

CLIENT II - DAMAST TRANSFER: TECHNOLOGIEN FÜR DEN SICHEREN UND  
EFFIZIENTEN BETRIEB VON WASSERRESERVOIREN; VORHABEN:  
SCHULUNGSKONZEPTE ZUM AUFBAU UND BETRIEB VON MULTISENSOR  
NETZWERKEN

*- DAMAST - TRANSFER*

# Abschlussbericht

Teil 1: Kurzbericht

Teil 2: Eingehende Darstellung

Juli 2025

Förderkennzeichen: 03G0908B  
Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2022 – 31.10.2024

Zuwendungsempfänger: Europäisches Institut für Energieforschung - EIFER  
Emmy-Noether-Straße 11  
76131 Karlsruhe



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Projektleitung: Dr. Roman Zorn  
Projektbearbeitung: Roman Zorn, Olaf Ukelis, Detlev Rettenmaier

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 03G0882B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# 1 Inhalt

1	Inhalt .....	1
2	Teil I Kurzbericht: Teilprojekt Multi-Sensornetzwerk .....	2
2.1	Aufgabenstellung .....	2
2.2	Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	2
2.3	Ablauf des Vorhabens .....	2
2.4	Wesentliche Ergebnisse .....	3
2.5	Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen .....	3
3	Teil II: Eingehende Darstellung (Multi-Sensor-Netzwerk).....	4
3.1	Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
3.2	Qualifizierung .....	4
3.3	Aufbau eines Multisensoren-Netzwerks an der Staumauer.....	4
3.4	Einrichtung eines lokalen ausbaufähigen Stützpunkts .....	5
3.4.1	Aufbau neuer Sensorik und Erweiterung.....	5
3.5	Datenmanagement .....	18
3.6	Schlussfolgerung .....	18
3.7	Referenzen:.....	19
4	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	20
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten .....	20
6	Voraussichtlicher Nutzen .....	21
7	Fortschritt bei anderen Stellen .....	21
8	Veröffentlichungen .....	21

## **2 Teil I Kurzbericht: Teilprojekt Multi-Sensornetzwerk**

### **2.1 Aufgabenstellung**

Im Rahmen des DAMAST-Transfer-Teilprojekts sollte ein erweitertes Messstellenetz auf Basis alter und neuer Multisensor-Netzwerke unter Einbeziehung der georgischen Partner errichtet werden. Das Messsystem sollte den georgischen Partnern dauerhaft zur Verfügung stehen. Neben dem Betrieb der Sensornetzwerke sollten den georgischen Partnern Anleitungen zur Verfügung gestellt, die ihnen den Nachbau einzelner Sensormodule ermöglicht. Damit wären die georgischen Partner dann in der Lage, das Messnetzwerk am Ende eigenständig mit zusätzlichen Multisensormodulen beliebig zu erweitern. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwiefern das Dammmonitoring des Dammbetreibers Engurhesi mit faseroptischen Temperaturmessungen erweitert werden kann. Entsprechende Einweisungen und Schulungen der georgischen Partner wurden dementsprechend geplant. Zudem sollte eine Drohne, die mit einer integrierten Wärmebildkamera bestückt ist, eingesetzt werden, um ein flächenhaftes Temperatur-Monitoring zu ermöglichen. Im Rahmen des Projekts sollten neue, innovative Messtechniken getestet werden, die das Damm-Monitoring sinnvoll ergänzen. Kostengünstige Wärmebild- bzw. Infrarottemperaturlösungen sollten aufgebaut und in das Multisensoren-Netzwerk integriert werden. Zudem soll geprüft werden, ob einfache Funkantennen, die zur Datenübertragung innerhalb des Sensornetzwerks genutzt werden, mit geeigneter Messfrequenz (wetterunabhängig) zur Abstandsmessung eingesetzt werden können. Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass die Entwicklung einfacher elektrischer Leitfähigkeitsmessmodule sinnvoll wäre, um Tracerversuche und Randumläufigkeiten zusätzlich bewerten zu können.

Insgesamt sollten mit einem intensivierten und flächendeckenden Temperatur-Monitoring auftretende thermische Veränderungen und Spannungen im Umfeld und am Dammkörper näher untersucht werden. Die georgischen Partner sollten so einbezogen werden, dass ein unabhängiger, dauerhafter Betrieb des Messstellennetzes möglich ist.

### **2.2 Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Nach unserem Kenntnisstand werden derzeit kabellose, vernetzte Multisensorschwärme nur am Enguri-Damm (im laufenden DAMAST-Projekt) zusätzlich zur Dammüberwachung eingesetzt. Tatsache ist, dass kabellose Vernetzungstools und -strategien wie das LoRaWAN (Low Power Wide Area Network, <https://www.lora-wan.de/>) weltweit eine immer größere Bedeutung zukommt und die Vernetzung von Messdaten in Zukunft immer mehr erleichtert wird. Mit der Umsetzung des Teilvorhabens wurde dieser rasanten Entwicklung Rechnung getragen und ein Beitrag dazu geleistet, dass innovative Dammmonitoringkonzepte auf Basis neuester Technologien zukünftig potenziell einfacher umgesetzt werden können. Thermische Risse im Zusammenhang mit saisonalen Temperaturschwankungen an Bogenstaumauern werden in Malm et al. (2020) näher erläutert. Potenzielle Risiken und Gefahren solcher thermisch induzierten Spannungen wurden dort zusätzlich mithilfe von numerischen Modellierungen herausgearbeitet.

Faseroptische Temperaturmessungen im Rahmen von Dammüberwachungen (Leckage und thermischer Stress) sind Stand der Technik (siehe z. B. Aufleger 2007, Zhou et al. 2019 etc.). Zusätzliche systematische flächenhafte Wärmebild- und Temperaturerfassungen sind nach unserem Kenntnisstand jedoch nicht Stand der Technik.

### **2.3 Ablauf des Vorhabens**

Im Teilvorhaben des EIFER lag der Fokus vor allem auf der gezielten Weiterentwicklung und Stabilisierung des Multi-Sensor-Netzwerks und der dazugehörigen Datenplattform. Für die georgischen Partner wurden Datenserver aufgebaut. Es wurden neue Umweltsensoren entwickelt und

am Damm sowie in dessen Umfeld installiert. Neben den Messungen an der Dammoberfläche wurden neue Messmodule installiert, die die Messung einfacher Temperaturprofile im Damm ermöglichen. Zudem wurden zwei einfache Wetterstationen installiert sowie eine einfache Wärmebildkameralösung entwickelt und dauerhaft installiert. Die Entwicklung eines Abstandssensors ist insbesondere für die Interpretation der Messungen mit dem bodengestützten Ku-Band-Radarsystem (GB-SAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar), Projektpartner KIT-IPF) von Bedeutung. Der Projektpartner KIT-AGW hat einen Tracerversuch durchgeführt, der durch Leitfähigkeitsmessungen mit eigens dafür vom EIFER entwickelten Messmodulen unterstützt wurde.

Mit Hilfe mehrerer Schulungen und Workshops wurden die georgischen Partner in die Lage versetzt, alle notwendigen Messgeräte selbstständig zu bedienen und neue Messmodule in das Multisensor-Netzwerk zu integrieren.

## **2.4 Wesentliche Ergebnisse**

Gezielte Verbesserungen am bestehenden Multisensornetzwerk ermöglichen durch ein verbessertes Hard- und Softwarekonzept eine längere Batterielaufzeit der einzelnen Module, die nun bis >10-Jahre ohne Batteriewechsel betrieben werden können. Dadurch stehen nunmehr kostengünstige vernetzbare Multisensornetzwerke zur Verfügung, die insbesondere für große Infrastrukturprojekte und risikobehaftete Projekte (nicht nur Dämme) nützlich sein könnten. Durch die Installation weiterer Umweltsensoren und Wetterstationen können die meteorologischen Einflüsse auf die Dammkonstruktion und die geodätischen Messungen nun besser bewertet werden. Zudem wurde eine innovative Wärmebildkamera entwickelt, die eine einfache und dauerhafte Temperaturüberwachung der Dammoberfläche und des Dammumfeldes ermöglicht. Um das hydraulische System am Enguri-Damm an spezifischen Stellen bewerten zu können, wurde das Sensornetzwerk um eine Pegel- und eine Leitfähigkeitsmessung ergänzt. Darüber hinaus wurde ein Prototyp auf Basis einer einfachen Funkantennenlösung entwickelt. Dieser kann mit einer geeigneten Messfrequenz zur Distanzmessung eingesetzt werden. Die Datenplattform sowie die Integration neuer Sensoren durch die Entwicklung einfacher Routinen wurden gezielt verbessert. Zudem wurde eine Spiegelung der Plattform auf lokale Server ermöglicht. Dabei wird die Cloud-Plattform vom EIFER betrieben und auf einen Server am Enguri-Damm gespiegelt. Das Ziel bestand darin, dass das Multisensornetzwerk auch nach Ende der DAMAST-Projektzyklen ohne deutsche Partner (z. B. GTU, TSU) betrieben werden kann. Deshalb wurden Schulungen zur Integration eigener Sensoren mit georgischen Partnern durchgeführt.

Faseroptische Messungen am Damm konnten nicht durchgeführt werden, da der Staudammbetreiber Engurhesi die Verlegung und Installation des Glasfaserkabels nicht durchgeführt hat (großer Aufwand, der nicht im Projektbudget berücksichtigt wurde).

Leider konnten die geplanten Flüge mit der Drohne mit integrierter Wärmebildkamera aufgrund des Ukraine Krieges (erschwerter Einreisebedingungen, etc.) und der Grenznähe zur Russland (Drohne kann zum Aufspüren von Menschen eingesetzt werden) nicht durchgeführt werden. Es wurden aber Flugschulungen und Vorbereitung auf die Pilotenlizenz mit den georgischen Partner durchgeführt.

## **2.5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Die wesentliche Zusammenarbeit erfolgte mit dem Projektpartner KIT. Vor allem die Angewandte Geowissenschaften in der Person von Frau Dr. Müller (Verbundleiterin des Projektes) hat die wesentlichen Kontakte zu den georgischen Partnern geknüpft. Die wichtigsten georgischen Forschungs- und Entwicklungspartner für das EIFER sind der Dammbetreiber Engurhesi und die Georgian Technical University (GTU).

## **3 Teil II: Eingehende Darstellung (Multi-Sensor-Netzwerk)**

### **3.1 Stand der Wissenschaft und Technik**

Leitfäden und Leitlinien zur Dammüberwachung und –sicherheit werden von der International Commission on Large Dams (ICOLD) herausgegeben. Die Verwendung automatisierter Dammüberwachungssysteme wird in der Richtlinie ICOLD (2000) beschrieben und Empfehlungen zur seismischen Überwachung von Dämmen können den Leitfäden ICOLD (2011a, 2011b) und (2013) entnommen werden. Angepasste Monitoringstrategien für Dämme in tektonisch aktiven Gebieten werden dort aber nicht speziell behandelt. Ein automatisiertes dauerhaftes Monitoring mit Beschleunigungssensoren wurde bereits bei der 250m hohen Bogenstaumauer in Mauvoisin eingesetzt, wobei hier nur vier Messtellen verwendet wurden (Dabre & Proulx 2001). Kabellose vernetzte Vibrationssensoren zur zusätzlichen Dammüberwachung werden ebenso bereits eingesetzt und können z.B. bei Loh (2014) entnommen werden.

Datenbasierende Vorhersagemodelle zur Bewertung von Dämmen, bei denen auch einfach zu messende Parameter wie Temperaturen berücksichtigt werden, können Salazar et al, (2017) entnommen werden. Die Vernetzung und Kopplung von Monitordaten mit webbasierenden Rechnungstools bieten immer mehr Möglichkeiten zu Risikoabschätzung von Dämmen (z.B. Stasch et al, 2017).

Kabellose vernetzte Multisensorschwarmsysteme werden derzeit nach unserem Kenntnisstand wohl nur am Enguri-Damm (im laufenden DAMAST Projekt) zusätzlich zur Dammüberwachung eingesetzt. Tatsache ist, dass kabellose Vernetzungstools und -strategien weltweit eine immer größere Bedeutung zukommen, wie z.B. das LoRaWAN (Low Power Wide Area Network, <https://www.lorawan.de/>) und damit die Vernetzung von Messdaten in Zukunft immer mehr erleichtert werden wird. Mit der weiteren Umsetzung des Teilvorhabens wird dieser rasanten Entwicklung weiter Rechnung getragen und ein Beitrag dazu geleistet, dass basierend auf neuesten Technologien innovative Dammmonitoringkonzepte zukünftig potentiell einfacher umgesetzt werden können.

Thermische Risse im Zusammenhang mit saisonalen Temperaturschwankungen an Bogenstaumauern werden in Malm et al. (2020) näher erläutert. Potentielle Risiken und Gefahren solcher thermisch induzierten Spannungen sind dort zusätzlich mit numerischen Modellierungen herausgearbeitet worden.

Faseroptische Temperaturmessungen im Rahmen von Dammüberwachungen (Leckage, thermischer Stress sind Stand der Technik (z.B. Aufleger 2007, Zhou et al. 2019, etc.). Drohnenbefliegungen in Kombination mit systematischen flächenhaften Wärmebild- und Temperaturerfassungen gibt es nach unserem Kenntnisstand keine.

### **3.2 Qualifizierung**

Im Rahmen des Projekts führte der EIFER gezielte Qualifizierungsmaßnahmen für die georgischen Partner durch. Diese wurden im Wesentlichen vom Projektpartner KIT geplant und organisiert.

### **3.3 Aufbau eines Multisensoren-Netzwerks an der Staumauer**

Das Multisensoren-Netzwerk an der Staumauer ist das erste seiner Art in Georgien. Es ermöglicht einen direkten Datentransfer und -austausch und wurde im Rahmen des Projekts weiter ausgebaut.

Die bestehende Datenplattform (<https://thingsboard.cloud/home>, siehe Abb. 1) wurde systematisch erweitert, um Benutzerroutinen bereitzustellen, die eine einfachere Integration neuer Sensoren ermöglichen. Die Plattform ist nun so aufgebaut, dass verschiedene individuelle Nutzerrechte

vergeben werden können: einfache Nutzer mit eingeschränkten Zugängen und Rechten sowie Nutzer, die z. B. zusätzliche eigene Sensoren integrieren können.

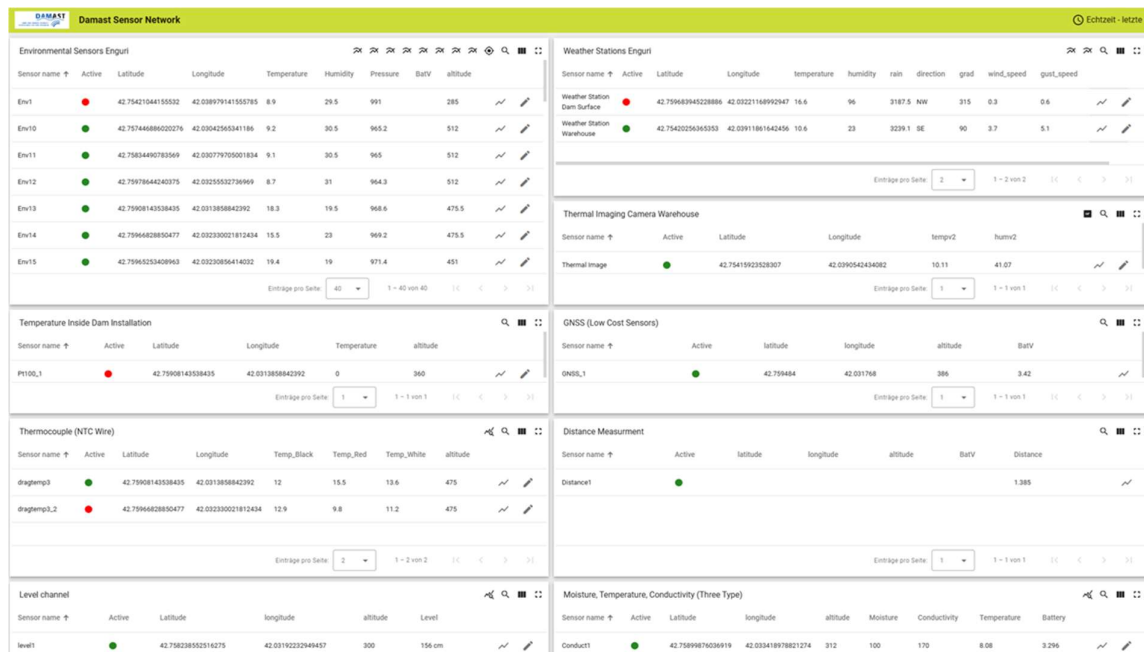


Abb. 1: DAMAST-Dashboard zur Visualisierung und Datenpflege des Multi-Sensor-Netzwerks (Zugang zum Dashboard kann bei Nachfrage bei EIFER gewährt werden).

Für die georgischen Partner hat es sich darüber hinaus als besonders sinnvoll erwiesen, dass einzelne Daten und Animationen einfach über eine Webseite (z.B. [https://damast-sensor.de/animation/index\\_thermal.php](https://damast-sensor.de/animation/index_thermal.php)) abgerufen werden können.

Um auch bei Ausfall einzelner Router oder Gateways (z. B. lokaler Stromausfall, nicht erreichbares Mobilfunknetz etc.) ein kontinuierliches Monitoring aufrechterhalten zu können, wurden zusätzliche Router (zwei Mobilfunk-Router) und Gateways (drei LoRaWAN-Gateways) in der Umgebung des Dammes installiert.

Das Multisensor-Netzwerk ist so ausgelegt, dass es mit minimalem Wartungsaufwand über mehrere Jahre hinweg betrieben werden kann. Aufgrund des autarken und modularen Aufbaus ist eine Übertragbarkeit auf andere Staudämme oder Anwendungen (Rutschungen, Landwirtschaft etc.) sehr einfach realisierbar.

Die Datenplattform sowie die Integration neuer Sensoren durch die Entwicklung einfacher Routinen wurden gezielt verbessert. Zudem wurde eine Spiegelung der Plattform auf lokale Server ermöglicht. Dabei wird die Cloud-Plattform vom EIFER betrieben und auf einen Server am Enguri-Damm gespiegelt. Das Ziel bestand darin, dass das Multisensor-Netzwerk auch nach Ende der DAMAST-Projektzyklen ohne deutsche Partner (z. B. GTU, TSU) betrieben werden kann. Deshalb wurden Schulungen zur Integration eigener Sensoren mit georgischen Partnern durchgeführt.

### 3.4 Einrichtung eines lokalen ausbaufähigen Stützpunkts

#### 3.4.1 Aufbau neuer Sensorik und Erweiterung

Am bestehenden Multisensornetzwerk wurden gezielte Verbesserungen vorgenommen. Bestehende Sensoren wurden mit einem nichtflüchtigen Speicher ausgestattet, sodass nun keine Datenverluste

mehr bei fehlender Funkverbindung (z. B. bei einem Stromausfall am Gateway) auftreten. Ein verbessertes Hard- und Softwarekonzept verlängert zudem die Batterielaufzeit der einzelnen Module, sodass diese nunmehr >10 Jahre (bei einem Messintervall von 10 Minuten) ohne Batteriewechsel betrieben werden können. (Abb. 2).

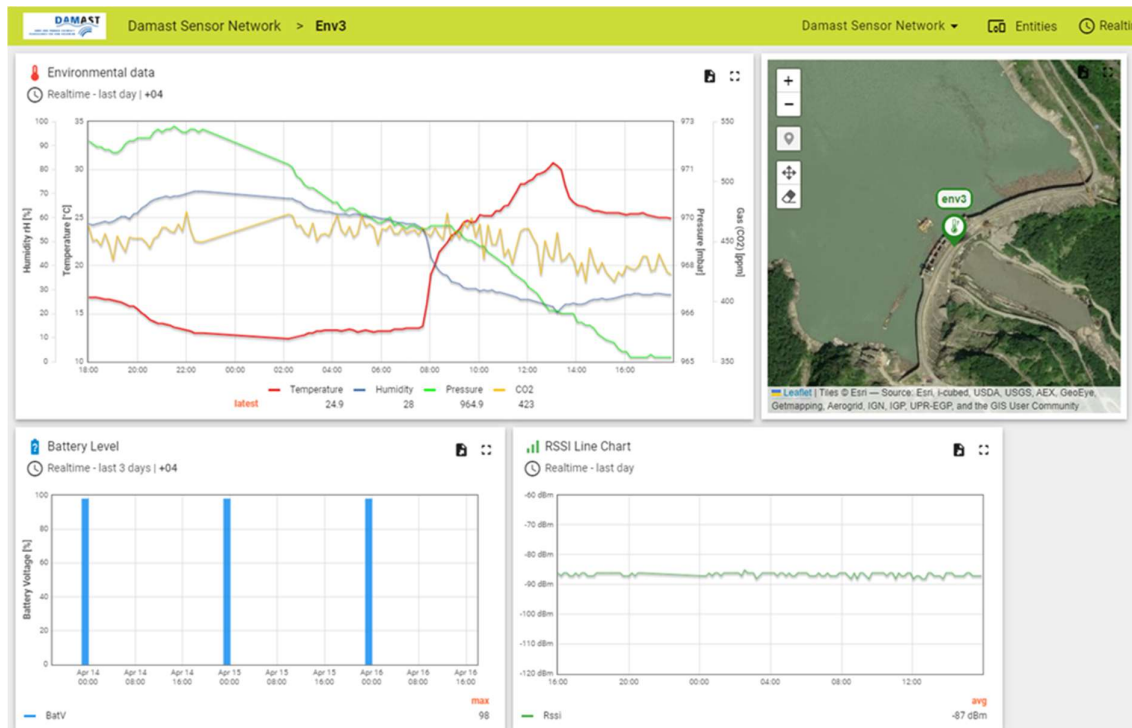


Abb. 2: Beispiel einer Messung einer mit dem Umweltsensor ENV4, open links: Messungen der Temperatur, Druck, Feuchtigkeit und CO<sub>2</sub> („Gas“), unten links: Batteriezustand sowie unten rechts: Verbindungsqualität.

Zum Messzeitpunkt waren beim Sensor Env4 beispielsweise noch 98 % der Batteriekapazität verfügbar. Bei vier Sensoren drang Feuchtigkeit in das Gehäuseinnere, sodass es zu teilweise fehlerhaften Messungen kam. Diese Probleme konnten durch den Einsatz neuer Dichtungen behoben werden. Somit lässt sich festhalten, dass die Langzeitstabilität der Sensoren eher durch Undichtigkeiten im Gehäuse beeinflusst wird und die Batterielaufzeit als unkritisch einzustufen ist. Derzeit senden 40 Umweltsensoren im Umfeld des Damms stabil Daten an die Plattform (Abb. 3).

Die Messdaten der Umweltsensoren dienen der Interpretation der Messungen mit dem bodengestützten Ku-Band-Radarsystem (GB-SAR) im Rahmen der geplanten Dissertation am KIT-IPF. Die Laufzeiten der Radarwellen werden durch die meteorologischen Bedingungen beeinflusst. Die Bewegungen der Staumauer hängen außerdem von der Temperatur sowie von den Wasserspiegelschwankungen im Stausee ab. So kann beispielsweise der Temperaturverlauf über einen bestimmten Zeitraum bewertet werden (Abb. 4). Anhand der Topografie und der Höhenunterschiede kann erkannt werden, dass große Temperaturschwankungen auftreten können. (Anmerkung: Auf der Plattform werden Animationen von Contourplots und Parameterverläufen in Bezug auf die Höhe für alle Messparameter zur Verfügung gestellt.) Mithilfe dieser Messungen können Wettereinflüsse auf Radarmessungen (GB-SAR, Einfluss auf Wellengeschwindigkeiten etc.) bewertet werden.

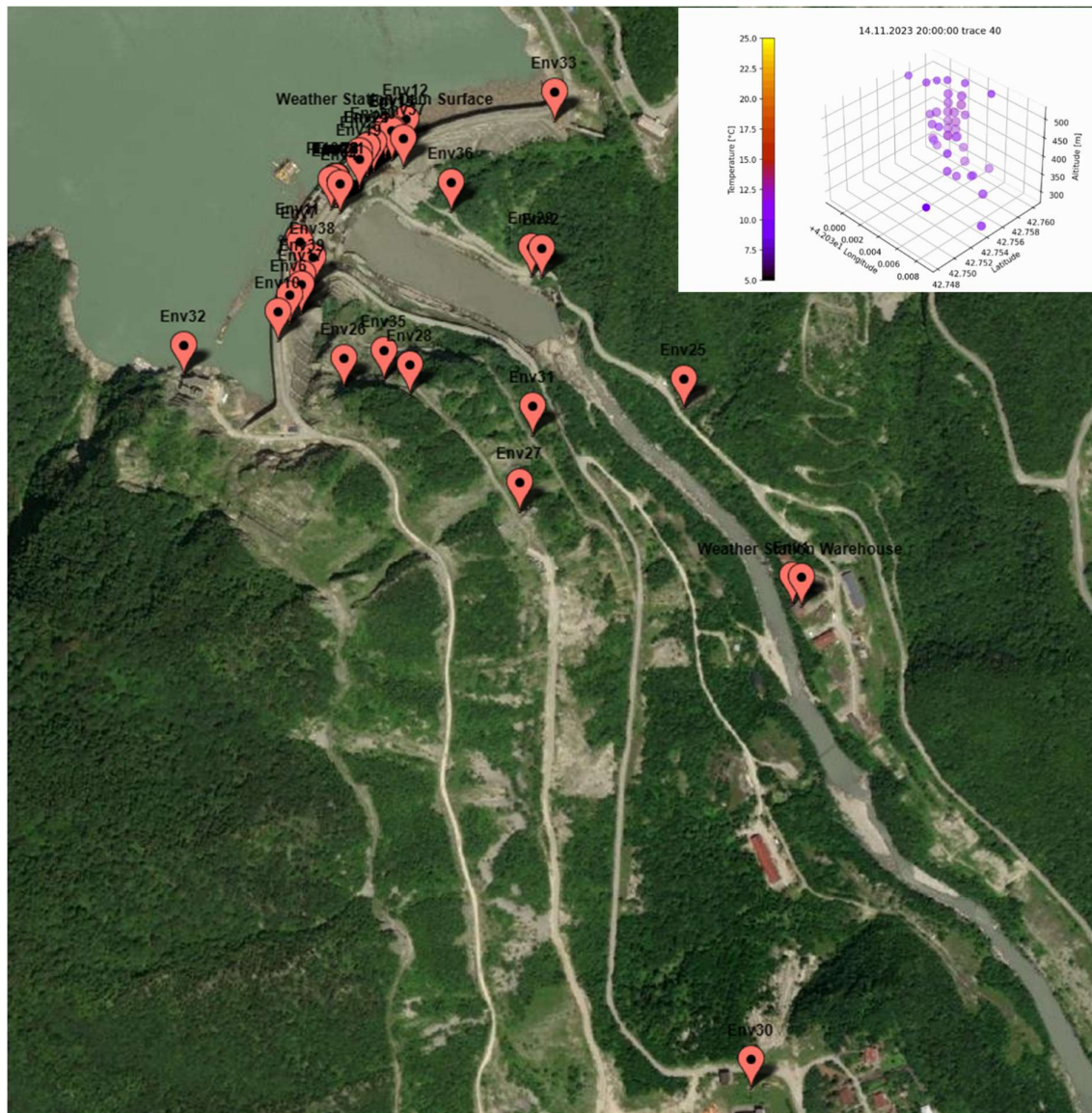


Abb. 3: Übersicht über die installierten Umweltsensoren am Enguri-Staudamm, rechts oben kann die Raumlage der Umweltsensoren entnommen werden.

Um zusätzlich Niederschläge und Windparameter aufzeichnen zu können, wurden die Umweltsensoren durch die Installation von zwei einfachen Wetterstationen ergänzt. Dabei kam eine Lösung von Tinkerforge (Typ WS-6147, abrufbar unter: <https://www.tinkerforge.com/de>) zum Einsatz. Als Gateway kommt ein Raspberry Pi zum Einsatz, die Datentransfer- und Steuerung erfolgt mithilfe eines Python-Skripts. Der Vorteil dieser Lösung besteht darin, dass bis zu 254 individuelle Wetterstationen an ein Gateway angesteuert werden können.

Die Daten werden permanent aufgezeichnet und mit offiziellen Wetterdaten (OpenWeather Data, <https://openweathermap.org/>) verglichen. (Abb. 5).

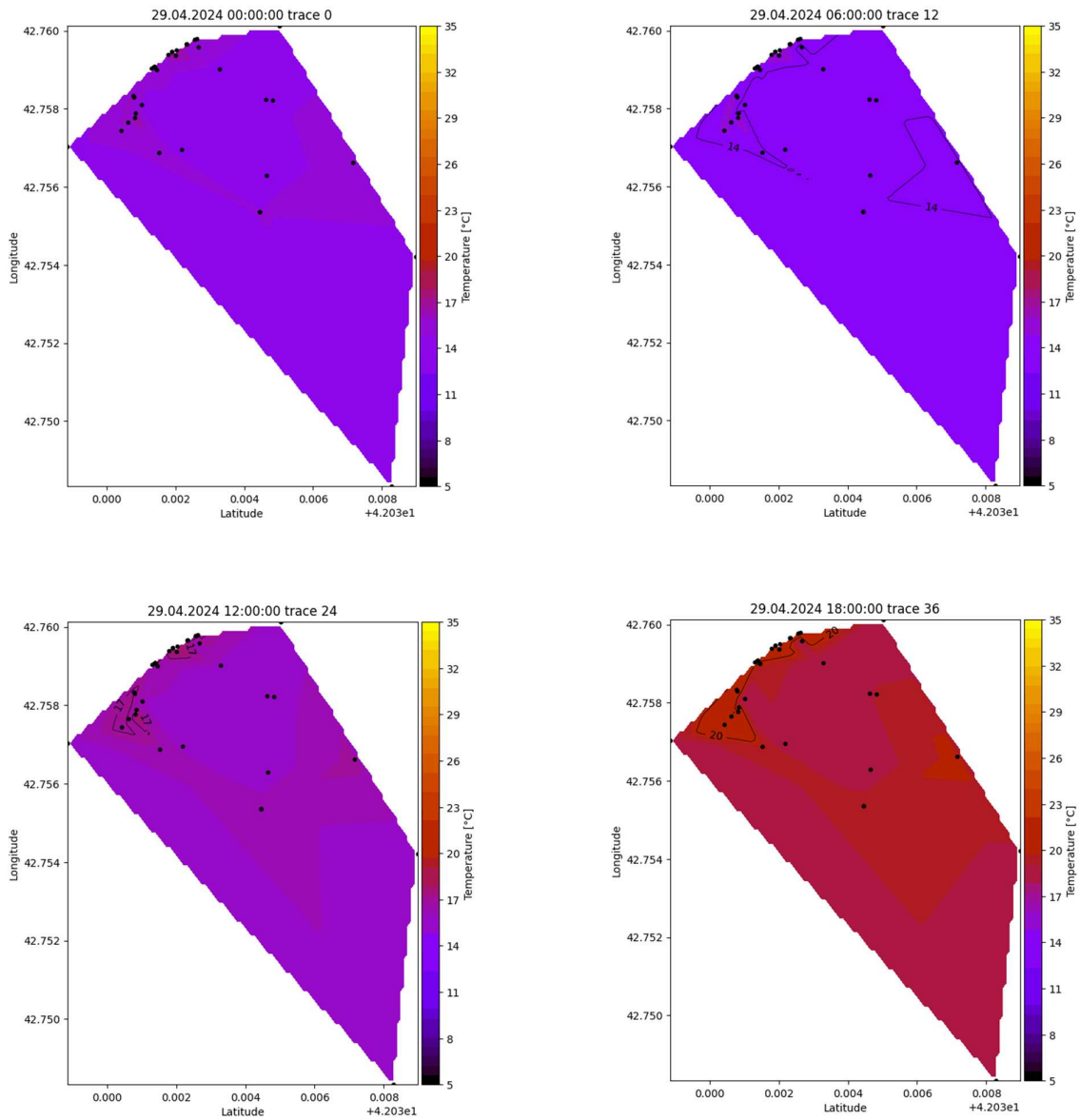


Abb. 4: Interpolierte Temperaturverteilung für einen Tag am Enguri-Damm anhand der Messdaten aus den Umweltsensoren.

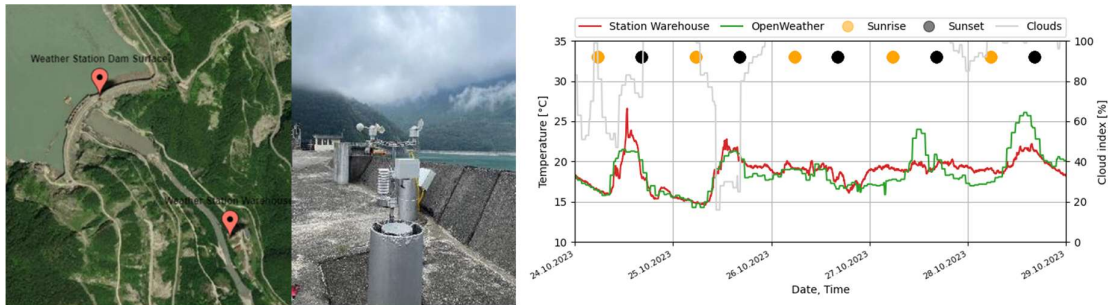


Abb. 5: Lage der Wetterstationen (links), Wetterstation an der Dammoberfläche (Mitte), Vergleich mit offiziellen Wetterdaten (rechts).

Insgesamt werden bei allen Balkonen und zugänglichen Ebenen die physikalischen Parameter aufgezeichnet (Abb. 6, Abb. 7 und Abb. 8).

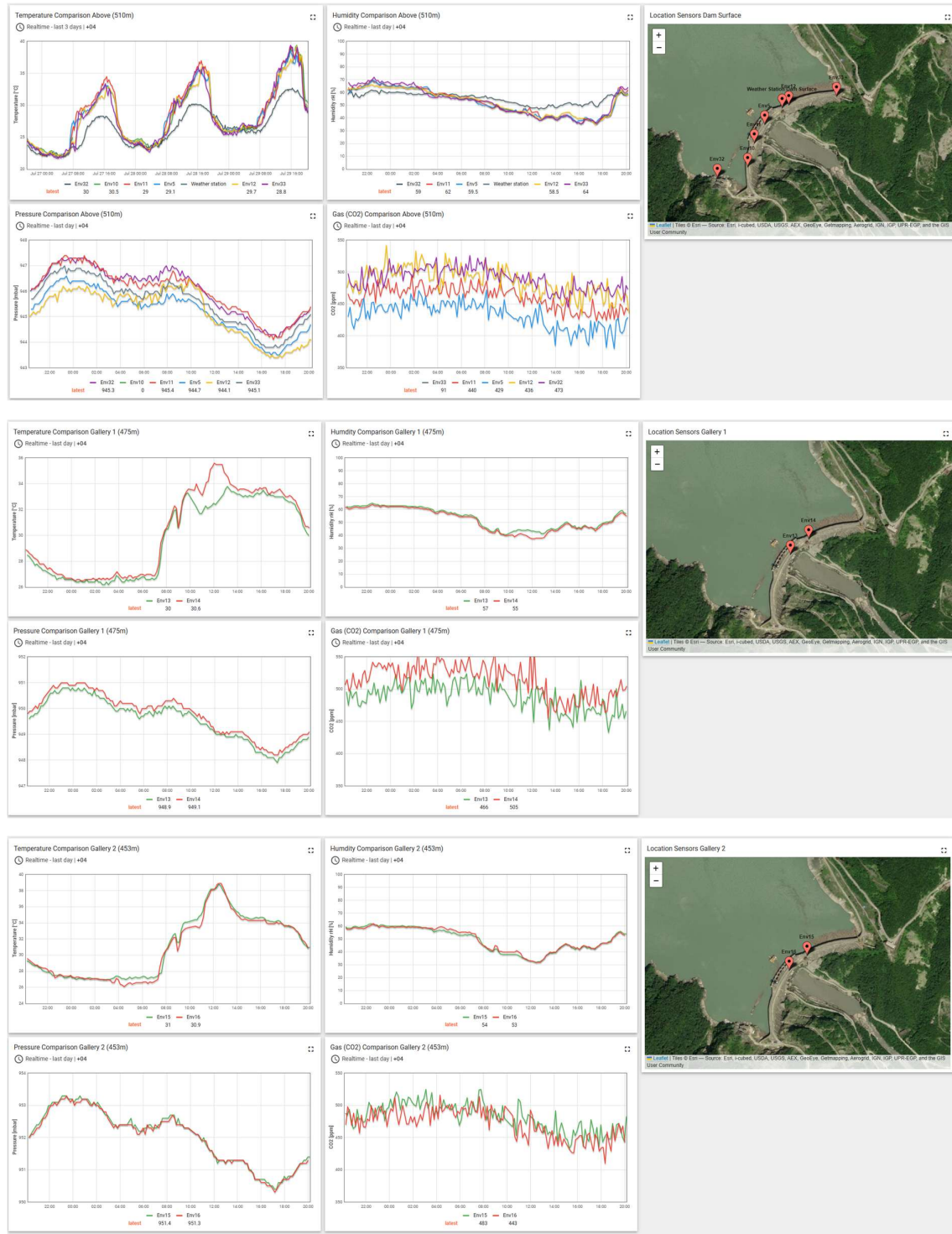


Abb. 6: Umweltsensormessungen, oben: an der Dammoberfläche (~510m), Mitte: Galerie 1 (~475m), unten: Galerie 2 (~453m).

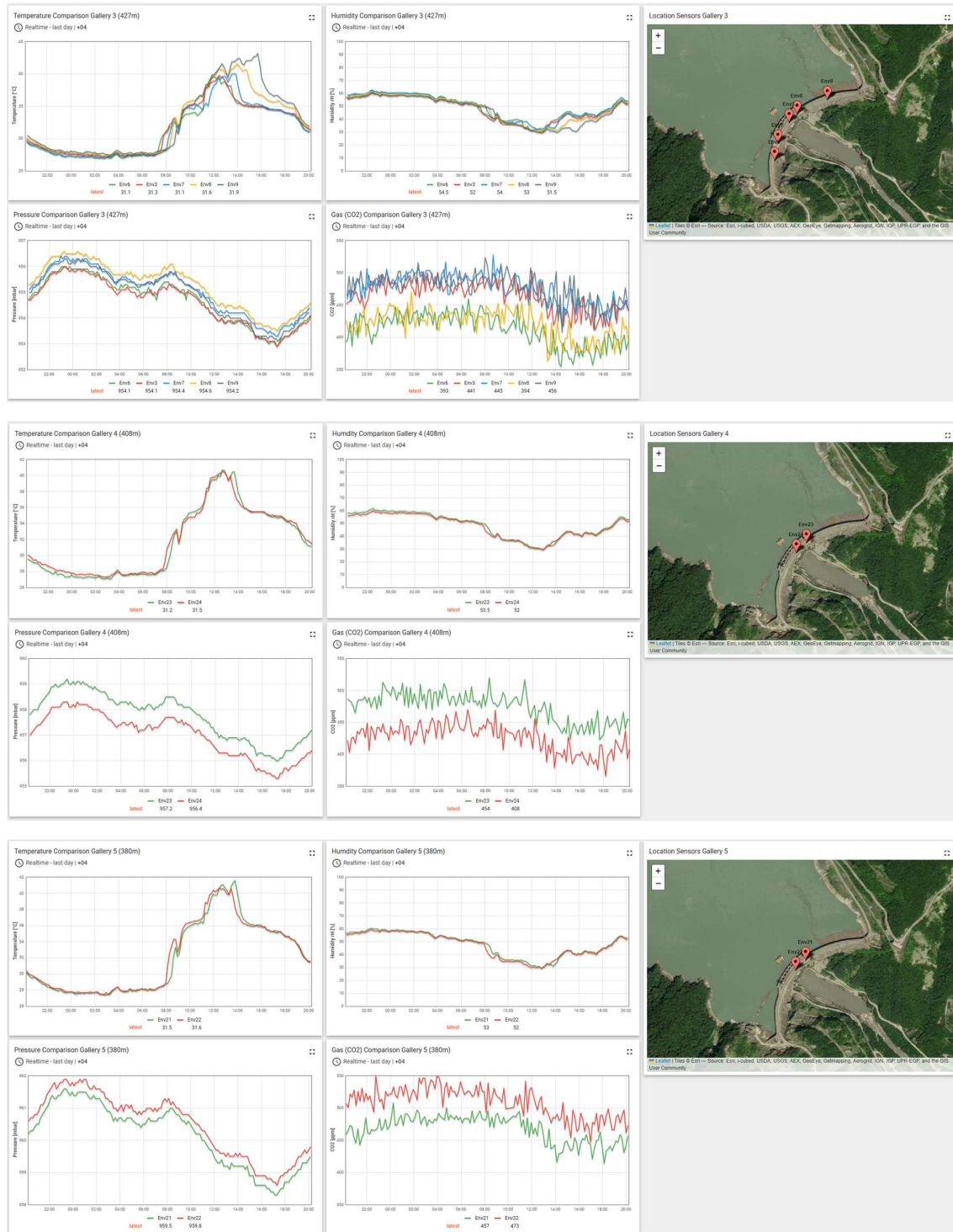


Abb. 7: Umweltsensormessungen, oben: Galerie 3 (~427m), Mitte: Galerie 4 (~408m), unten: Galerie 5 (~380m).

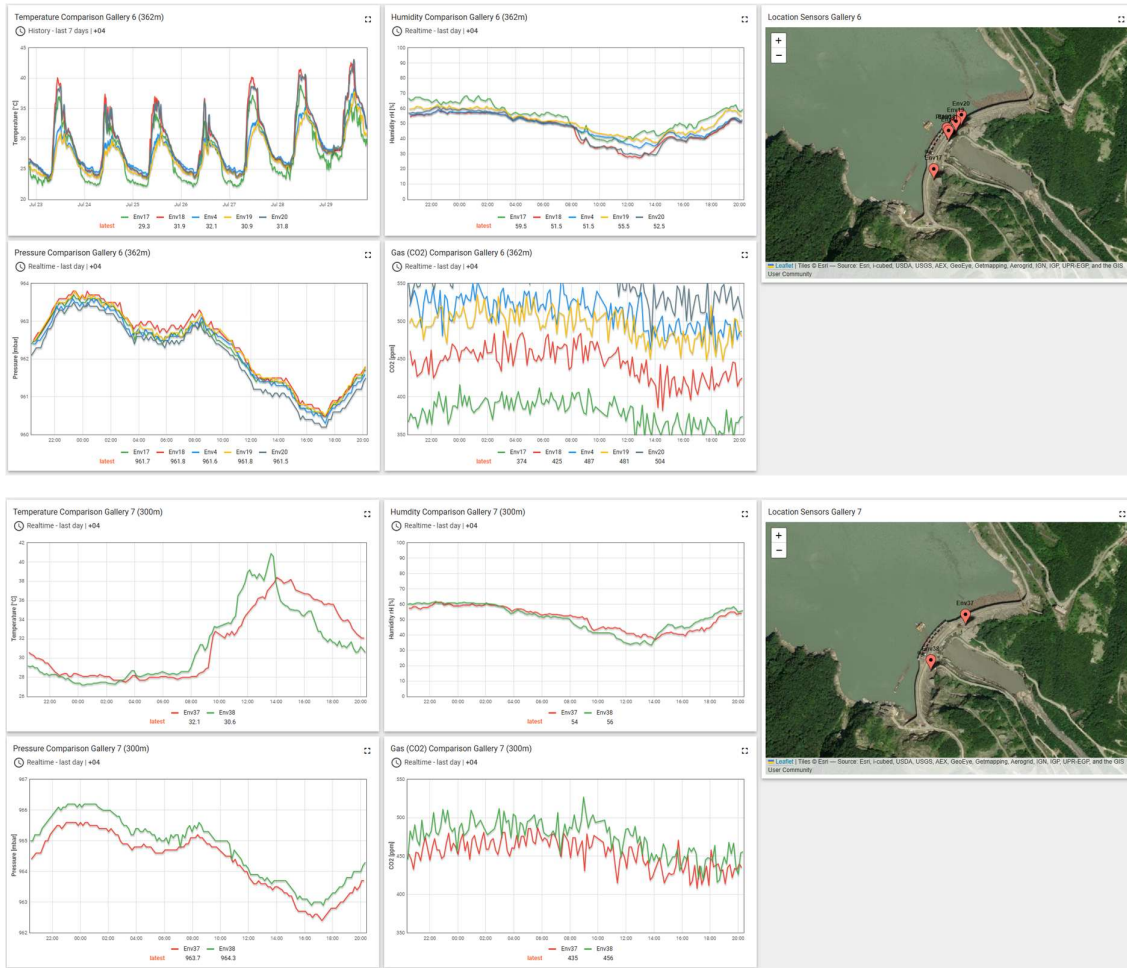


Abb. 8: Umweltsensormessungen, oben: Galerie 6 (~362m), Mitte: Galerie 4 (~475m), unten: Galerie 7 (~300m).

Zwar lassen sich mithilfe von Umweltsensoren und Wetterstationen Indizien für thermisch induzierte Bewegungen am Dammbewegungen ableiten, jedoch keine fundierten theoretischen Kalkulationen durchführen. Insbesondere die ersten Zentimeter der Dammoberfläche sind starken thermischen Einflüssen ausgesetzt. Deshalb wurde in einer Tiefe von 20 cm ein PT-100-Temperatursensor (LoRaWAN) installiert, um dauerhaft Messungen aufzuzeichnen. (Abb. 9).

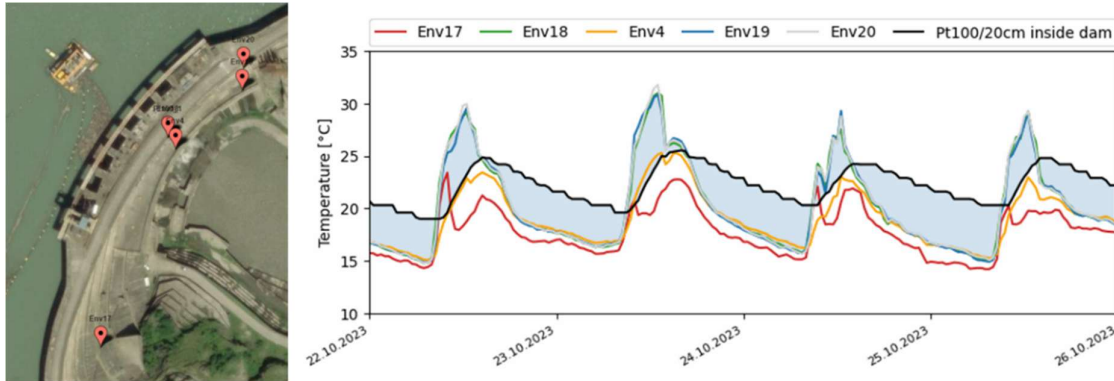


Abb. 9: Vergleich der Messungen an der Dammoberfläche (Ebene 3) mit dem Temperatursensor im 20cm Tiefe, (links: Lage der Messpunkte).

Entsprechend ihrer thermophysikalischen Eigenschaften (Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit) reagieren die Temperaturen im Damminnenen zeitverzögert und mit geringerer Amplitude auf wetterbedingte Temperaturschwankungen.

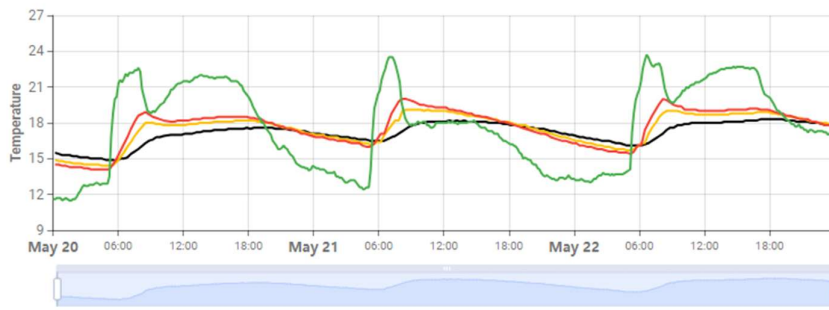
Mit nur einer Messtiefe ist eine Interpretation des Temperaturverlaufs jedoch nur eingeschränkt möglich. Deshalb wurden zwei weitere Messmodule installiert, die eine Messung in drei unterschiedlichen Tiefen ermöglichen. (Abb. 10). Entsprechend der Installationstiefe reagieren die Messpunkte. Bei den tiefsten Messpunkten werden geringere Temperaturamplituden und zeitverzögerte Temperaturreaktionen gemessen, während näher an der Oberfläche die Reaktion schneller erfolgt und größere Temperaturschwankungen gemessen werden.

Insgesamt sind jedoch die Anzahl und die Raumlage der Messpunkte nicht ausreichend, um fundierte theoretische Berechnungen des Temperatureinflusses auf die Bewegung des Damms durchführen zu können. Deshalb wurde gemeinsam mit der GTU ein Messkonzept zur Verifizierung der thermisch induzierten Bewegungen entwickelt. Zudem sind die gemessenen Temperaturen lateral teilweise sehr unterschiedlich, was die Interpretation der Messdaten erschwert.

Daher sollen LoraWAN-taugliche Temperaturmessketten im Abstrom des Enguri-Dammes installiert werden. (Abb. 11). Damit könnten die wenig beeinflussten Temperaturbereiche im Dammbereich ermittelt werden. Somit könnten gefährliche, thermisch induzierte Bewegungen besser vorhergesagt und die Eingangsdaten für komplexe Modellierungen verbessert werden.

### Compare depth Drag\_TempT1

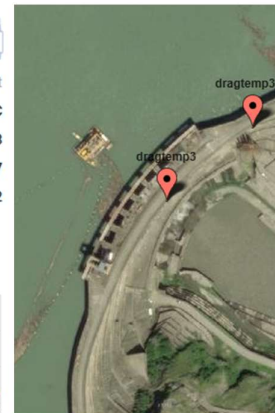
History - from 2025-05-20 00:00:00 to 2025-05-23 00:00:00



- 20cm
- 12,8cm
- 9,8cm
- 0cm (Env13)

Latest

- 18 °C
- 17.8
- 17.7
- 17.2



### Compare depth Drag\_Temp2

History - from 2025-05-20 00:00:00 to 2025-05-23 00:00:00



- 20,5cm
- 13cm
- 9,9cm
- 0cm (Env14)

Latest

- 18.8
- 19
- 19 °C
- 17.4

Abb. 10: Messung der tiefenorientierten Temperaturen im Damminnern im Vergleich zu den gemessenen Oberflächentemperaturen.

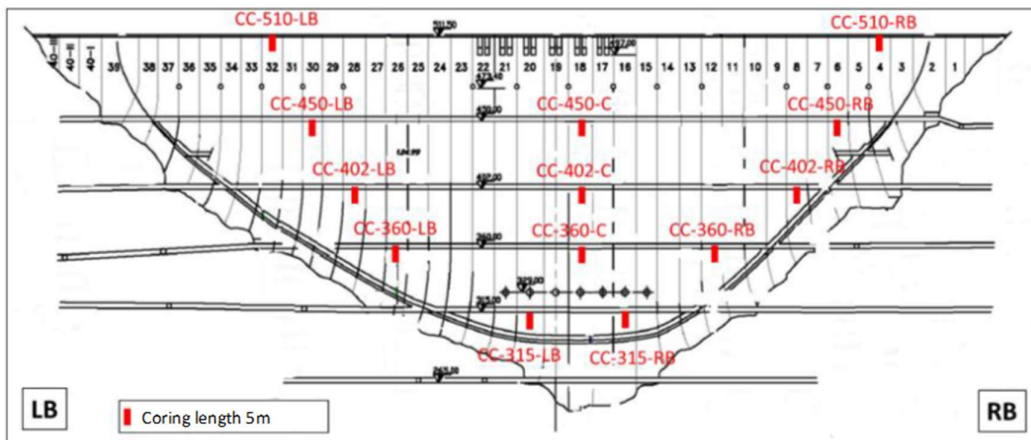


Abb. 11: Mögliche Standorte für die Installation der Messketten auf der stromabwärts gelegenen Seite des Damms (22 Messpunkte sind vorgeschlagen, in Zusammenarbeit mit Prof. Mirian Kalabegishvili, GTU).

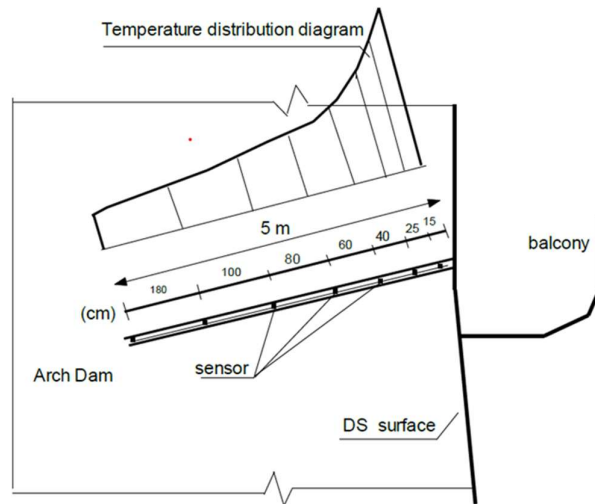


Abb. 12: Vorgeschlagene Aufbau der Temperaturmessketten.

Da an der Staumauer bereits seit ein LoraWAN-Netzwerk erfolgreich installiert und betrieben wird, ist der Einsatz von LoraWAN Messketten sinnvoll,

- stabile und sichere Datenübertragung über LoraWAN zur Multisensorplattform.
- alle laufenden Module mit einer Batterie ausgestattet sind (Lebensdauer > 5 Jahre).
- kein Stromanschluss erforderlich ist (sehr einfach zu bedienen und zu installieren).
- Sehr schnelle Lösung (keine weiteren Kabelverbindungen, Kalibrierung usw.)

Im Bereich der faseroptischen Temperaturmessungen wurden dem Dammbetreiber verschiedene Kabel zur Verfügung gestellt. Leider erfolgte im Projektzeitraum keine Installation der Kabel durch den Dammbetreiber. Es fanden Schulungen zur Messtechnik (verschiedene Glasfaser- sowie Spleißmesstechnik) mit den georgischen Partnern in Deutschland statt.

Im Rahmen des Projekts wurden auch innovative Messtechniken erprobt, die das Dammmonitoring sinnvoll ergänzen sollen. So wurde beispielsweise eine kostengünstige Wärmebildkamera-Lösung auf Basis des Raspberry Pi entwickelt und installiert. (Abb. 13, [https://damast-sensor.de/animation/index\\_thermal.php](https://damast-sensor.de/animation/index_thermal.php)). Die Wärmebilder werden im Minutentakt an die Datenplattform übermittelt, um die Interpretation der bodengestützten Ku-Band-Radarsysteme (GB-SAR, KIT-IPF) zu unterstützen.

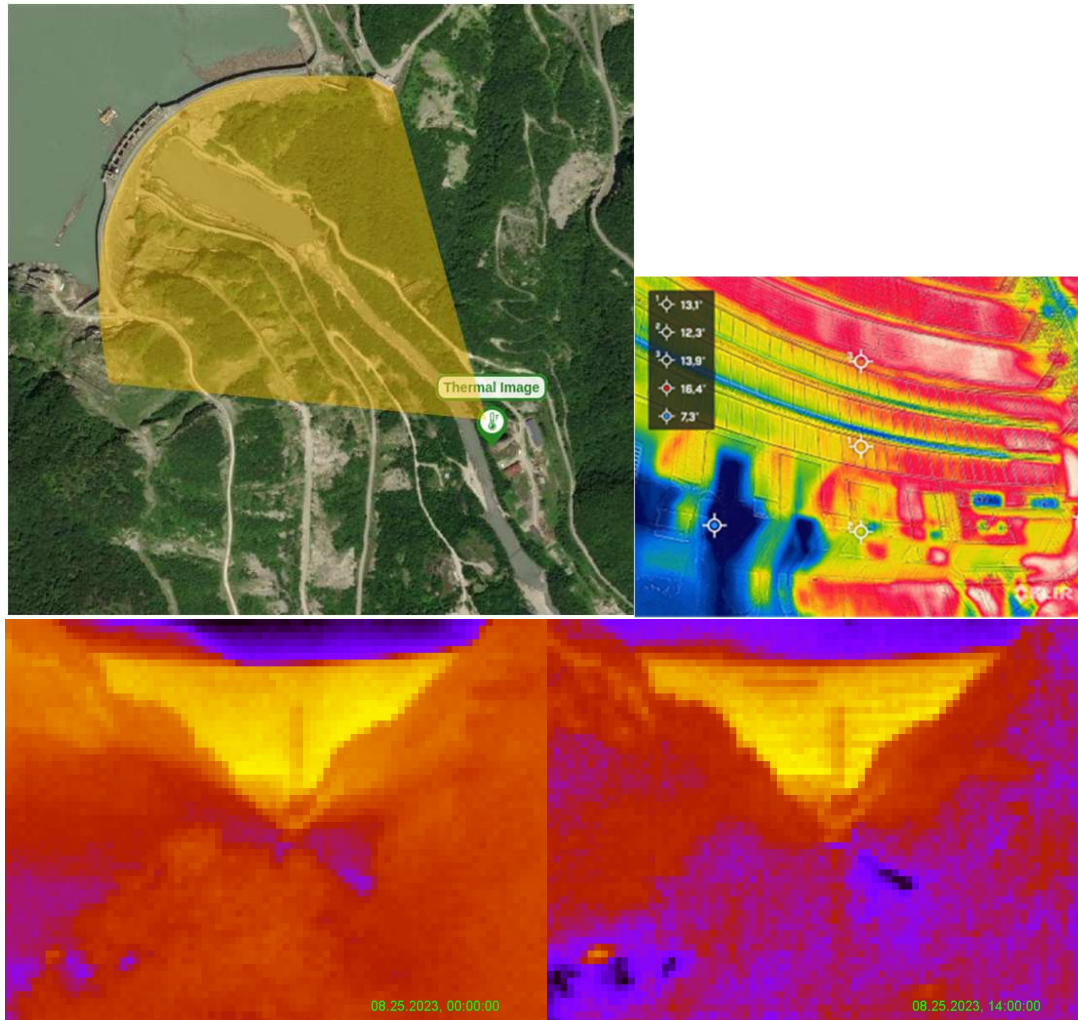


Abb. 13: Wärmebilder zu unterschiedlichen Tageszeiten (unten). Zu erkennen sind die erheblich höheren Temperaturen an der Dammoberfläche im Vergleich zur Umgebungstemperatur. Blickfeld der Kamera. Rechts oben: Detailbild mit dem System an einer anderen Stelle des Dammes zu Testzwecken. Für eine permanente Messung mit größerer Auflösung ist eine Raspberry-PI-Lösung aufgrund des Speicherbedarfs nicht umsetzbar.

Im Rahmen des Dammbetriebs stellt sich die Frage nach der allgemeinen Wasserbilanz. Um problematische Hauptabflüsse identifizieren zu können, erscheint die Installation eines permanenten geochemischen Monitorings generell sinnvoll. EIFER hat daher eine kostengünstige Messtechnik in Form von acht elektrischen Leitfähigkeitsmessmodulen für die Drainagetunnel entwickelt und installiert (Abb. 14). Dabei zeigte sich, dass für neue Messkampagnen mit Salztracer empfindlichere Messelektroden oder höhere Salzfrachten sinnvoll wären.

Deshalb wurde ein weiterer LoraWAN Prototyp installiert und getestet, der prinzipiell eine Auflösung von  $1 \mu\text{S}/\text{cm}$  haben sollte (temperaturkompensiert). Der Sensor wurde erfolgreich installiert und hat bis zum offiziellen Ende des Projektes Daten in hoher Qualität aufgezeichnet (Abb. 15). Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten entsprechen der gewünschten Auflösung. Die elektrische Leitfähigkeit steigt an, wenn an der Wetterstation signifikante Niederschläge an der Oberfläche

gemessen werden. Im Zuge des Niederschlags fällt auch die Temperatur. Dadurch lässt sich festhalten, dass sehr schnelle hydraulische Durchbrüche am Messpunkt festgestellt werden konnten.

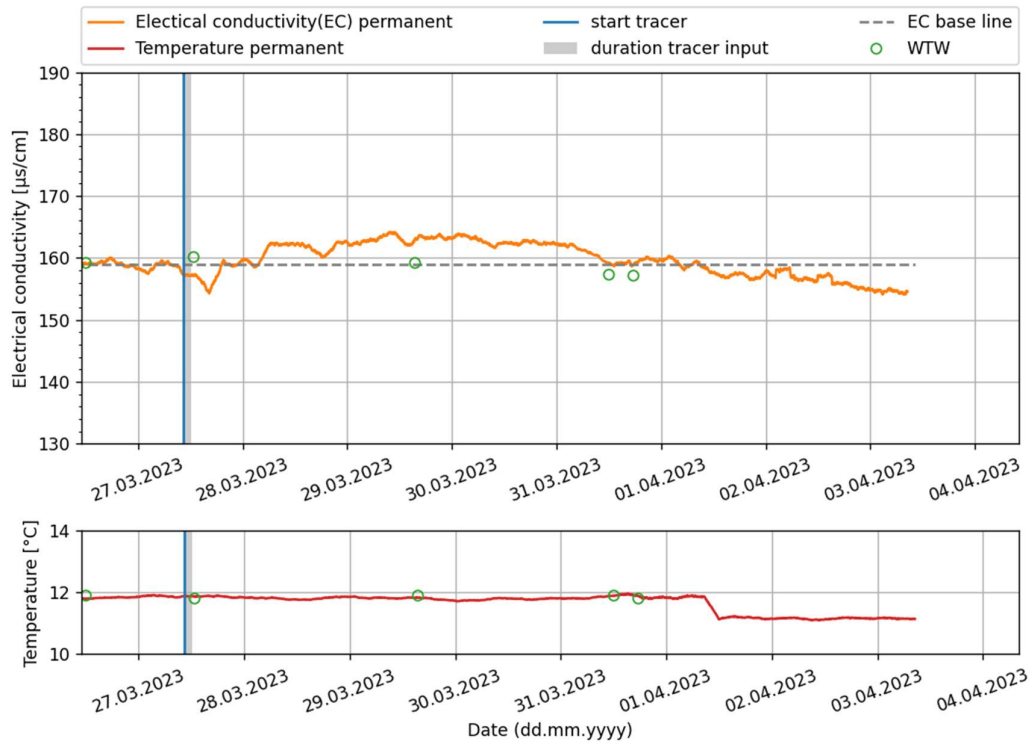


Abb. 14: elektrische Leitfähigkeitsmessung im Drainagetunnel LG4. Leichter Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit nach Tracerzugabe (NaCl) ist erkennbar. Der Temperaturabfall gegen Ende ist meteorologisch bedingt.

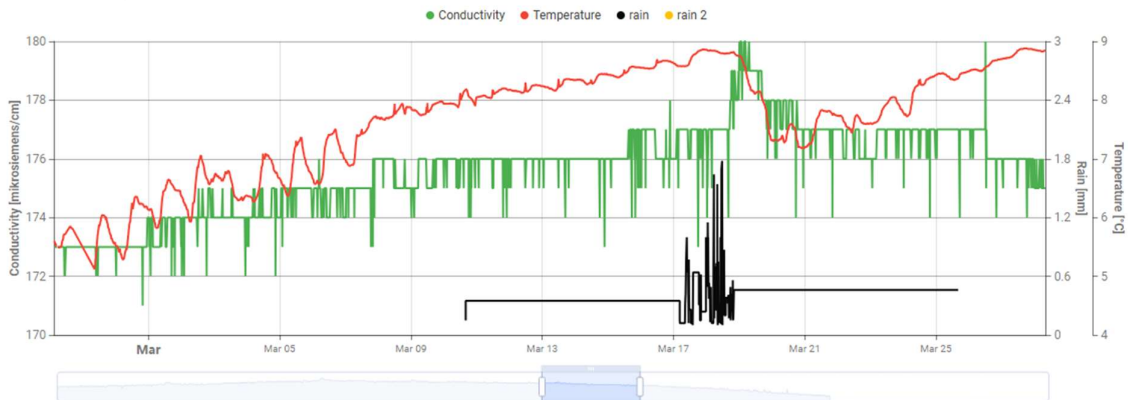


Abb. 15: dauerhafte elektrische Leitfähigkeitsmessung mit einem LoraWAN Prototyp im Bereich des Tunnel 5 (Randbereich Damm).

Die Messungen zeigen, dass thermische Messungen oder thermisch induzierte Tracer eine bessere Bewertung des hydraulischen Dammverhaltens ermöglichen (Abb. 15).

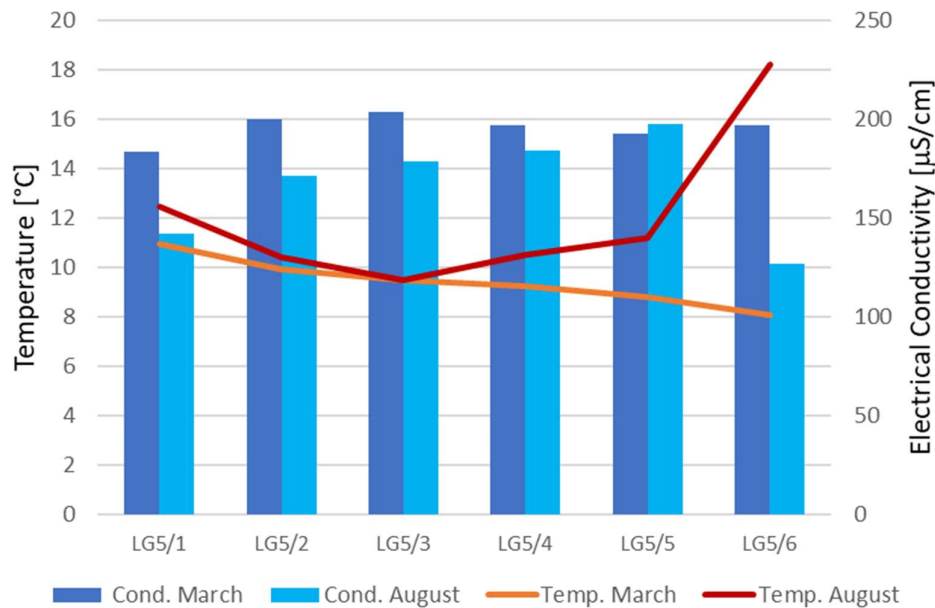


Abb. 16: elektrische Leitfähigkeitsmessung im Tunnel 5 mit Handmessungen und Messungen mit den ersten Prototypen (weniger sensitiv, Mittelwerte).

Die Messungen am Messpunkt LG5/6 zeigen, dass hohe Temperaturen mit niedrigen elektrischen Leitfähigkeiten korrespondieren. An dieser Stelle scheint ein größerer Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf die Messungen wahrscheinlich. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Installation permanenter Sensorik sinnvoll erscheint, um das hydraulische Verhalten besser bewerten zu können. Neben elektrischen Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen würden sich zudem zukünftig permanente Installationen elektronischer Drucksensoren sowie die Verwendung von Trübesensoren anbieten. Eine Pegelsonde desselben Prototyps wie die Leitfähigkeitssonde wurde in einem Brunnen installiert. Die Auswertung der Messungen erfolgt durch die GTU (bei Interesse kann nach Nachfrage ein temporärer Zugang zu allen Sensordaten über die Plattform erstellt werden.)

Darüber hinaus wurde ein Prototyp auf Basis einer einfachen Funkantennenlösung entwickelt. Dieser kann mit einer geeigneten Messfrequenz zur Distanzmessung eingesetzt werden. Die Distanzmessung soll die Interpretation der Radarmessungen an der Staumauer unterstützen, da die elektromagnetischen Wellengeschwindigkeiten gewissen witterungsbedingten Einflüssen unterliegen. Das Messmodul wurde auf einem Balkon installiert, um erste Distanzmessungen durchzuführen. Es zeigte sich, dass die Distanzmessung nicht mit den meteorologischen Bedingungen korreliert. Die erforderliche Genauigkeit wurde mit dem ersten Prototypen jedoch noch nicht erreicht. Gezielte Weiterentwicklungen würden einen größeren Aufwand erfordern und waren im durchgeführten Projekt nicht mehr möglich. Ebenso wurde im Laufe des Projekts ein kostengünstiges GNSS-LoraWAN-Messmodul installiert und getestet. Auch hier konnten noch keine zufriedenstellenden Messergebnisse erzielt werden. Deshalb wird an dieser Stelle auf eine Darstellung verzichtet.

### **3.5 Datenmanagement**

In Zusammenarbeit mit dem KIT ist geplant, alle relevanten Messdaten einheitlich zu archivieren und zu veröffentlichen. Dazu sollen die Dienste KITOPEN und RADAR4KIT genutzt werden. Die publizierten Daten sollen einen persistenten Identifier (DOI) erhalten und sind damit international auffindbar. Die ersten Datenzusammenstellungen werden automatisch aus SQL-Datenbanken generiert. Das Multisensornetzwerk ist so konzipiert, dass auch lange nach Projektende weiterhin Messdaten produziert werden. Daher ist es denkbar, dass die Messdaten auch nach Projektende zyklisch automatisch über RADAR4KIT veröffentlicht werden.

Darüber hinaus wurden Routinen entwickelt, die auf dem Server automatisiert Datenverarbeitungen und umfangreiche Berechnungen durchführen, um den georgischen Partnern die Interpretation der Messdaten zu erleichtern.

### **3.6 Schlussfolgerung**

Im Rahmen des innovativen Projekts wurde ein kostengünstiges und modular erweiterbares Sensornetzwerk auf Basis von LoRaWAN und IEEE 802.11 entwickelt. Durch die Kombination dieser beiden Technologien können sowohl energieeffiziente Langstreckenübertragungen als auch hochfrequente, datenintensive Anwendungen zuverlässig abgedeckt werden. Die Architektur ermöglicht die Überwachung großer Flächen von mehreren Quadratkilometern und lässt sich flexibel erweitern, was sie ideal für langfristige Umwelt- und Infrastrukturprojekte macht.

Das System nutzt eine Vielzahl von Sensoren, um verschiedenste Umweltparameter zu erfassen. Dazu zählen Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Gasindex. Spezielle Sensoren, wie beispielsweise Temperatursensoren im Inneren des Enguri-Damms, ermöglichen die präzise Überwachung kritischer Infrastrukturen.

Entfernungssensoren, Wärmebildkameras und kompakte Wetterstationen liefern weitere Daten für eine umfassende Analyse. Auch ein Leitfähigkeitssensor für Tracer-Tests ist integriert, um beispielsweise Wasserbewegungen im Untergrund sichtbar zu machen. Die gesamte Datenerfassung ist auf Dauerbetrieb ausgelegt und stellt somit eine wirtschaftliche Lösung für permanente Messaufgaben dar.

Alle Sensordaten werden in Echtzeit über eine Open-Source-Plattform verarbeitet und visualisiert. Über die ThingsBoard Cloud steht ein interaktives Dashboard zur Verfügung, das die gesammelten Informationen übersichtlich darstellt, Datenflüsse animiert und die Integration zusätzlicher Komponenten, etwa für eine verteilte Temperaturmessung, vorbereitet. Perspektivisch ist auch die Integration von KI-Algorithmen vorgesehen, etwa zur automatisierten Mustererkennung oder Frühwarnung bei Anomalien.

### 3.7 Referenzen

- Darbre, G. R. & Proulx, J. (2002). SHORT COMMUNICATION: Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*; 31:475–480, DOI: 10.1002/eqe.118.
- ICOLD (2000). “Automated dam monitoring systems – guidelines and case histories.” Bulletin 118, Committee on Automated Dam Monitoring Systems, International Commission on Large Dams, Paris, France.
- ICOLD (2009). “Surveillance: basic elements in a ‘dam safety’ process.” Bulletin 138, Committee on Dam Surveillance, International Commission on Large Dams, Paris, France.
- ICOLD (2011a). “Seismic observation of dams – guidelines and case studies.” Bulletin 113, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams, Paris, France.
- ICOLD (2011b). “Reservoirs and seismicity – state of knowledge.” Bulletin 137, Committee on Seismic Aspects of Dam Design International Commission on Large Dams, Paris, France.
- Moyo, P., Bukenya, P. & Oosthuizen, C. (2016): FINITE ELEMENT MODEL VALIDATION AND LONGTERM MONITORING OF CONCRETE ARCH DAM USING AMBIENT VIBRATION MONITORING, Report to the Water Research Commission, Report Number 2244/1/16, ISBN 978-1-4312-0780-0
- Salazar, F., Morán, R., Toledo, M.Á. et al (2017): Data-Based Models for the Prediction of Dam Behaviour: A Review and Some Methodological Considerations. *Arch Computat. Methods Eng.* 24, 1–21 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11831-015-9157-9>.
- Stasch, C., Pross, B., Gräler, B., Malewski, C., Förster, C. & Jirka, S. (2017): Coupling sensor observation services and web processing services for online geoprocessing in water dam, *International Journal of Digital Earth*, [doi.org/10.1080/17538947.2017.1319977](https://doi.org/10.1080/17538947.2017.1319977).

## 4 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende Teil der Fördersumme von ca. 82 % wurde seitens des EIFER für Personalkosten aufgewendet. Für die Entwicklung des Multi-Sensornetzwerkes, der Drohne und der Glasfasermessgerätes (für Schulungen) waren Investitionen in Höhe von ca. 14 % notwendig, die weiterhin für Forschungsprojekte und in der Lehre eingesetzt werden. Reisekosten in Höhe von ca. 4 % wurden für Fahrten zu Besprechungen und Projekttreffen sowie Reisen nach Georgien benötigt. Die abgerechneten Projektkosten von EIFER sind in Tabelle 1 dargestellt. Es ist anzumerken, dass EIFER insgesamt vor allem mehr Personalressourcen benötigte und das Projekt daher überzeichnet war. (Die zusätzlichen Ausgaben wurden von EIFER selbst getragen).

Tabelle 1: Abgerechneten Projektkosten des EIFER.

Position		Kosten	Anteil
Personalausgaben	0812	192.168,17 €	73,22%
Personalausgaben	0817	22.810,54	8,69%
Dienstreisen	0846	10.639,36 €	4,05%
Investitionen	0850	36.851,93 €	14,04%
Gesamt		36.697,72€	100,00%
Förderquote		100 %	

## 5 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeiten

Die Arbeiten zur gezielten Erweiterung des Multi-Sensornetzwerks und der Datenplattform konnten planmäßig durchgeführt werden. Das Sensornetzwerk wurde mit neuen, verbesserten Umweltsensoren ausgestattet. Ältere Sensoren wurden mit einem nicht flüchtigen Speicher ausgestattet und an den entsprechenden Stellen wurden neue Gehäusedichtungen angebracht. Es konnten erfolgreich kostengünstige, dauerhafte Wärmebildkammermessungen der Dammoberfläche umgesetzt und weitere innovative Messtechniken entwickelt und getestet werden. Die Distanzmessungen mit einer einfachen Antennenlösung und die kostengünstigen GNSS-Module erreichten zwar nicht die erforderliche Genauigkeit, stellen aber eine gute Basis für Weiterentwicklungen dar. Im Laufe des Projekts konnte dagegen erfolgreich ein LoraWAN-Leitfähigkeitssensor entwickelt werden, der dauerhafte, exakte Messungen mit hervorragender Auflösung ermöglicht. Zudem wurde eine Pegelsonde des gleichen Prototyps in einem Brunnen installiert.

Zu allen Messsystemen – dem Multi-Sensornetzwerk, der Glasfasermesstechnik und der Drohne – konnten Schulungen und Workshops mit georgischen Partnern durchgeführt werden.

Leider konnten aufgrund der möglichen Verwendung der Drohne zur Überwachung und zum Aufspüren von Menschen keine Flüge mit der Wärmebildkamera integrierten Drohne durchgeführt werden (Grenze zu Russland, Zollproblematik, etc.). Die Glasfaserkabel stehen für faseroptische Messungen zur Verfügung, jedoch wurde die Installation der Kabel im Projektzeitraum vom Dammbetreiber nicht durchgeführt.

## **6 Voraussichtlicher Nutzen**

Kostengünstige Multisensorennetzwerke können nicht nur bei sensiblen Dammbauwerken, sondern auch bei großen Infrastrukturprojekten eingesetzt werden. Sie ermöglichen es, eine Messpopulation gezielt zu erhöhen (Schwarmmessungen) und somit eine bessere Risikoversorge zu betreiben.

Die georgischen Partner sind an flächendeckenden Monitorings interessiert, die bereits gemeinsam mit EIFER eruiert werden. Derzeit steht dabei insbesondere ein umfangreiches Temperaturmonitoring im Dammbereich im Fokus. Dieses soll im Rahmen von Folgeprojekten mithilfe von LoraWAN-basierten Temperaturmessketten ergänzt werden. Der Dammbetreiber hat sich bereits für diese Lösung entschieden und strebt eine Forschungs- und Entwicklungszusammenarbeit mit EIFER, KIT und der GTU an.

## **7 Fortschritt bei anderen Stellen**

Es sind uns keine neuen Fortschritte von dritter Seite in Bezug auf ein Dammmonitoring mit vernetzbaren kostengünstigen Multisensoren bekannt geworden. Beim Bereich der Sensorentwicklung im Allgemeinen ist das schwer zu überblicken, aber am EIFER durchgeführte Patentrecherchen zeigen, dass fast täglich ein neues Patent in Bereich Sensorik entsteht. Diese Tatsache kann eine kommerzielle Umsetzung von Multisensorennetzwerke erheblich einschränken.

## **8 Veröffentlichungen**

Treiber für Sensoren und die Hardwareentwicklung sollen nach abschließender Überprüfung in Open-Source Plattformen (GitHub) veröffentlicht werden (noch in Prüfung).

Ein Themenheft in der Zeitschrift für Wasserwirtschaft (voraussichtlicher Erscheinungszeitraum: Herbst 2025) gemeinsam mit dem KIT ist geplant.

- Zorn, R. : Aufbau und Betrieb eines Multisensornetzwerkes an der Enguri-Bodenstaumauer.

Weitere Veröffentlichungen sind im Rahmen von Dissertationen mit dem Projektpartner KIT angedacht.