenzen auf Rissbreiten zu schließen. Hierzu sind weitere Versuche in den Laboratorien der Universität Innsbruck geplant. Im Verlauf der Messungen konnte festgestellt werden, dass der verbleibende Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse der Dehnung noch deutlich zu stark ist um vernachlässigt zu werden. Die derzeit laufende Weiterentwicklung des Verfahrens zur Temperaturkompensation soll die Zuverlässigkeit der Messungen in Zukunft verbessern.

Literatur

- [1] Aufleger, M. (2000). Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. Habilitation. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München. Heft Nr. 89
- [2] Conrad, M. (2006). A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams. Dissertation. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Technische Universität München. Heft Nr. 105
- [3] Conrad, M., Hoepffner, R., Aufleger, M. (2007). "Innovative monitoring devices for an integral observation of thermal stress behaviour in large RCC dams." 5th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) dams. Guiyang, China. 2.-4. November 2007:
- [4] Horiguchi, T., Kurashima, T., Tateda, M. (1989). "Tensile Strain Dependence of Brillouin Frequency Shift in Silica Optical Fibers." IEEE Photonics Technology letters Vol. 1 (Nr. 5).
- [5] Parker, T. R., Farhadiroushan, M., Handerek, V. A., Rogers, A. J. (1997). "A fully distributed simultaneous strain and temperature Sensor using Spontaneous Brillouin Backscatter." IEEE Photonics Technology letters Vol. 9 (Nr. 7).
- [6] Moser, D., Aufleger, M., Hoepffner, R., Neisch, V., Soares, M., Filho, J. (2007). "Temperature and strain measurements in RCC dams using fibre optic instrumentation." 5th International Conference on Dam Engineering, LNEC, Lissabon, Portugal. 14.-16. Februar 2007:

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. Roland Hoepffner
Arcisstraße 21
80333 München
r.hoepffner@bv.tum.de

Prof. Dr. habil. Markus Aufleger
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
markus.aufleger@uibk.ac.at

M.Sc. Douglas Emerson Moser
Rua Grã Nicco, 113 – Bl. 3 – Cj. 601
CEP: 81.200-200 – Mossunguê
Curitiba / PR, Brasil
douglas@techdam.com.br

Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften

- Bild 1: Lage und Einbau der Dehnungsmesskabel in der RCC Staumauer Fundão
- Bild 2: Verteilte Dehnungsmessungen in Block 11 während des Einstaus
- Bild 3: Dehnungsmessungen zur Risserkennung in einem RCC Körper