

10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau

10 Years of Distributed Fibre Optic Temperature Sensing in Hydraulic Engineering

M. Aufleger, J. Dornstädter, T. Strobl, M. Conrad, S. Perzmaier, M. Goltz

Abstract

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 have been successfully employed in numerous projects throughout the world.

Zusammenfassung

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 dienten 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 [1] erprobt. Ende der 1970er Jahre wurde nach Damnbrüchen das Temperatursondierungsverfahren [2] entwickelt. 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 weiter entwickelt und bietet sowohl hinsichtlich der Temperatur- als auch der Positionsgenauigkeit einen hoch entwickelten Leis-

tungsstandard. An der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München in Obernach werden seit 1996 in Zusammenarbeit mit der GTC Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe umfangreiche 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 konnte die Eignung der VFTM zur Ermittlung der Temperaturverteilung in Staumauern erfolgreich 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 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 Damms hat Einfluss auf die Wärmetransportvorgänge im Schüttmaterial. Dies wird bei der Anwendung der VFTM im Wasserbau ausgenutzt. Die sowohl durch die Industrie (Eon Wasserkraft, Leoni Fibre Optics GmbH) als auch durch die DFG und Bayrische Forschungstiftung 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 elektrische Leiter (i.a. Kupferlitzen) 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 effektivere konvektive Wärmeübergang, der von der Filtergeschwindigkeit abhängt. Darauf basierend wurde die Aufheizmethode an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München 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.



Bild 1: Isarkanal Haltung ‚Speicherseen‘ – Nuterstellung und Kabelverlegung

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 Winscar 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 Wupperverbandes 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 Trockenen, 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 Canal d’Oraison, einem Kraftwerksausleitungskanal 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.

Bauwerksfugen

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet stellt die Überwachung von Bauwerksfugen dar. So werden neben den Schleusenkamerwänden und dem oberen Vorhafen beispielsweise alle wichtigen Fugenbänder der Doppelsparschleuse Hohenwarthe beim Wasserstraßenkreuz Magdeburg seit mehreren Jahren auf Leckagen überwacht. Die umlaufende Dichtungsfuge bei Dämmen – auch Plinth genannt – ist besonders überwachungsbedürftig, da es bei Setzungen des Schüttkörpers häufig zu Schäden an den Dichtungen zwischen Untergrundabdichtung und Oberflächendichtung kommt. Die erste Anwendung der faseroptischen Leckageortung erfolgte hier am Midlands Dam, einem Steinschüttdamm auf Mauritius. Dabei wird der Dichtungsanschluss zwischen der Asphaltbetonoberflächendichtung und der Schlitzwand überwacht (**Bild 2**). Betonoberflächendichtungen auf Steinschüttdämmen (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 Ausschreibungsphase befindliche Martil Damm in Marokko. Bei der Talsperre Leibis-Lichte können mögliche Leckagen an den Feldfugen ebenfalls mittels Faseroptik geortet werden.



Bild 2: Midlands Dam Mauritius – Verlauf des faseroptischen Leckortungskabels



Bild 3: Merowe Dam Sudan – Installation des faseroptischen Kabels

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 Zwangsspannungsentwicklung 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 Temperaturmessung erstmalig auch die sich noch in der Entwicklung befindende verteilte faseroptische 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 haben sich bei der Leckortung im Wasserbau und bei der Überwachung von Betontemperaturen bewährt. Durch die kontinuierliche Weiter- und Neuentwicklung der Messtechniken konnte das Spektrum der wasserbaulichen Anwendungen stetig erweitert werden. Weltweit werden Dämme mit diesen Techniken zuverlässig seit mehr als 10 Jahren überwacht.

Die Entwicklung geht weiter. Zwischenzeitlich ist bereits die verteilte Messung von Sickergeschwindigkeiten möglich. Am Einsatz von verteilten Dehnungs- und Verformungsmessungen im Wasserbau wird in Forschungsprojekten gearbeitet. Verteilte Messungen werden in Zukunft ein fester Bestandteil der Überwachung großer Wasserbauwerke sein.

Literatur

- [1] Kappelmayer, O. (1955): Temperaturmessungen in oberflächennahen Bodenschichten zum Nachweis tiefenbedingter Anomalien. Dissertation: 1-87, Ludwig-Maximilian-Universität, München.
- [2] Dornstädter, J. (1992): Nachweis von Sickerströmungen mittels Bodentemperaturmessungen. Vol. 143: p 421-425. Z. dt. geol. Ges., Hannover.
- [3] Aufleger, M.: Verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 89, 2000.
- [4] Conrad, M.: A contribution to the thermal stress behaviour of Roller-Compacted-Concrete (RCC) gravity dams. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 105, 2006.

- [5] Perzmaier, S.: Verteilte Filtergeschwindigkeitsmessung in Staudämmen. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Heft 109, 2007.
- [6] Moser, D.; Aufleger, M.; Hoepfner, R.; Neisch, V.; Soares, M.A.; Filho, J.M.: Temperature and Strain Measurements in RCC Dams using Fibre Optic Instrumentation. In 5th Int. Conf. on Dam Engineering, Lissabon, Portugal, 14.-16.02.2007, S. 367-374, Eds.: Pina, C.; Portela, E.; Gomes, J.P., LINEC, 2007.

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
Täferstrasse 26
CH-5405 Baden
Schweiz
com@colenco.ch

Dr.-Ing. Sebastian Perzmaier
TIWAG – Tiroler Wasserkraft AG
Bereich Engineering Services
Eduard-Wallnöfer-Platz 2
A-6020 Innsbruck
Österreich
sebastian.perzmaier@tiwag.at