

Überwachung der Talsperre Dornau mit verteilten faseroptischen Temperaturmessungen

Axel Fabritius, Franz Lutz, Andreas Bauer und Tobias Liepert

Zusammenfassung

Die Talsperre Dornau, auch bekannt als Lechstaustufe 6, ist Bestandteil der Kraftwerksgruppe Lech der Uniper Kraftwerke GmbH und staut seit 1960 den Lech südlich der Stadt Schongau auf. Eine Besonderheit des Bauwerks ist das Vorhandensein eines Mittelwasserbeckens, sodass der Dammfuß von der Luftseite her eingestaut wird. Eine klassische Überwachung der Gründungsfuge mit einer direkten Sickerwasserfassung ist deshalb nicht möglich.

In den letzten Jahren wurden an den im Bereich der Gründungsfuge vorhandenen Standrohren Messwerte erfasst, die auf eine Zunahme der Unterströmung des Damms hindeuten könnten. Um mögliche Durchsickerungen im Kern- und Aufstandsbereich frühzeitig erkennen zu können und um weitere Informationen zu den Verhältnissen im Bereich der Gründungsfuge zu erhalten, wurde 2022 ein faseroptisches Messsystem zur Überwachung der Durchsickerung installiert.

Verteilte faseroptische Temperaturmessungen ermöglichen die quasi-kontinuierliche Bestimmung der Umgebungstemperatur entlang einer Glasfaserleitung bis zu mehreren Kilometern Länge. In der Stauanlagenüberwachung finden diese Messungen Einzug, da sie hervorragend geeignet sind Temperaturänderungen innerhalb des Dammkörpers eindeutig zu detektieren, die durch Sickerwasserinfiltrationen verursacht werden.

Die Implementierung des Überwachungssystems für die Talsperre Dornau erfolgte durch die nachträgliche vertikale Installation von Glasfaserleitungen im bestehenden Damm (Retrofit-Verfahren). Für die Installation der Glasfaserkabel wurden 21 Kernbohrungen im luftseitigen Filter von der Dammkrone bis 3,5 m unter die Dammaufstandsfläche abgeteuft. Vor der Verpressung der Bohrungen mit Bentonit-Zement-Suspension wurden Glasfaser-Kupfer-Hybridkabel schleifenförmig eingebracht. Die verteilten faseroptischen Temperaturmessungen entlang der Sondenkabel werden permanent durchgeführt und stündlich automatisch evaluiert. Mögliche Durchsickerungsbereiche können so frühzeitig erkannt und entsprechend Alarm ausgelöst werden. Messwerte und Alarmstatus werden außerdem in einem Online-Portal visualisiert.

Die Instrumentierung des Damms mit Glasfaser-Kupfer-Hybridkabeln ermöglicht, dass zwei verschiedene Ansätze zur Überwachung angewandt werden können. Dies ist zum einen die Gradientenmethode und zum anderen die Heat-Pulse-Methode. Mit der faseroptischen Temperaturmessung erhielt die Talsperre Dornau ein sehr effizientes und verlässliches Instrument zur frühzeitigen Ortung möglicher Leckagen.

1 Einleitung

Im Auftrag von Uniper Kraftwerke GmbH hat Solexperts GmbH ein vollautomatisches, faseroptisches Überwachungs- und Leckageortungssystem für die Staustufe Dornau, auch bekannt als Lechstaustufe 6, entworfen. Die Überwachung bzw. die Leckageortung basiert auf verteilten faseroptischen Temperaturmessungen entlang vertikal installierter Glasfaserkabel im Dammkörper. Dichtungsüberwachungssysteme dieser Art sind bereits bei einer Reihe von Dämmen weltweit installiert worden (Aufleger 1997, Aufleger 2007, Fabritius 2020).

2 Faseroptische Leckageortungsmethode

Verteilte faseroptische Temperaturmessungen ermöglichen die annähernd kontinuierliche Bestimmung der Umgebungstemperatur entlang einer Glasfaserleitung bis zu mehreren Kilometern Länge. In der Stauanlagenüberwachung finden diese Messungen Einzug, da sie hervorragend geeignet sind Temperaturänderungen innerhalb des Untergrunds, bzw. des Dammkörpers zu detektieren, welche durch Sickerwasserinfiltrationen verursacht werden (Aufleger, 1998).

Sickerströme stellen eine sehr effektive Form des Wärmetransports dar, wodurch die Temperaturverteilung im Untergrund innerhalb kurzer Zeit und deutlich vom einströmenden Wasser beeinflusst wird. Bei einer genügend großen Temperaturdifferenz zwischen Wasser- und Bodentemperatur ist die aus Sickerströmen resultierende Verringerung des Temperaturgradienten durch faseroptische Messungen aufgrund ihrer hohen Informationsdichte meist eindeutig detektierbar und lokalisierbar. Die Temperaturverteilung in Stauseen und dem Untergrund reagiert phasenversetzt auf jahreszeitliche Änderungen der Umgebungstemperatur, wodurch der benötigte Temperaturunterschied im Regelfall vorhanden ist. Dieses als Gradientenmethode bezeichnete Verfahren hat sich seit langem in vielen Anwendungen weltweit bewährt, um Sickerwasserinfiltrationen zu detektieren (Kappelmeyer 1957, Armbruster 1992, Armbruster 1993).

In bestimmten Fällen, bei denen keine ausreichende Temperaturdifferenz zwischen Wasser und Untergrund besteht, z. B. weil die Verlegung der Glasfasern in einem Bereich sehr nahe am Wasserkörper erfolgt ist, kann ein alternatives Verfahren angewendet werden, das auf Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit entlang des Sensorkabels ausgelegt ist. Bei der Heat-Pulse-Methode wird ein faseroptisches Hybridkabel verwendet, welches sich durch elektrischen Stromfluss durch die im Kabel vorhandenen Kupferadern aufheizen lässt. Somit wird ermöglicht die Kabelumgebung durch eine kontrollierte Heizleistung zu erwärmen. Durch Temperaturmessungen entlang des Kabels während des Aufheizvorgangs lassen sich Zonen erhöhter Wärmeleitfähigkeit bestimmen, welche wiederum auf Sickerwasserströme schließen lassen. (Dornstädter 1997, Aufleger 2008)

Das Leckageortungssystem der Staustufe Dornau ist standardmäßig auf die Gradientenmethode ausgelegt. Durch Verwendung eines faseroptischen Hybridkabels wird jedoch ermöglicht, dass auch die Heat-Pulse-Methode zur Anwendung kommen kann.

3 Ausgangssituation Talsperre Dornau

Als Absperrbauwerk der Talsperre Dornau dient ein ca. 30,5 m hoher und 423 m langer, zonierter Kiesschüttdamm mit innenliegender Lehmkerndichtung. Zur besseren Anbindung des Lehmkerns an den Untergrund wurden das vorhandene Kiesbett ausgeräumt und der anstehende Flinzmergel etwa zwei Meter tief ausgeschachtet. Die Anbindung des Dammkerns an die Flinzoberfläche wurde durch einen Tonschlag hergestellt. Aufgrund der direkt unterhalb liegenden Papierfabrik gibt es die Besonderheit, dass an der Luftseite des Dammes neben dem ursprünglichen Flussbett noch ein geringfügig höherliegendes sog. Mittelwasserbecken angeordnet ist. Dieses diente früher zum Einweichen der Baumstämme zur Papierherstellung und staut auch heute noch das luftseitige Dammvorland der Talsperre ein.

Um die Überwachung der Gründungsfuge zwischen Dammkern und anstehendem Untergrund zu verbessern und mögliche nachteilige Entwicklungen frühzeitig erkennen zu können, wurde die Entscheidung getroffen die Talsperre Dornau mit einem faseroptischen Überwachungssys-

tem auszustatten. Die Installation des Messsystems wurde von Januar bis Juli 2022 durchgeführt, wobei das sogenannte Retrofit-Verfahren angewandt wurde, um Glasfaserleitungen nachträglich im Damm zu installieren. Abb. 1 zeigt Bilder verschiedener Bauabschnitte während der Installation des Messsystems.



Abb. 1 Talsperre Dornau: (a) Ansicht von Nordwest, (b) Bohrungsarbeiten auf Dammkrone (c) Nach Abschluss Bohrarbeiten (d) Anfertigen Spleißverbindungen

4 Spezifikation Monitoring System

Grundlage des Überwachungssystems ist die Messung der Bodentemperatur im Damm entlang von Glasfaserleitungen.

Zur Einbringung der Messkabel im Damm wurden 21 geneigte Kernbohrungen im luftseitigen Filter parallel zum Lehmkern abgeteuft. Der Abstand zwischen den Bohransatzpunkten auf der Dammkrone beträgt zwischen 10 m und 15 m. Abb. 2 zeigt die Lage der Sondierbohrungen im Längs- und Querschnitt des Damms. Die Bohrungen reichen jeweils bis 3,5 m unter der Dammaufstandsfläche, mit Ausnahme der Sondierung DOR_503 welche an der Oberkante des Grundablassbauwerks endet. In Abb. 3 sind die Bohransatzpunkte auf der Dammkrone dargestellt.

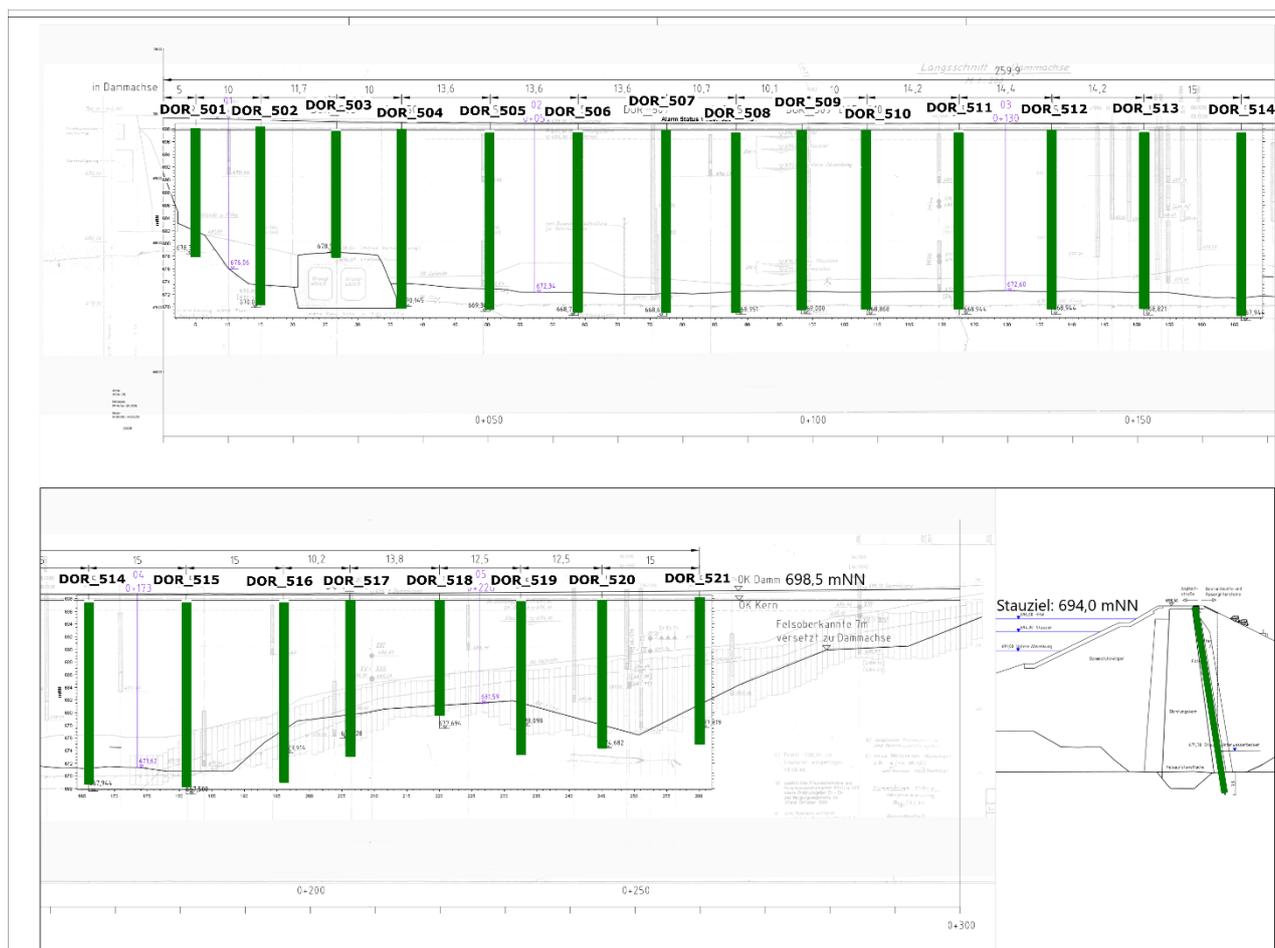


Abb. 2 Übersicht Bohrungen im Dammkörper



Abb. 3 Lageplan Bohrungen

Die Segmente des Hybridkabels wurden schleifenförmig in den Bohrungen installiert. Hierzu wurde das Kabel an der Außenseite von Pegelrohren befestigt, welche in die Bohrungen eingebracht wurden. Anschließend wurde der Ringraum zwischen Pegelrohr und Bohrlochwand mit Zement-Bentonit-Suspension verpresst, um eine wärmeleitende Verbindung mit dem umgebenden Boden herzustellen.

Auf der Dammkrone oberhalb der jeweiligen Bohransatzpunkte wurden Schächte angeordnet, die den Zugang zu den Bohrungen und den Sensorkabeln für eventuelle Wartungsarbeiten ermöglichen. Zur Verlegung der Glasfaser-Hybrid-Verbindungskabel entlang der Dammachse wurden Leerrohre zwischen den Schächten installiert. Die einzelnen Kabelsegmente wurden mittels Fusionsspleißverbindungen in den Schächten verbunden. Die faseroptische Überwachung des Dammes erfolgt über zwei durchgängige Faserschleifen, die den Damm alternierend durchlaufen. Die erste Schleife durchläuft die Bohrungen mit ungerader Nummerierung, die zweite Schleife die Bohrungen mit gerader Nummerierung. Bei Ausfall oder Beschädigung einer Messschleife lässt sich somit weiterhin die gesamte Dammstrecke überwachen, wenn auch mit geringerer räumlicher Abdeckung. Insgesamt wurden ca. 2700 m Hybridkabel im Damm installiert.

Die elektronischen Komponenten der Messtechnik sind in einem separaten Betriebsraum untergebracht und sind in Abb. 4 gezeigt. Datenaufzeichnung, Prozessierung, Upload, sowie eventuelle Alarmauslösung erfolgt vor Ort. Zusätzlich zur Überwachung der Bodentemperaturen innerhalb des Dammbauwerks findet eine Messung der Wassertemperatur im Stausee bis in ca. 9 m Tiefe statt, um eine Korrelation zwischen Wasser- und Bodentemperatur untersuchen und somit die Größenordnung einer möglichen Sickergeschwindigkeit bestimmen zu können.



Abb. 4 Unterbringung der Messtechnik

5 Performance

5.1 Gradientenmethode

Im August 2022 startete der Probetrieb, der im September 2022 nahtlos in den Regelbetrieb überführt werden konnte und seitdem eine zuverlässige Messwerterfassung mit hoher Datenqualität verzeichnet. Die komplette Messung einer Schleife wird innerhalb von zwei Minuten durchgeführt, beide Schleifen werden dabei abwechselnd gemessen. Anschließend wird ein

stündlicher Mittelwert der Messwerte gebildet. Eine Kontrolle und Korrektur der faseroptischen Temperaturen wird mit klassischen Widerstandsthermometern durchgeführt.

Die Temperaturprofile in den Sonden weisen stabile Werte auf, die größtenteils dem Jahresgang eines ungestörten und nicht von Sickerwasser beeinflussten Temperaturverlaufs im Untergrund folgen. Eine nennenswerte Ausnahme bildet der Bereich um den Grundablass am nordwestlichen Ende des Damms. Abb. 5 zeigt den Einfluss des Grundablassbauwerks auf die Temperaturen im Damm. Während die Sonden DOR_501, DOR_505 und DOR_506 einen normalen jahreszeitlichen Temperaturgang aufweisen, sind die Sonden DOR_502 und DOR_504 in der Tiefe bereits geringfügig beeinflusst. Die Sonde DOR_503 hingegen reicht bis an die Oberkante des Bauwerks und ist deutlich durch die variablen Temperaturen im Grundablass beeinflusst. Die gemessenen und für diese Tiefe abnormalen Bodentemperaturen sind auf dessen konduktiven Wärmeeintrag in den Damm zurückzuführen.

Im System implementiert ist zudem eine automatisierte Alarmauswertung, die auf der Überwachung von Temperaturänderungen basiert. Zur Abschätzung von Fließgeschwindigkeiten werden Temperaturgradienten über verschiedene Zeiträume überwacht. Gemäß eines Ampelsystems werden bei langsamer oder schneller Temperaturänderung verschiedene Alarme generiert.

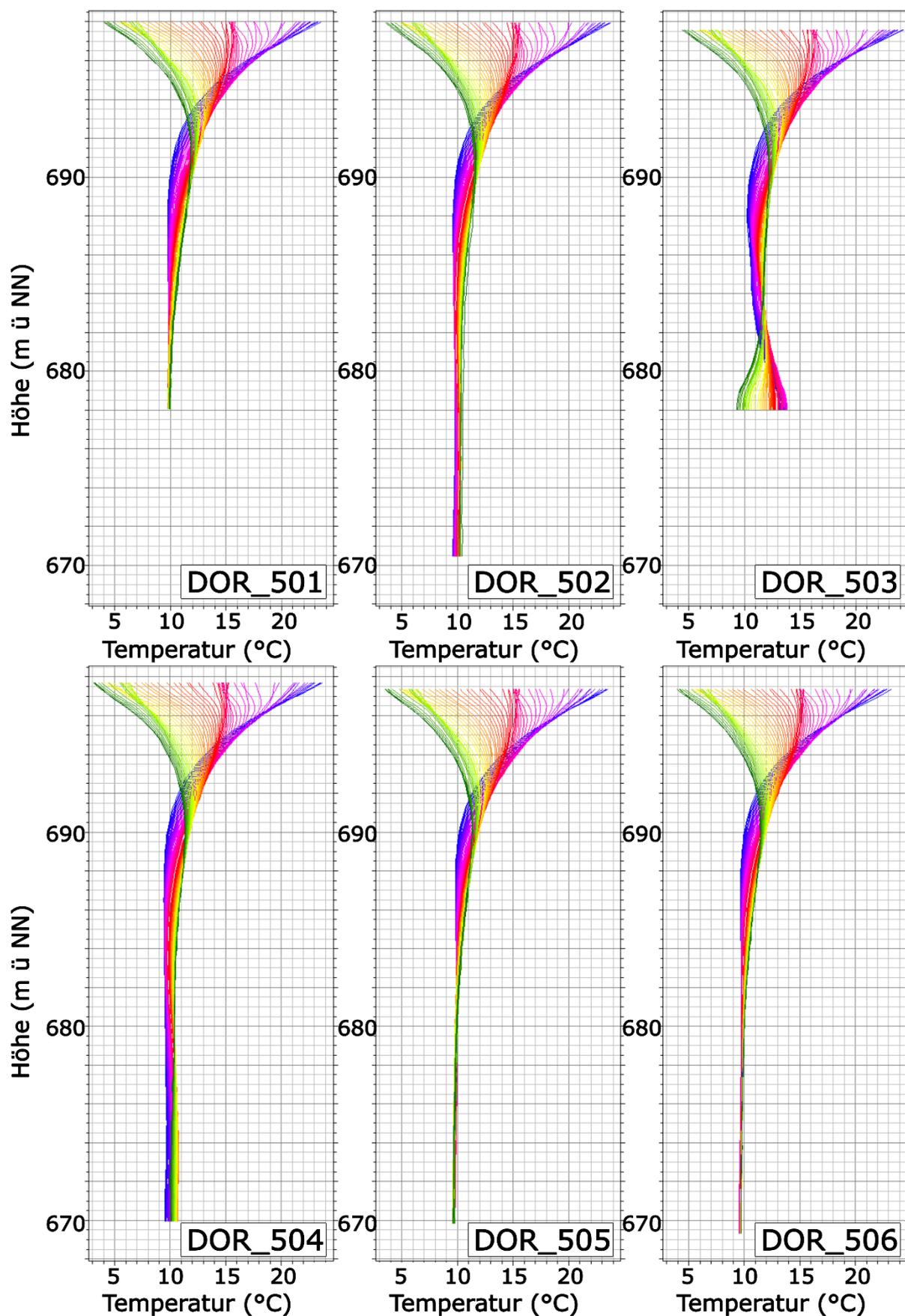


Abb. 5 Tagesmittelwerte ausgewählter Sondierungen über den Zeitraum August 2022 (blau) bis Februar 2023 (grün)

5.2 Heat-Pulse Methode

Zusätzlich zur Überwachung von Absoluttemperaturen ist die Möglichkeit einer Aufheizmessung implementiert. Bei Bedarf einer differenzierteren Überprüfung lässt sich das Aufheizverhalten der LWL-Kupfer-Hybridkabel bei definierter, gleichbleibender Heizleistung messen. Die Temperaturdifferenz zwischen ungestörter Ausgangstemperatur und Temperatur am Ende der Aufheizung gibt Aufschluss über den Wärmetransport im Damm. Aus dem Abkühlvorgang der Kabel lässt sich außerdem die scheinbare Wärmeleitfähigkeit berechnen. Beide Ansätze reagieren hochempfindlich auf geringste Sickerwasserströme. Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit einer Heat-Pulse Auswertung sind in Abb. 6 dargestellt. Die Messwerte liegen größtenteils im Bereich typischer Werte von im Wasserbau verwendeter Lockergesteine und es sind keine Anzeichen einer Durchströmung des Damms festzustellen. Ein generelles Ansteigen der Wärmeleitfähigkeiten in den tiefen Sondenbereichen könnte jedoch eine höhere Durchfeuchtung des Damms in der Tiefe anzeigen.

Aktuelle 2D Darstellung der Wärmeleitfähigkeit.

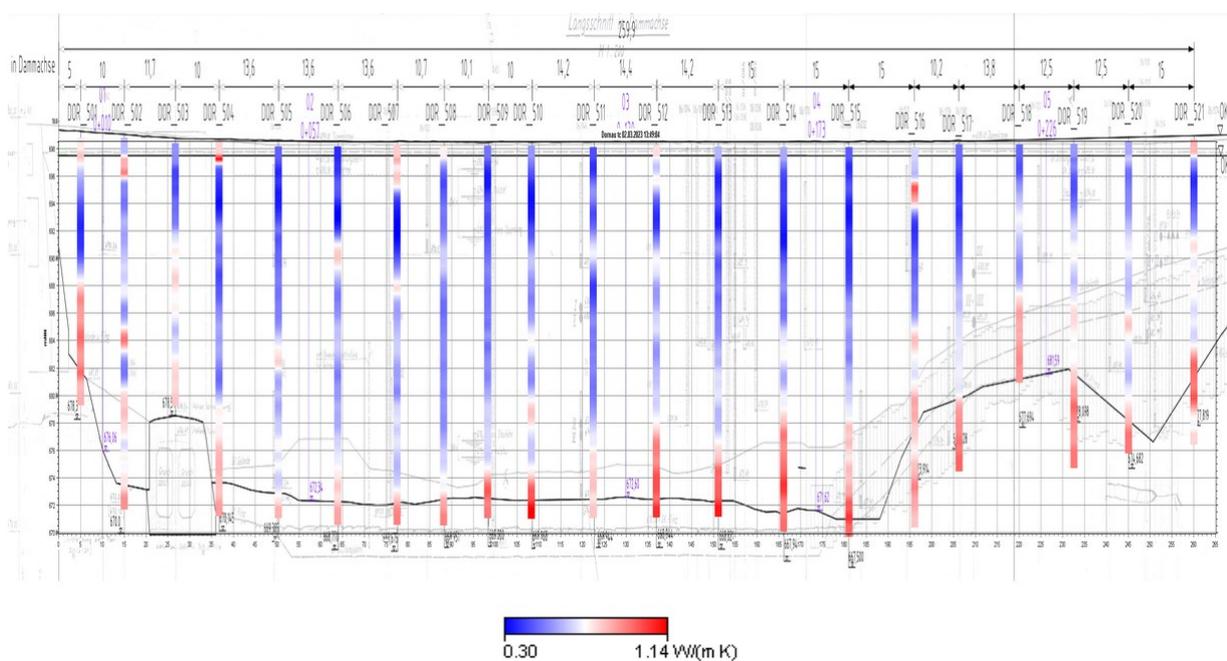


Abb. 6 Darstellung der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus einer Heat-Pulse Messung

6 Visualisierung

Die Visualisierung des Messsystems erfolgt in einem Online-Portal. Hier werden zum einen aktuelle und vergangene Messwerte dargestellt, ebenso Ort und Zeit ausgelöster eventueller Alarme. Wichtige Funktionen sind ebenfalls über das Portal zugänglich, so lassen sich zum Beispiel Alarme online quittieren oder Heat-Pulse-Messungen starten. Abb. 7 zeigt einen Screenshot der Startseite des Online-Portals.

Talsperre Dornau - Faseroptische Leckortung

Aktueller Status Absoluttemperaturen Aufheizmessungen Historie Aufheizmessungen Alarm Verlauf Fotos Steuerseite Sonstiges

Zustand der akkumulierten Kontrolle

Kein Alarm.

Zustand der aktuellen Kontrolle

Kein Alarm.

Alarm akkumuliert Daten seit: 15.03.2023 08:01:07

Letzte Alarmauswertung: 15.03.2023 14:01:20

Letzter Neustart der Software: 08.03.2023 10:37:30

Letzte Temperaturmessung: 15.03.2023 13:58:14

Letzte Aktualisierung der Abbildungen: 15.03.2023 14:30:00

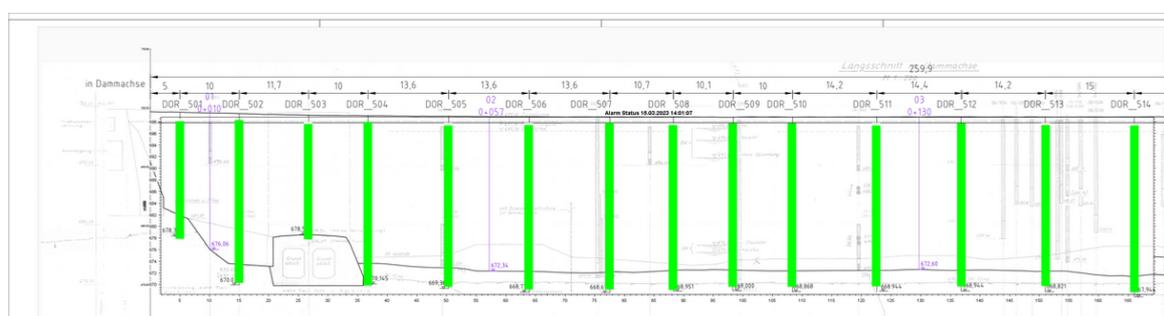


Abb. 7 Web-Portal des Monitoringsystems

7 Ausblick

Durch die Ausstattung der Talsperre Dornau mit faseroptischer Messtechnik zur verteilten Temperaturmessung hat der Damm ein modernes und hochsensitives Überwachungssystem erhalten. Stabile Temperaturmesswerte mit hoher räumlicher Auflösung ermöglichen eine hohe Sensitivität auf geringe Temperaturänderungen. Bereits kleinste Sickerwasserströme können durch die Gradientenmethode zuverlässig erkannt werden. Als weiteres Instrument für eine tiefergehende Untersuchung steht bei Bedarf die Heat-Pulse-Messung zur Verfügung. Somit kann der Damm erstmalig seit seiner Inbetriebnahme vor über 60 Jahren auf seiner gesamten Länge flächig überwacht werden.

Literatur

Armbruster, H.; Dornstädter J.; Kappelmeyer O.; Tröger L. (1992): Detection of seepage and flow phenomena by temperature measurements in soil. Tracer Hydrology - Proc. of the 6th Int. Symp. on Water Tracing. Eds.: H. Hötzl & A. Werner. A. A. Balkema Verlag, Rotterdam.

Armbruster, H.; Dornstädter J.; Kappelmeyer O.; Tröger L. (1993). Thermometrie zur Erfassung von Schwachstellen an Dämmen. Vol. 83 (4), Wasserwirtschaft, Franck-Kosmos-Verlag, Stuttgart.

Aufleger M.; Dornstädter J.; Huber K.; Strobl Th. (1997). Sensitive Long-Term-Monitoring of Embankment Dams by Fibre Optic Temperature Laser Radar: First Results. ICOLD XIX 1997. Florence. Q.74-14. 5: 443-446. Paris: International Commission on Dams

Aufleger M.; Dornstädter J.; Strobl Th. (1998). Innovative Dam Monitoring Systems. Proceedings: International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety, Barcelona, Juni 1998

Aufleger M.; Dornstädter, J.; Strobl, Th.; Conrad, M.; Perzmaier, S.; Goltz, M. (2007) 10 Jahre verteilte faseroptische Temperaturmessungen im Wasserbau, Wasserwirtschaft Ausgabe 10/2007, 57-49.

Aufleger M.; Goltz, M.; Perzmaier, S.; Dornstädter, J. (2008) INTEGRAL SEEPAGE MONITORING ON EMBANKMENT DAMS BY THE DFOT HEAT PULSE METHOD. Proceedings of the 1st International Conference on Long Time Effects and Seepage Behavior of Dams (LTESBD08).

Dornstädter J. (1997): Detection of Internal Erosion in Embankment Dams. Q.73, R.7, ICOLD 19th Congress, Florence.

Fabritius, A.; Rupp C.; Bauer A.; Kottke-Wenzel B. (2020). Neues faseroptisches Überwachungssystem am Damm Roßhaupten. Wasserwirtschaft Ausgabe 9/2020, 40-45.

Kappelmeyer, O. (1957). The use of near surface temperature measurements for discovering anomalies due to causes of depth. Geophysical prospecting, The Hague, Vol. 3.

Anschrift der Verfasser

Axel Fabritius, Dr. Franz Lutz
Solexperts GmbH
Ostring 8a, D-76131 Karlsruhe
axel.fabritius@gtc-solexperts.com, franz.lutz@gtc-solexperts.com

Dr. Andreas Bauer
Uniper Kraftwerke GmbH / Sparte Wasserkraft
Luitpoldstraße 27, D-84034 Landshut
andreas.bauer@uniper.energy

Dr. Tobias Liepert
Uniper Kraftwerke GmbH / Kraftwerksgruppe Lech
Johann-Schmidt-Str. 11
D-86899 Landsberg am Lech
tobias.liepert@uniper.energy