

# 10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau

Von Markus Aufleger,  
Jürgen Dornstädter,  
Theodor Strobl,  
Marco Conrad,  
Sebastian Perzlmaier  
und Matthias Goltz

Temperaturmessungen werden seit vielen Jahren in Geotechnik und Wasserbau mit unterschiedlicher Zielsetzung ausgeführt. In Zusammenarbeit zwischen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München und der GTC Kappelmeyer GmbH wurden 1996 erstmals verteilte faseroptische Temperaturmessungen (VFTM) im Wasserbau durchgeführt und in der Folge ein leistungsstarkes Messsystem zur Überwachung von Stauanlagen entwickelt. Seitdem wird die VFTM zur Leckageortung und Bestimmung der Temperaturverteilung weltweit in zahlreichen Projekten erfolgreich eingesetzt.

## 1 Einleitung

Temperaturmessungen wurden an Bauwerken des konstruktiven Wasserbaus anfangs ausschließlich an großen Bauteilen aus Beton durchgeführt. Sie dienen und dienen immer noch zur Überwachung der Hydratationswärmeentwicklung und zur Beurteilung temperaturbedingter Bauwerksbewegungen. Bodentemperaturmessungen zur Eingrenzung von Leckagen wurden erstmals Mitte der 1950er Jahre an Dämmen des Dortmund-Ems-Kanals erprobt [1]. Ende der 1970er Jahre wurde nach Dambrüchen das Temperatursondierungsverfahren entwickelt [2]. Die Temperatur dient dabei als sensitiver Indikator für anomale Durchsickerung und wird vergleichbar den aus der Hydrologie bekannten Tracerverfahren eingesetzt. So lassen sich aus der Kenntnis der Temperaturverteilung in Staudämmen und deren Untergrund bevorzugte Sickerwege erkennen.

Seit etwa 1985 besteht die Möglichkeit zur messtechnischen Bestimmung der Temperaturverteilung entlang von Glasfaserleitungen mit Hilfe von verteilten faseroptischen Temperaturmessungen (VFTM). Diese Technologie wurde stetig weiterentwickelt und bietet sowohl hinsichtlich der Temperatur- als auch der Positionsgenauigkeit einen hoch entwickelten Leistungsstandard. An der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München in Oberrach (VAO) werden seit 1996 in Zusammenarbeit mit der GTC Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe, umfang-

reiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Eignung dieses Messsystems sowohl zur Leckageortung an Staudämmen als auch zur Bestimmung der Temperaturverteilung in Staumauern durchgeführt [3].

## 2 Forschung und Weiterentwicklung

### Temperaturüberwachung von Staumauern

Im Rahmen verschiedener von der Industrie (STRABAG, Hochtief) und der DFG geförderter Forschungsprojekte konnten die Eignung der VFTM zur Ermittlung der Temperaturverteilung in Staumauern er-

folgreich nachgewiesen und neue Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Ergebnisse der Messungen an der Birecik-Talsperre bestätigten die Eignung des Messsystems auch unter extremen äußeren Bedingungen. Zudem konnte eine im Vergleich zu konventioneller Messtechnik erheblich höhere Informationsdichte erreicht werden. Die damit verbundene genauere Abbildung der Temperaturverteilung und Gradienten ermöglichte eine wesentlich bessere Beurteilung der Gefahr der thermischen Rissbildung. Beim Einbau der zur VFTM notwendigen Glasfaserkabel in Walzbetonmauern in Jordanien und China zeichnete sich das Messsystem durch hohe Robustheit im Vergleich zu

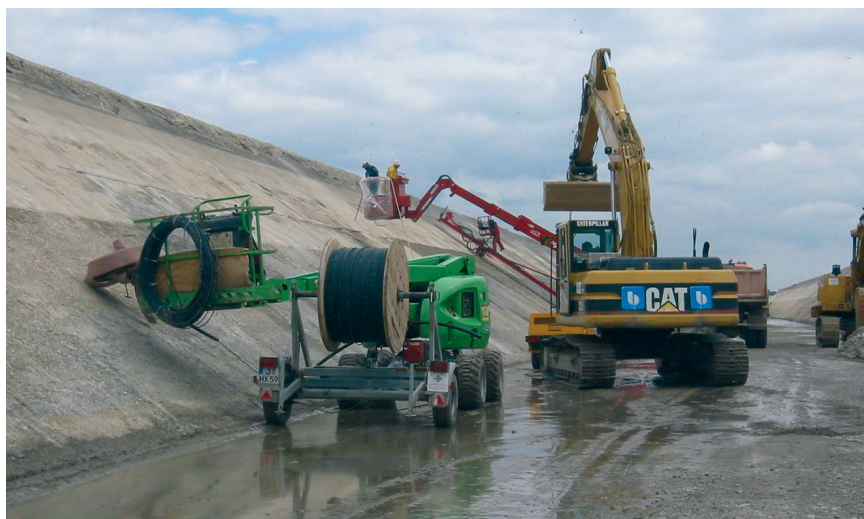


Bild 1: Isarkanal Haltung „Speicherseen“: Nuterstellung und Kabelverlegung

herkömmlichen Temperaturgebern aus. Die VFTM ermöglichte die messtechnische Aufzeichnung lokaler Nullspannungstemperaturen in einer Walzbetonmauer und die Aufzeichnung des Einflusses der klimatischen und baubetrieblichen Randbedingungen auf die Temperaturverteilung [4].

### Leckageortung mittels VFTM

Die Durchströmung eines Dammes hat Einfluss auf die Wärmetransportvorgänge im Schüttmaterial. Dies wird bei der Anwendung der VFTM im Wasserbau ausgenutzt. Die sowohl durch die Industrie (E.ON Wasserkraft, Leoni Fibre Optics GmbH) als auch durch die DFG und Bayerische Forschungsstiftung geförderten Forschungsprojekte zur verteilten thermischen Leckageortung konzentrieren sich auf zwei Methoden [3]:

- Bei der Gradientenmethode werden durch Sickerwasser bedingte Temperaturanomalien detektiert. Dies erlaubt Rückschlüsse auf den Ort und mit Einschränkung auch auf die Intensität von Leckagen. Um diese Methode anwenden zu können, bedarf es ausreichender Temperaturgradienten zwischen dem gestauten Wasser und der Kabelumgebung.
- Bei der Aufheizmethode werden die Glasfaserkabel durch Anlegen einer elektrischen Spannung an die in das Kabel integrierten elektrischen Leiter (i.a. Kupferlitzten) aufgeheizt. Der Temperaturanstieg im Kabel wird durch die Wärmetransportmechanismen um das Kabel bestimmt. Ohne Umströmung des Kabels dominiert die Wärmeleitung, was bedingt durch die wassergehaltsabhängige Wärmeleitfähigkeit des Bodens Rückschlüsse auf den Sättigungsgrad erlaubt. Bei Umströmung des Kabels wirkt der ef-

fektivere konvektive Wärmeübergang, der von der Filtergeschwindigkeit abhängt. Darauf basierend wurde die Aufheizmethode an der VAO zur verteilten Filtergeschwindigkeitsmessung weiterentwickelt [5].

## 3 Anwendungsbeispiele

### Asphaltoberflächendichtungen

Bei der Sanierung der Haltung 1 des Mittleren Isarkanals in München wurden 1996 faseroptische Temperaturmesskabel erstmals zum Zwecke der Leckortung unter einer neuen Asphaltbeton-Oberflächendichtung installiert. Hierbei kommt die Gradientenmethode zum Einsatz. Der erste Einsatz in Kombination mit dem Aufheizverfahren erfolgte bei der Erneuerung der kontrollierten Asphaltoberflächendichtung an der Ohra-Talsperre in Thüringen. Inzwischen werden Asphaltbetonoberflächendichtungen in Deutschland (Talsperre Bautzen in Sachsen) und dem Ausland (z.B. Al-Khadra-Reservoir in Libyen) durch diese Technik überwacht.

### Betonoberflächendichtungen

Die erste Anwendung bei Betonoberflächendichtungen erfolgte zeitgleich mit den Asphaltbetonoberflächendichtungen, da eine Teilstrecke der Haltung 1 des Mittleren Isarkanals 1996 mit einer Betondichtung ausgestattet wurde. Als weitere Anwendungen im Bereich dieser Dichtungsvariante sind die Haltung „Speicherseen“ und der Mühlkanal, beides Kraftwerkskanäle an der Isar, zu nennen. Abweichend zur Haltung 1, bei welcher die Gradientenmethode zum Einsatz kommt, kam bei den letztgenannten Anwendungen eine Weiterentwicklung der Aufheizmethode zum Einsatz (**Bild 1**) [5].

Hierbei wird das Messkabel mit einem Vliesgewebe umgeben, um eine quantitative Bestimmung der Sickerwassermengen zu ermöglichen.

### Geo-Membrane und geotextile Tondichtungsbahnen

Die erste Anwendung zur Überwachung von Geo-Membranen erfolgte am Strogenbauwerk der Isarhaltung 4b. Es folgten Installationen am Alzkanal bei Trostberg, beim Wincar Dam in England, an der Brändbach-Talsperre im Schwarzwald und an der Kadamparai-Talsperre in Südindien. Eine Besonderheit in diesem Anwendungssegment stellt die Bevertalsperre des Wuppertalverbandes dar. Hier wurde eine innenliegende Stahlplattendichtung mit PE-HD-Dichtungsbahnen nach oben bis zur Dammkrone verlängert. Das Messkabel überwacht die Verbindung zwischen Stahlwand und PE-Dichtung.

Im Verkehrswasserbau findet das Messsystem ebenfalls seit vielen Jahren Anwendung. So werden geotextile Tondichtungsbahnen (GTD) in der Havel-Oder-Wasserstrasse bei Eberswalde und im Dortmund-Ems-Kanal (DEK) nördlich von Münster auf deren Dichtwirkung überprüft. Die Installation der Glasfaserkabel erfolgte sowohl im Trockenem als auch unter Wasser mit Hilfe von Tauchern. Zu Vergleichszwecken werden am DEK auch konventionelle Tondichtungen mit dieser Messtechnik auf ihre Dichtwirkung überprüft.

### Luftseitiger Dammfuß

Die vorgenannten Beispiele zeigen Anwendungen, bei welchen jeweils grundlegende Sanierungen von Dichtungen stattfanden bzw. es sich um Neubauten handelte. Sind keine derartigen Arbeiten vorgesehen, so kann die Messtechnik dennoch zum Einsatz kommen. Durch Anlegen eines Drainagegrabens bzw. eines Auflastfilters am luftseitigen Dammfuß und Integration eines Glasfaserkabels kann das Ansteigen der Sickerlinie messtechnisch erkannt werden. Diese Form kam bei einer Teilstrecke der Haltung 4b des Isarkanals, bei der „Alten Fahrt G“ der Havel-Oder-Wasserstrasse, beim Kraftwerksausleitungskanal Canal d'Oraison im Tal der Durance in Frankreich, am Oberbecken des Pumpspeicherwerkes Hohenwarte II in Thüringen und bei den Seitendämmen der Kraftwerke Gabersdorf und St. Dionysen an der Mur in Österreich zum Einsatz.

## 10 Years of Distributed Fibre Optic Temperature Sensing in Hydraulic Engineering

by Markus Aufleger, Jürgen Dornstädter, Theodor Strobl, Marco Conrad, Sebastian Perzlmaier and Matthias Goltz

Temperature measurements are used for different purposes in geotechnic and hydraulic engineering since more than 50 years. A joint research of the Laboratory of Hydraulic and Water Resources Engineering of TU München and GTC Kappelmeyer led to the first application of distributed fibre optic temperature sensing in the field of hydraulic engineering. Since then distributed fibre optic temperature measurements for leakage detection and observation of concrete temperatures are successfully applied in numerous projects throughout the world.

## Bauwerksfugen

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet stellt die Überwachung von Bauwerksfugen dar. So werden neben den Schleusen-kammerwänden und dem oberen Vorha-fen beispielsweise alle wichtigen Fugen-bänder der Doppelsparschleuse Hohen-warthe beim Wasserstraßenkreuz Magde-burg seit mehreren Jahren auf Leckagen überwacht. Die umlaufende Dichtungsfu-ge bei Dämmen – auch Plinth genannt – ist besonders überwachungsbedürftig, da es bei Setzungen des Schüttkörpers häufig zu Schäden an den Dichtungen zwischen Untergrundabdichtung und Oberflächen-dichtung kommt. Die erste Anwendung der faseroptischen Leckageortung erfolgte hier am Midlands Dam, einem Stein-schüttdamm auf Mauritius. Dabei wird der Dichtungsanschluss zwischen der As-phaltoberflächendichtung und der Schlitzwand überwacht (**Bild 2**). Beton-oberflächendichtungen auf Steinschütt-dämmen (CFRD) finden weltweit immer mehr Verbreitung. Auch hier werden die Fugen überwacht – zum Beispiel der sich im Bau befindliche Merowe Dam am Nil, Sudan (**Bild 3**), und der sich in der Aus-schreibungsphase befindliche Martil-Damm in Marokko. Bei der Talsperre Lei-bis-Lichte können mögliche Leckagen an den Feldfugen ebenfalls mittels Faserop-tik geortet werden.

## Kreuzungsbauwerke

Kreuzungsbauwerke stellen immer eine potenzielle Gefahr für setzungsbedingte Schäden an Dichtungen im Wasserbau dar. Daher werden bereits einige Düker, wie z. B. am Innkanal und an der Havel-oder-Wasserstrasse, mittels faseroptischer Leckortung überwacht.

## Staumauern

Zur Überwachung der Temperatur- und Zwängungsspannungsentwicklung wurden VFTM bei Projekten in der Türkei (Birecik), in Jordanien (Wadi Wala, Wadi Mujib), in China (Shimenzhi) und in Brasilien (Fundao) durchgeführt. Neben den Temperaturmessungen zur Kontrolle der Hydratationswärmeentwicklung im Rahmen der Qualitätssicherung wurden bei der Staumauer Mujib erstmals thermische Kennwerte des Massenbetons (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, thermische Diffusivität) mittels VFTM nach der Aufheizmethode bestimmt. An der Staumauer Fundao kam parallel zur Temperaturmes-sung erstmalig auch die sich noch in der



Bild 2: Midlands Dam, Mauritius:  
Verlauf des faseroptischen Leckortungskabels



Bild 3: Merowe Dam, Sudan:  
Installation des faseroptischen Kabels

Entwicklung befindende verteilte faserop-tische Dehnungsmessung zur Anwendung [6]. Dieses Messsystem soll dazu dienen, die Größe und Position von Rissen im Massenbeton zu bestimmen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Faseroptische Temperaturmessungen ha-ben sich bei der Leckortung im Wasser-bau und bei der Überwachung von Beton-temperaturen bewährt. Durch die konti-nuierliche Weiter- und Neuentwicklung der Messtechniken konnte das Spektrum der wasserbaulichen Anwendungen stetig erweitert werden. Weltweit werden Däm-me mit diesen Techniken zuverlässig seit mehr als 10 Jahren überwacht.

Die Entwicklung geht weiter. Zwischen-zeitlich ist bereits die verteilte Messung von Sickergeschwindigkeiten möglich. Am Einsatz von verteilten Dehnungs- und Ver-formungsmessungen im Wasserbau wird in Forschungsprojekten gearbeitet. Ver-teilte Messungen werden in Zukunft ein fester Bestandteil der Überwachung gro-ßer Wasserbauwerke sein.

## Literatur

- [1] Kappelmayer, O.: Temperaturmessungen in oberflächennahen Bodenschichten zum Nachweis tiefenbedingter Anomalien. Dis-

sertation: 1–87, Ludwig-Maximilian-Uni-versität, München, 1955.

- [2] Dornstädter, J.: Nachweis von Sickerströ-mungen mittels Bodentemperatur-mes-sungen. In: Z. dt. geol. Ges. 143 (1992), S. 421–425.
- [3] Aufleger, M.: Verteilte faseroptische Tem-peraturmessungen im Wasserbau. In: Be-richte des Lehrstuhls und der Versuchs-anstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 89, 2000.
- [4] Conrad, M.: A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams. In: Berichte des Lehrstuhls und der Versuchs-anstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 105, 2006.
- [5] Perzlmaier, S.: Verteilte Filtergeschwindig-keitsmessung in Staudämmen. In: Berichte des Lehrstuhls und der Versuchs-anstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Heft 109, 2007.
- [6] Moser, D.; Aufleger, M.; Hoepfner, R.; Neisch, V.; Soares, M. A.; Filho, J. M.: Tem-perature and Strain Measurements in RCC Dams using Fibre Optic Instrumentation. In: 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Dam Engineering, Lis-sabon, Portugal, 14.–16.02.2007, S. 367–374.

Anschrift der Verfasser:

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Aufleger*  
*Dipl.-Ing. Matthias Goltz*

Arbeitsbereich Wasserbau  
Leopold-Franzens-Universität Innsbruck  
Technikerstraße 13  
A-6020 Innsbruck  
Österreich

markus.aufleger@uibk.ac.at  
matthias.goltz@uibk.ac.at

*Dipl.-Geophys. Jürgen Dornstädter*

GTC Kappelmeyer GmbH  
Heinrich-Wittmann-Str. 7a  
D-76131 Karlsruhe

Dornstaedter@GTC-info.de  
*Prof. Dr.-Ing. Theodor Strobl (Emeritus)*

Lehrstuhl für Wasserbau  
und Wasserwirtschaft  
Technische Universität München  
Arcisstr. 21

80333 München  
t.strobl@bv.tum.de

*Dr.-Ing. Marco Conrad*

Colenco Power Engineering AG  
Täferenstrasse 26  
CH-5405 Baden  
Schweiz

com@colenco.ch

*Dr.-Ing. Sebastian Perzlmaier*  
TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG  
Bereich Engineering Services  
Eduard-Wallnöfer-Platz 2  
A-6020 Innsbruck

Österreich

sebastian.perzlmaier@tiwag.at

