

Neues faseroptisches Überwachungssystem am Damm Roßhaupten

Im Zuge der Erneuerung der Dammdichtung am Staudamm Roßhaupten wurde ein neues - in Deutschland erstmalig eingesetztes - faseroptisches Temperaturüberwachungssystem implementiert. Der Einbau, der im sogenannten Retrofit-Verfahren durchgeführt wurde, erfolgte schon vor Beginn der Dichtungserneuerung, so dass der Erfolg des Einbaus der Dichtwand bereits überwacht werden konnte. Durch diesen frühen Einsatz des Systems konnten die vermuteten Zonen erhöhter Durchlässigkeit innerhalb der natürlichen Kerndichtung, während der Herstellung des neuen Dichtungselements eindeutig nachgewiesen werden. Nach Abschluss der Sanierungsmaßnahme wurde das faseroptische Leckortungssystem in den Regelbetrieb übergeführt. Um eine optimale Dammüberwachung zu gewährleisten, werden permanent Messungen in Echtzeit durchgeführt und diese automatisch evaluiert, so dass mögliche Durchsickerungsbereiche frühzeitig erkannt und entsprechend Alarme ausgelöst werden können. Die aktuellen Messwerte und allfällige Alarme können in einem Onlineportal visualisiert werden.

Axel Fabritius, Constantin Rupp, Andreas Bauer und Bernd Kottke-Wenzel

1 Einleitung

Am Staudamm Roßhaupten wurde in den Jahren 2018 und 2019 das Dichtungssystem umfangreich erneuert [1]. Da im Zuge dieser Sanierungsmaßnahmen das vorhandene Überwachungssystem im Dammkern weitgehend zerstört wurde, war die Implementierung eines neuen Systems erforderlich. Das gewählte Sanierungsverfahren sah den Einbau einer 1 m breiten Schlitzdichtwand bis in 70 m Tiefe vor, weshalb ein System erforderlich wurde, mit dem der Einbau und der damit verbundene massive Eingriff in den Dammkern kontinuierlich überwacht werden konnte. Zudem sollte ein zukunftsfähiges Messinstrument gefunden werden, das auch für die spätere Regelüberwachung eine qualitativ hohe Überwachungsgüte sicherstellen kann, das zugleich die in Roßhaupten fehlende Sickerwassermessung adäquat ersetzen kann. Alle diese Anforderungen konnten durch den Einbau des neuen faseroptischen Überwachungssystems erfüllt werden.

Kompakt

- Das Dichtungssystem am Damm Roßhaupten wurde umfangreich durch Erstellen einer bis zu 70 m tiefen Schlitzwand erneuert.
- Zur Überwachung der erneuerten Dichtung wurde ein auf thermischer Leckortung basierendes System implementiert.
- Das automatische faseroptische Leckortungssystem wurde im innovativen Retrofit-Verfahren durchgeführt.

2 Verfahrensbeschreibung

2.1 Hintergrund

Die Grundlagen der thermischen Leckortung sind bereits seit den fünfziger Jahren bekannt [7]. Systematische Temperaturmessungen im Inneren von Dämmen werden aber erst seit Ende der achtziger Jahre des 20. Jahrhunderts durchgeführt [6]. Man unterscheidet folgende Vorgehensweisen zur In-situ-Temperaturmessung in Staudämmen: Zum einen können Temperaturmessungen in bereits vorhandenen Grundwassermessstellen, die zur Beobachtung von Wasserspiegelhöhen installiert worden sind, durchgeführt werden und zum anderen können Temperatur-Sondierungen ausgeführt werden.

Durch die hohe Sensitivität des Verfahrens - bereits Sickerströmungen mit Filtergeschwindigkeiten ab ca. 10^{-7} m/s sind nachweisbar - können Schwachstellen frühzeitig erkannt werden. Leckagen können sowohl in ihrer horizontalen als auch in ihrer vertikalen Erstreckung eingegrenzt werden [5].

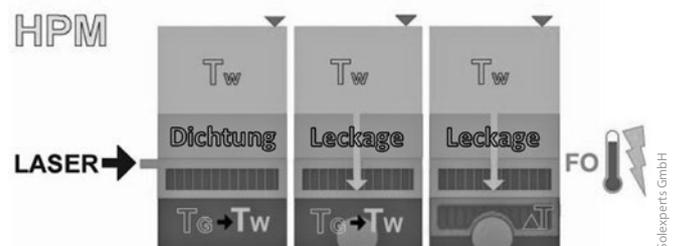


Bild 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Heat-Pulse-Methode

Mit Hilfe einer neuen Messtechnik, der faseroptischen Temperaturmessung, ist es gelungen, ein weiteres Verfahren zur Leckortung bzw. zur Bauwerksüberwachung zu entwickeln. Hiermit können bei entsprechender Anordnung eines Lichtwellenleiters die Temperaturverteilungen in einem Damm quasi flächenhaft bzw. räumlich bestimmt werden. Diese Technik kann ohne größeren Aufwand bei Neubauten und im Rahmen von Sanierungen in ein Bauwerk integriert werden.

2.2 Faseroptische Temperaturmessungen und Verfahrensbeschreibung

Mittels moderner Messtechnik ist es möglich, die Temperaturverteilung entlang eines Lichtwellenleiters unter Verwendung eines Lasers zu bestimmen. Dabei dienen die optischen Fasern im Kabel als Sensoren. Die optischen Eigenschaften der Glasfaser sind unter anderem von der lokalen Umgebungstemperatur abhängig. Eine hoch entwickelte Messtechnik, die bisher insbesondere im Bereich der Verfahrenstechnik Anwendung gefunden hat, ermöglicht die Analyse und Auswertung der Veränderungen dieser Eigenschaften und so die zuverlässige Bestimmung der Temperaturverteilung entlang des Lichtwellenleiters.

Im Staudambau ist die Vermeidung hydrodynamischer Bodenverformungen (Suffosion, Erosion) ein wesentliches Entwurfskriterium. Innere Erosion wird in einem Staudamm in der Regel durch Sickerwasserströmungen verursacht. Das Lokalisieren dieser bevorzugten Wasserwegigkeiten ist sicher eine der anspruchsvollsten Aufgaben der Dammüberwachung. Faseroptische Temperaturmessungen eignen sich aufgrund ihrer hohen Informationsdichte in besonderem Maße für diese Aufgabe.

Grundsätzlich lassen sich zwei Methoden der Messdurchführung unterscheiden [4]: Die Gradientenmethode und die Aufheizmethode.

2.3 Gradientenmethode

Besteht eine ausreichend große Differenz zwischen der Temperatur in der Umgebung des Glasfaserkabels und der Gewässertemperatur, so kann eine auftretende Leckage daran erkannt werden, dass sich der Temperaturgradient zwischen den beiden Ausgangstemperaturen signifikant verringert. Dieses Verfahren wird daher als Gradientenmethode bezeichnet. Hierbei muss beachtet werden, dass ein ausreichender räumlicher Abstand zwischen den Glas-

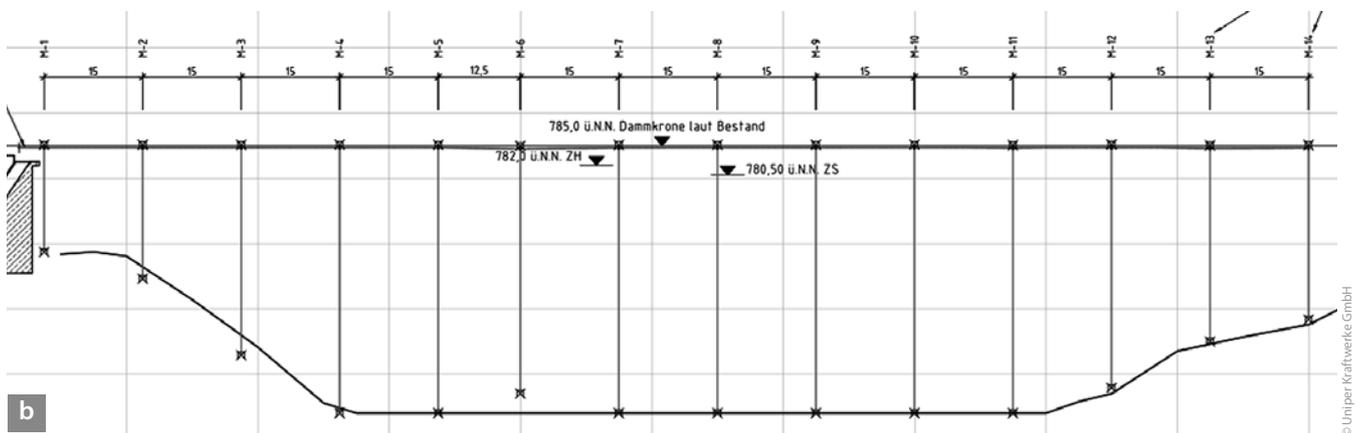
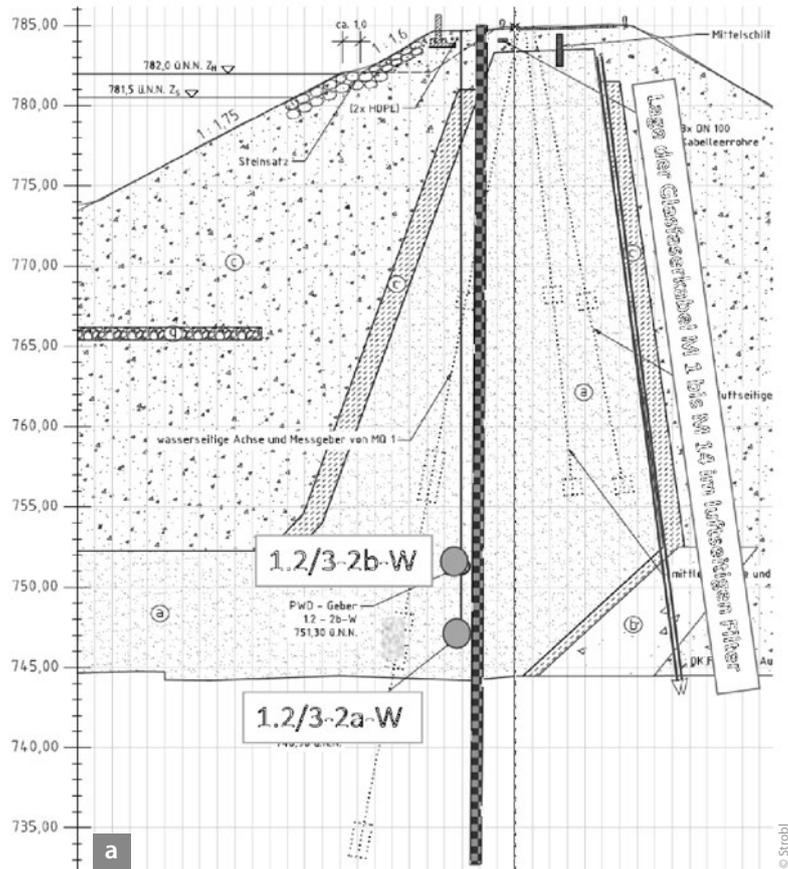


Bild 2: a) Lage des Sondiergestänges bzw. Glasfaserkabel (dunkelgraue Linien mit heller Pfeilspitze) im luftseitigen Filter; die Schachbrettmuster-Linie deutet die Position der neu eingebauten Schlitzwand an (schematische Darstellung, nicht maßstabsgerecht), die grauen Punkte (1.2/3-2b-W und 1.2/3-2a-W) deuten die Positionen der Porenwasserdruckgeber an; b) Positionen und Tiefen der 14 Temperatur-Sondierungen am Damm Rosshaupten; die Grundwassermessstellen BK3 bis BK5 befinden sich an der luftseitigen Böschungskante zwischen den Sondierungen M3 u. M4 (BK5), M6 u. M7 (BK4) sowie M8 u. M9 (BK3)

faserleitungen und dem Wasserkörper des Stauraums besteht. Die ideale Lage eines entsprechenden Messsystems befindet sich naturgemäß luftseitig des Dichtungssystems, da die beschriebenen Temperaturunterschiede dort in der Regel deutlich ausgebildet sind.

2.4 Aufheizmethode

Ist keine ausreichende Temperaturdifferenz vorhanden, z. B. aufgrund eines bautechnisch bedingten geringen Abstandes zwischen Gewässer und Kabel oder aufgrund von langer Zeit gleich bleibender Gewässertemperaturen, so kommt ein Hybrid-Glasfaserkabel zum Einsatz. Dieses Kabel besteht aus Glasfasern und elektrischen Leitern. An diese Leiter wird eine elektrische Spannung angelegt, so dass ein Kurzschlussstrom fließt und sich das gesamte Kabel aufheizt. Der daraus resultierende Temperaturanstieg im Kabel wird mit den Glasfasern gemessen. Neben der konduktiven Wärmeleitung des das Kabel umgebenden Materials tritt bei einer Umströmung des Kabels durch ein Fluid (hier Wasser) ein zusätzlicher advektiver Wärmetransport auf, der zu einer deutlich geringeren Erwärmung des Kabels führt (**Bild 1**). Auf diese Weise können Fließvorgänge nachgewiesen und damit Leckagen geortet werden. Durch Berechnungen können sowohl die Fließgeschwindigkeit des Fluids abgeschätzt als auch die thermischen Parameter des Umgebungsmaterials bestimmt werden. Das Verfahren wird als Aufheiz- bzw. Heat-Pulse-Methode (HPM) bezeichnet.

Die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist eine Weiterentwicklung der HPM. Im Falle von Sickerwassereintritten können so Zonen erhöhter effektiver Wärmeleitfähigkeit ausgewiesen werden.

Sowohl die HPM als auch die Methode der Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sind sensitive Methoden, um Sickerwassereintritte oder Änderungen des Wassersättigungsgrades im Untergrund zu detektieren. Kombiniert man diese beiden Methoden, erhält man ein sehr effizientes und verlässliches Instrument zur Leckageortung.

Für das Leckageortungssystem der Staustufe Roßhaupten wurden sowohl die Gradientenmethode als auch die beiden Varianten der HPM implementiert.

3 Einbau und Installation des Überwachungssystems

Mit der neusten Entwicklung von GTC®, der Retrofit-Methode ([2], [3]), können auch bestehende Dämme mit dieser äußerst effektiven Technik nachgerüstet werden.

Zu Beginn der Baumaßnahme wurden insgesamt 14 Sondierungen (M1 - M14) mit dem faseroptischen Überwachungssystem ausgestattet. Beim Retrofit-Verfahren wird ein bereits bestehender Damm mit Sondierungen bzw. Bohrungen nachträglich ausgestattet. Im Falle des Dammes Roßhaupten wurde das spezielle Sondiergestänge zur Temperaturmessung (Außendurchmesser ca. 28 mm) in Auflockerungsbohrungen in Tiefen von bis zu 40 m eingeschlagen (**Bilder 2a** und **2b**). Die Auflockerungsbohrungen bzw. das Gestänge verlaufen luftseitig (max. Abweichung des Gestänges 0,8 % bzw. 0,46°) durch den Filter des Dammes, um eine bestmögliche Detektion des Sicker-

wassers zu gewährleisten. Zudem wurde das Überwachungssystem um drei Grundwassermessstellen BK 3 - BK 5 erweitert, welche in Tiefen von bis zu ca. 55 m unter GOK reichen.

Die Köpfe der Sondierungen wurden zum zusätzlichen Schutz in Schächte eingelassen. Die verschiedenen Schächte wurden mit einem Hybrid-Verbindungskabel miteinander verbunden und in den Schächten wurden die entsprechenden Kabelanschlüsse für das faseroptische Sensorkabel jeder Sondierung in einer Muffe

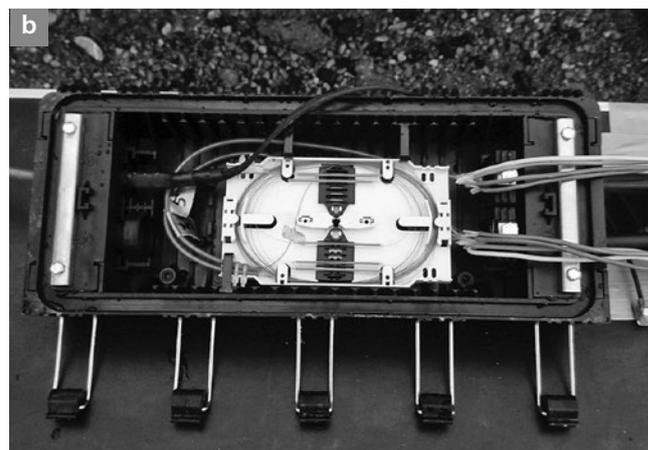


Bild 3 a) Installation des Sondiergestänges; b) Muffe mit faseroptischen Verbindungen; c) fertig gestellter Schutzschacht

versteuert (**Bilder 3a bis 3c**). Über das Verbindungskabel werden alle Sondenkabel im Instrumentierungshäuschen am linken Dammfuß ausgelesen.

Dieses speziell für diese Anwendung entwickelte faseroptische Sensorkabel ermöglicht es auch in Bohrungen/Rohren mit einem geringen Durchmesser (<10 mm) verteilte faseroptische Temperaturmessungen inkl. Aufheizung für das betroffene Kabel zu realisieren. Durch den geringen Durchmesser und das Einrammen des Gestänges in den Filter ist eine optimale thermische Anbindung mit dem Untergrund gewährleistet.

Zur weiterführenden Anwendung der Gradientenmethode wird zudem die Wassertemperatur im Stausee in verschiedenen Tiefen (in einem Tiefenabstand von ca. 1,4 m) mit einem SDL-Datenlogger inkl. Temperatursensorkette per Mobilfunk übertragen.

4 Visualisierung und automatisierte Auswertung

Die Messungen werden permanent in Echtzeit durchgeführt. Die webbasierte Visualisierung ermöglicht einen schnellen und unkomplizierten Zugriff auf die aktuellen Temperaturdaten für alle Beteiligten. Dies beinhaltet zum einen eine Darstellung der Messdaten über verschiedene Zeiträume als auch das Herunterladen der kompletten Temperaturdaten.

Aufgrund der sehr guten Bedingungen für die Gradientenmethode und der erfolgreichen Abdichtungsmaßnahme des Damms, erfolgt die Zuschaltung der Aufheizung, d. h. der Einsatz der Heat-Pulse-Methode nur bei Bedarf.

Das Einsetzen von innerer Erosion hängt insbesondere von der Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers ab. Für Erosionsprozesse sind Fließgeschwindigkeiten von 10^{-3} m/s oder mehr erforderlich. Über die Messung der Bodentemperaturen über die Zeit, zusammen mit der Wassertemperatur, kann die Größenordnung der Fließgeschwindigkeit abgeschätzt werden.

Basierend auf den Temperaturmessdaten der letzten 30 Tage wird von der Visualisierungssoftware eine automatisierte Auswertung durchgeführt, auf Grund derer evtl. Alarme ausgelöst werden. Die Alarme werden gemäß dem Ampelsystem kategorisiert: Grün entspricht einer Fließgeschwindigkeit von der Größenordnung von kleiner 10^{-6} m/s, gelb von größer 10^{-6} m/s und rot entspricht Fließgeschwindigkeiten von ca. $10^{-4}/10^{-5}$ m/s oder größer (**Bilder 4 und 5**).

Mit Hilfe des Alarmsystems kann das Einsetzen von Erosionsprozessen automatisiert frühzeitig erkannt werden und ein Alarm ausgelöst werden. Der Alarm erfolgt unter anderem per E-Mail und die entsprechenden Alarmsektionen sind online einzusehen. Zudem wird automatisch eine Historie vergangener Alarme angelegt, so dass ein evtl. auftretendes Ereignis leicht mit vorherigen verglichen werden kann.

5 Detektionsbeispiel während der Baumaßnahme

Die Baumaßnahme - die Herstellung der Dichtwand - erfolgte vordergründig aufgrund der Annahme, dass der klüftige Grün-

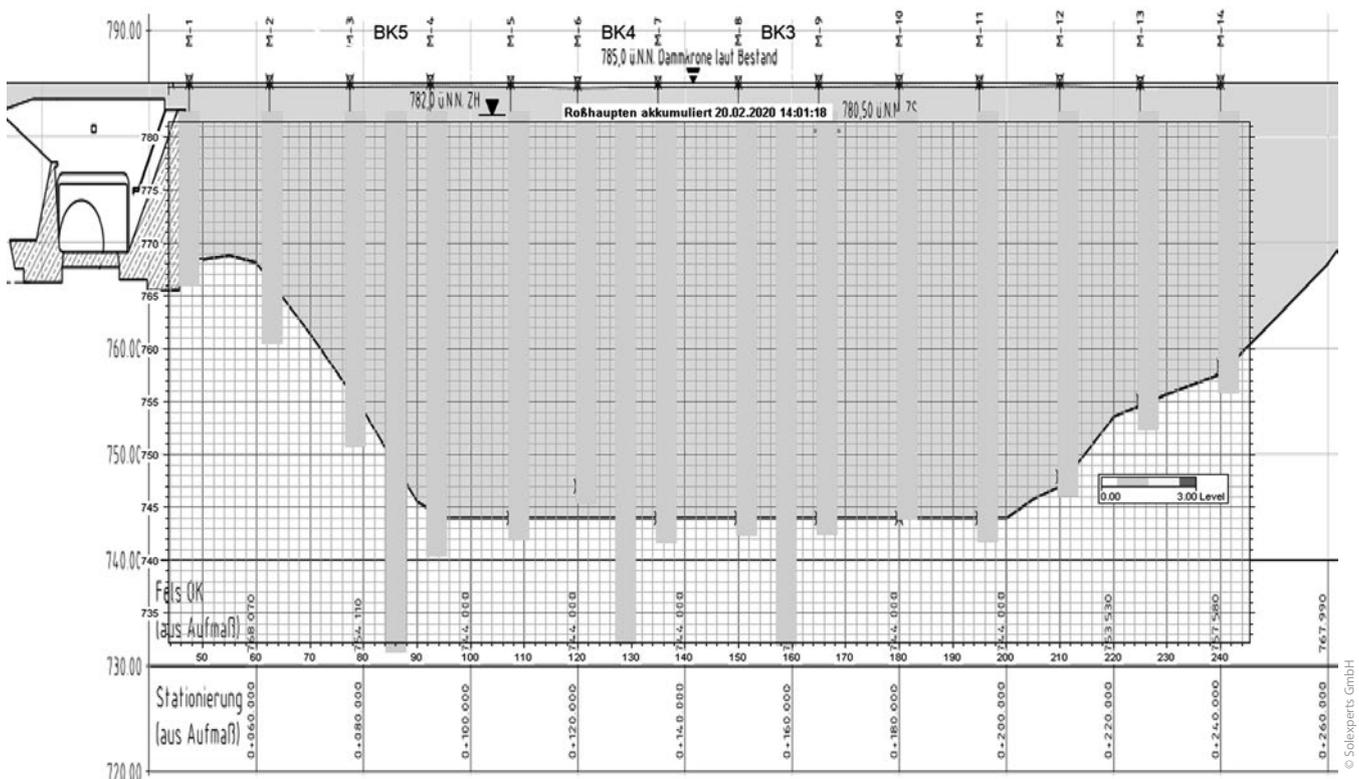


Bild 4: Visualisierung des faseroptisches Alarmsystem basierend auf den Temperaturmessungen, die Alarm-Level der Skala [0-1; 1-2; 2-3] entsprechen den Farben grün, gelb und rot (s. hierzu auch Bild 5b)

dungsfels und in der Folge auch der Lehmern des Damms teilweise durch Erosions- und Suffosionsprozesse geschwächt worden war. Diese Annahme wurde am 04.10.2018 durch das Überwachungssystem bestätigt, welches zu diesem Zeitpunkt im Wesentlichen schon installiert war und eine permanente Temperaturdatenaufzeichnung ermöglichte.

Am 04.11.2018 wurde in der Sondierung M3 in ca. 756 m ü. NN ein signifikanter Temperaturanstieg gemessen, der auf

durchsickerndes Suspensionsmaterial aus der Schlitzwandherstellung, das eine deutlich höhere Temperatur als das ungestörte Umgebungsmaterial der Sondierung M3 hatte, schließen ließ (Bild 5). Dies war eine weitere Bestätigung für die Annahme, dass der luftseitige Kernbereich Zonen erhöhter Durchlässigkeit aufwies. Aus den Zeitpunkten vom Einbringen der Suspension und der Erfassung der ersten Temperaturänderung sowie der Distanz zwischen der Schlitzwandtrasse und der Sondierung

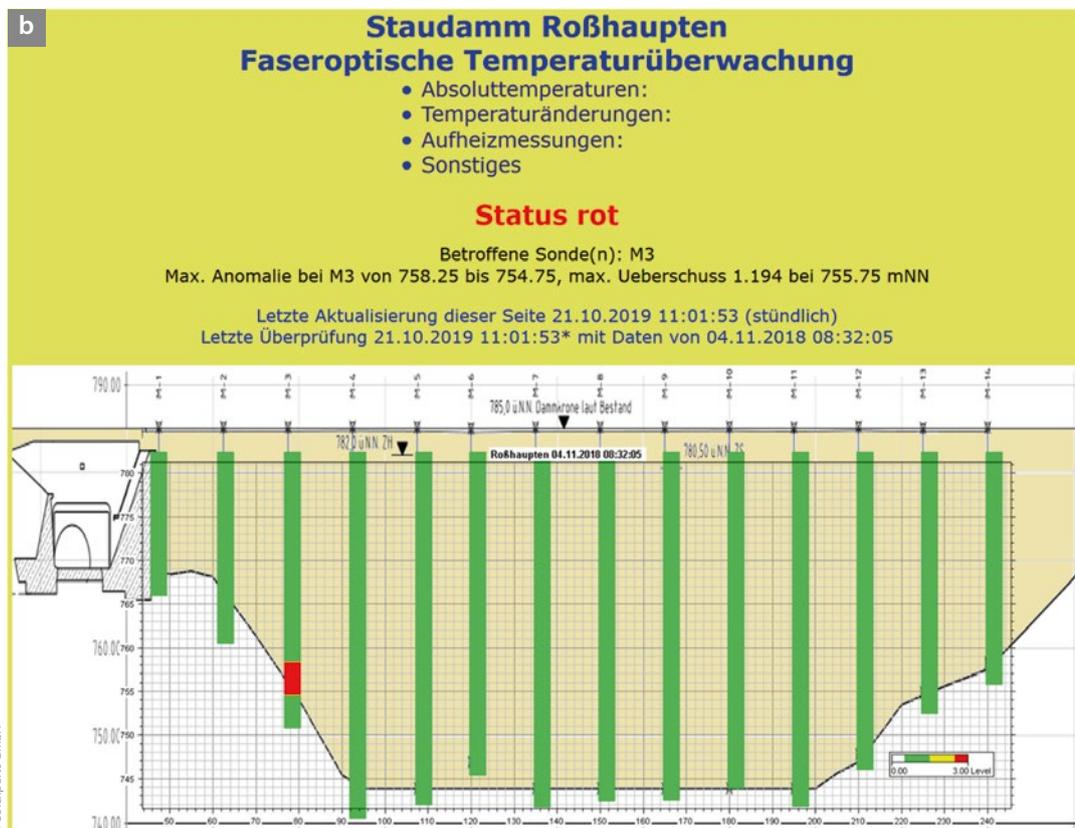
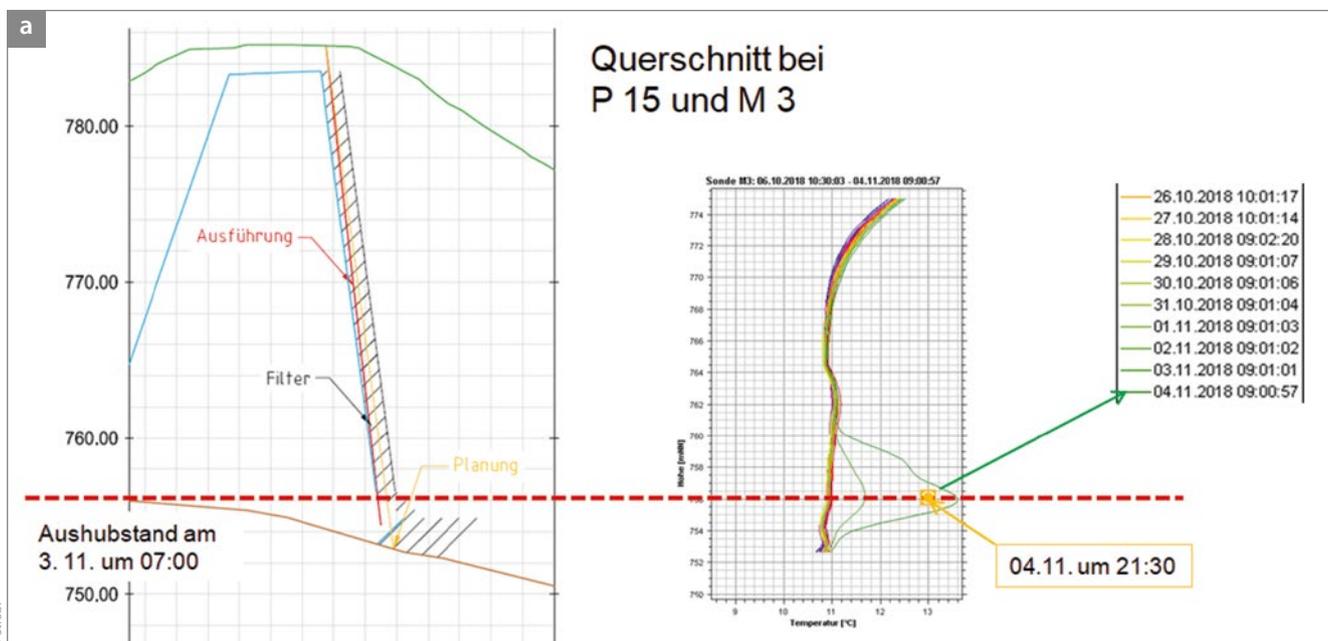


Bild 5: a) Reaktion der Temperaturüberwachung beim Austritt der warmen Suspension durch den luftseitigen Kern während der Dichtwandherstellung am 04.11.2018; b) zum Zeitpunkt der Dichtwandherstellung war die automatische Überwachung und Visualisierung noch nicht implementiert, die Daten vom 04.11.2018 wurden nachträglich mit der Software bearbeitet, wäre das System online gewesen, hätte es den in der Abbildung dargestellten Alarm generiert

konnte eine Durchlässigkeit im Fels bzw. an der Grenzfläche Kern zu Fels von ca. 10^{-4} m/s abgeschätzt werden. Diese Durchlässigkeit entsprach in etwa der bei einer im Vorfeld der Maßnahme durchgeführten FE-Berechnung angenommenen Durchlässigkeit für diesen Bereich [1].

6 Schlussfolgerung

Das im Retrofit-Verfahren eingebaute faseroptische System zur permanenten Überwachung der Dichtigkeit des Damms der Staustufe Roßhaupten hat seine Leistungsfähigkeit während der Baumaßnahme unter Beweis gestellt. Die vermuteten Zonen erhöhter Durchlässigkeit im unteren Kernbereich konnten mit Hilfe des Glasfaser-Messsystems nochmals bestätigt werden.

Das automatische Leckageortungssystem funktioniert gemäß den Vorgaben seit seiner Installation zuverlässig.

Dank

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung bei der Uniper Kraftwerke GmbH und bei Prof. (EoE) Dr.-Ing. Theodor Strobl.

Autoren

Dipl.-Geophys. Axel Fabritius
Constantin Rupp, M. Sc.

Solexperts GmbH
Heinrich-Wittmann-Straße 7a
76131 Karlsruhe
axel.fabritius@gtc-solexperts.com
constantin.rupp@gtc-solexperts.com

Axel Fabritius, Constantin Rupp, Andreas Bauer und
Bernd Kottke-Wenzel

New fibre optic monitoring system for the Roßhaupten dam

In the course of the reconstruction of the sealing element of the Roßhaupten embankment dam, a new type of fibre optic temperature monitoring system was implemented for the first time in Germany. The main installation, which was realized by the application of the new so-called Retrofit Method, took place before the commencement of the installation of the new diaphragm wall and thus, the performance of the sealing element could be monitored during construction. By implementing the monitoring system at an early stage of the rehabilitation works, the assumed areas of increased permeability within the natural clay core could be clearly demonstrated. After the completion of reconstruction works, the fibre optic leakage detection system was brought into regular operation. In order to ensure an ideal surveillance of the embankment dam, permanent measurements in real time are automated and evaluated automatically. Thus, potential areas of seepage can be identified at an early stage and alarms generated. Current measurements and possible alarms can be visualized on a web site.

Dr.-Ing. Andreas Bauer

Dr. Bernd Kottke-Wenzel, M. Sc.

Uniper Kraftwerke GmbH
Luitpoldstraße 27
84034 Landshut
andreas.bauer@uniper.energy
bernd.kottke-wenzel@uniper.energy

Literatur

- [1] Bauer, A.; Kleist, F.; Strobl, Th.: Eine neue Dichtung für die Talsperre Roßhaupten. In: WasserWirtschaft 109 (2019), Heft 5, S. 122-125.
- [2] Fabritius, A.; Dornstädter, J.; Heinemann, B.; Trick, T.: Distributed fibre optic temperature measurements for dam safety monitoring: Current state of the art and further developments. In: Proceedings of the Annual South African National Committee on Large Dams (SANCOLD) Conference, Centurion, Tshwane, South Africa (2017).
- [3] Dornstädter, J.; Dutton, D.: Retrofit of Fibre Optics to existing Dams - Permanent Monitoring of Leakage and Detection of Internal Erosion. In: 19th Biennial Conference of the British Dam Society, Lancaster (2016), S. 165-172.
- [4] Aufleger, M.: Faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau. In: Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, (2000), Heft 89.
- [5] Dornstädter, J.: Sensitive monitoring of embankment dams. In: Proceedings Repair and Upgrade of Dams. Stockholm: Royal Institute of Technology (1996).
- [6] Armbruster, H.; Dornstädter, J.; Kappelmeyer, O.; Tröger, I.: Thermometrie zur Erfassung von Schwachstellen an Dämmen. In: WasserWirtschaft 83 (1993), Heft 4.
- [7] Kappelmeyer, O.: The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes at depth. In: Geophysical Prospecting (1957), Vol. 3, S. 239-258.

 Springer Professional

Talsperre Roßhaupten

Bauer, A.; Kleist, F.; Strobl, Th.: Eine neue Dichtung für die Talsperre Roßhaupten. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 08/2019. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

www.springerprofessional.de/link/16693058

Kalusa, B.: Talsperre Rosshaupten – ein Energiespeicher unter veränderten Nutzungsinteressen. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 10/2007. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007.

www.springerprofessional.de/link/5011310