

## BOOST

Bridge mOnitOring uSing senTinel-1

<b>Programm / Ausschreibung</b>	ASAP, ASAP, ASAP 18. Ausschreibung (2021)	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.12.2022	<b>Projektende</b>	31.08.2025
<b>Zeitraum</b>	2022 - 2025	<b>Projektlaufzeit</b>	33 Monate
<b>Keywords</b>	Kritische Infrastruktur;Monitoring;SAR Interferometrie; Sentinel-1; Brücken		

### Projektbeschreibung

Ausgangssituation, Probleme oder Motivation

Die Verkehrsinfrastruktur und deren Bauwerken müssen funktionell intakt, eine hohe Leistungsfähigkeit erfüllen sowie die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer garantieren. Das bedingt vor allem hohe Anforderungen an Kunstbauten wie Brücken betreffend Widerstand gegen Einwirkungen, eine lange Dauerhaftigkeit und ausreichende Erfüllung der Bauwerkssicherheit. Weitere Erfordernisse sind niedrige Instandhaltungskosten, wenige Wartungseingriffe sowie ein kosteneffizienter Betrieb über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

Darüber hinaus haben sich die Aufgaben der Infrastrukturbetreiber betreffend ihrer Anlagen von Neubau hin auf die Wartung und Instandhaltung von Bestandsbauten bzw. Ersatzneubau derer verlagert. Bei der Kombination einer alternden Infrastruktur mit begrenzten finanziellen Mitteln ist dies eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Zum Beispiel sind 50 % der österreichischen/deutschen/schweizerischen (D-A-CH) Autobahnen jetzt über 40 Jahre alt, die meisten Brücken stehen kurz vor einer wesentlichen Instandhaltungsmaßnahme.

Bis heute wird der Zustand von Brücken regelmäßig hauptsächlich durch eine Brückenprüfung am Objekt (Begehung und sogenannte „handnahe Prüfung“) erfasst. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist der Einsatz von erfahrener Personal mit Kenntnissen über die historische Entwicklung des Zustandes. Nur in Sonderfällen kommen Brückenüberwachungssysteme mit Sensoren zum Einsatz. Eine flächendeckende sensorgestützte umfassende Untersuchung aller Bauwerke ist derzeit zu zeit- und kostenaufwendig und daher nicht im gesamten Verkehrsnetz einsetzbar.

Die Fernerkundung, insbesondere die multitemporale, synthetische Apertur Radar (SAR) Interferometrie (MIT), entwickelt sich zu einer operationellen Technik für die Überwachung von Erdbeben und Bodensenkungen. Das Potenzial von SAR, auch ein wirksames Instrument für die Brückenüberwachung zu werden, wird als sehr hoch eingeschätzt. Die meisten Brücken wurden mit sehr hochauflösenden (VHR) SAR-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 3 m oder mehr überwacht. Die geringe räumliche Abdeckung und potenzielle Konflikte bei der Beauftragung der Satelliten schränken die Anwendbarkeit solcher MTI-Ansätze nur unter Verwendung von VHR SAR Daten ein und erhöhen die Kosten eines solchen Dienstes.

Alternativ dazu liefert die Sentinel-1-Satellitenkonstellation des europäischen Copernicus-Programms hochauflösende (HR) SAR-Daten, die den europäischen Kontinent mit einer hohen Wiederholungsfrequenz vollständig abdecken. Darüber hinaus stellt die ESA die Daten im Rahmen einer freien und offenen Datenpolitik zur Verfügung und wird diese Satelliten mindestens

für die nächsten 15 bis 20 Jahre unterhalten. Somit bietet die Nutzung der Sentinel-1-Daten ein großes Potenzial für eine flächendeckende und periodische Brückenüberwachung sowie für die retrospektive Überwachung von Brücken.

## Ziele und Innovationsinhalte

Der innovative Aspekt von BOOST ist die Verwendung von HR- anstelle von VHR-SAR-Daten, was für die praktische Anwendbarkeit eines MTI-basierten Brückenüberwachungs- oder Warnsystems von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus werden TerraSAR-X-Daten für die Überwachung ausgewählter Brücken getestet und die Genauigkeiten mit denen verglichen, die mit Sentinel-1-Daten erreicht werden können.

Die erste technische Innovation von BOOST betrifft die Modellierung von "Normalen Brückendeformationsmustern" (NBDP), die hauptsächlich aus der thermischen Ausdehnung der Brücke resultieren. Diese Effekte sind wesentliche Komponenten der Verschiebung, können aber als unkritisch für den baulichen Zustand von Brücken eingestuft werden. Um kritische Verschiebungsmuster zu erkennen, ist es daher notwendig, die thermische Komponente von der kritischen Komponente zu trennen. Methoden zur NBDP-Schätzung sind entweder die retrospektive Analyse von InSAR-Daten oder die physikalische Modellierung der thermischen Verschiebungskomponente. Bei der Modellierung muss berücksichtigt werden, dass verschiedene Brückentypen ein unterschiedliches Verhalten in Bezug auf Umgebungstemperatur (Luft), Fundament, Exposition usw. zeigen und sich in der Längsrichtung, in der Vertikalen oder in beiden Richtungen ausdehnen können. Vor diesem Hintergrund besteht die wichtigste wissenschaftliche Herausforderung von BOOST in der datengetriebenen Schätzung des NBDP aus Sentinel-1-MTI-Datenstapeln. Mit diesem Ansatz werden Deformationszeitreihen, die durch Standard-MTI-Verarbeitung von "historischen" Datenstapeln abgeleitet wurden, analysiert und periodische Muster durch robuste geostatistische Methoden herausgefiltert. Darüber hinaus werden physikalisch basierte Modelle zur NBDP-Schätzung angewandt und deren Leistung mit datengetriebenen Ansätzen verglichen. Aufgrund des Mangels an Wissen über die erforderlichen Modellinputparameter und/oder die Komplexität des Modells wird ein modellbasierter Ansatz nur für ausgewählte Brücken untersucht.

Um ein repräsentatives Bild der NBDP-Charakteristika zu erhalten, werden drei verschiedene Deformationsmustertypen untersucht: i) langfristige vertikale Verschiebungen, ii) unerwartete Bewegungen von Brückenlagern und iii) Strukturversagen.

Ein weiterer Aspekt der technischen Innovation von BOOST ist die Integration von NBDPs in den MTI-basierten Monitoring Workflow. Standard-MTI-Verarbeitungsschritte, die von a priori NBDP-Informationen profitieren können, werden identifiziert und durch die Einbeziehung von NBDPs erweitert. Dadurch soll eine Produktverbesserung in Bezug auf Genauigkeit und Vollständigkeit der Deformationszeitreihen erreicht werden.

## Gewünschte Ergebnisse oder Erkenntnisse

Basierend auf einer systematischen Untersuchung verschiedener Brückentypen in Österreich und im Ausland wird BOOST eindeutige Anhaltspunkte dafür liefern, unter welchen Umständen MTI-basierte Überwachungs- und Warnsysteme unter Verwendung von Sentinel-1-Daten machbar sind. BOOST wird auch untersuchen, ob und wann die räumliche Auflösung von HR-Daten der limitierende Faktor bei der Überwachung bestimmter Brücken ist und ob dies durch die Verwendung von VHR-Daten abgemildert werden kann oder nicht.

Im Hinblick auf die Schätzung von NBDPs und deren Integration in InSAR-Workflows wird BOOST nicht nur dazu beitragen, die Genauigkeit und Vollständigkeit von MTI-basierten Deformationszeitreihen zu verbessern, sondern auch den

Informationsgewinn zu quantifizieren, der erzielt werden kann. Die Validierung mit In-situ-Referenzmessungen wird deutlich zeigen, ob die in BOOST entwickelten Methoden bestehende Verfahren zur Überwachung des Zustands von Brückenbauwerken ersetzen können.

## **Abstract**

Initial situation, problems or motivation

Transport infrastructure needs to remain structurally intact and safe, and it must deliver a high functional performance. These demands on durability, structural safety and resilience of the transport infrastructure directly translate into a high level of services requiring low maintenance costs, few interventions and cost-efficient management over the whole life cycle. Furthermore, the duties of transport authorities have shifted from new construction to maintenance and repair, or to replacement of existing assets. With aging infrastructure on one hand and limited financial resources, on the other hand this is a challenging task for the infrastructure operators. For example, 50% of Austrian/German/Swiss (D-A-CH) highways are over 40 years old and most of the bridges are close to an essential maintenance action. This reinforced by the fact that, transport infrastructure is affected more and more by degradation or load impacts.

Until today, the condition of bridges is recorded periodically mainly by means of visual inspections. The main advantage of this procedure is the use of experienced personnel with historical knowledge of the object. Only in special cases bridge monitoring systems with in situ sensors are applied. However, a sensor based comprehensive investigation of the structure is time-consuming and costly and therefore the application is not possible network-wide. Remote sensing, particularly multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) interferometry (MTI) is becoming an operational technique for landslide and subsidence monitoring, and the potential to become also an effective tool for bridge monitoring is evaluated to be very high. Most of the bridges have been monitored using very high resolution (VHR) SAR data with spatial resolution of 3 m or better. Because of their low spatial coverage and potential conflicts in tasking the satellites, the usage of SAR data only from VHR missions limits the applicability of such MTI approaches and increases the costs of such a service.

Alternatively, Sentinel-1 satellite constellation of the European Copernicus Programme delivers high-resolution (HR) SAR data fully covering the European continent with a high repetition frequency. Furthermore, ESA provides the data following a free and open data policy and will maintain these satellites at least for the next 15 to 20 years. Thus, the utilization of Sentinel-1 data has great potential for an area-wide and periodically bridge monitoring as well as for monitoring bridges retrospectively.

Goals and innovation content

The overall innovative aspect of BOOST is the usage of HR instead of VHR SAR data which is of great importance for the practical applicability of any MTI based bridge monitoring or alert system. In addition, TerraSAR-X data will be tested for the monitoring of selected bridges and the accuracies will be compared with those achievable with Sentinel-1 data.

First technical innovation of BOOST relates to the modelling of "Normal Bridge Deformation Patterns" (NBDP's) mainly resulting from thermal dilation of the bridge. These effects are significant components of the displacement but can be rated as non-critical for the structural health status of bridges. In order to detect critical displacement patterns, it is therefore necessary to separate the thermal component from the critical one. Methods for NBDP estimation are either the retrospective analyses of InSAR data or the physical modelling of the thermal displacement component. When it comes to modelling it must be taken into consideration that different bridge types show different behaviour regarding ambient (air)

temperature, foundation, exposition etc. and may dilate in the longitudinal dimension, vertical direction or in both directions. Behind this background, the main scientific challenge of Boost is the data driven estimation of NBDP from Sentinel-1 MTI data stacks. With this approach deformation time series derived by standard MTI processing of “historical” data stacks will be analysed and periodic patterns filtered out by robust geo-statistical methods. Furthermore physical based models for NBDP estimation will be applied and their performance will be compared with data driven approaches. Due to the lack of knowledge about required model input parameter and/or the complexity of the model, a model-based approach will be investigated only for selected bridges .

In order to get a representative picture of NBDP characteristics three different pattern types will be investigated: i) long term vertical displacements, ii) unexpected movements of bridge bearings and iii) structural failures.

Along the line, another technical innovation aspect of BOOST is the integration of NBDPs into the MTI based monitoring workflow. Standard MTI processing steps, which can benefit from a priori NBDP information, will be identified and extended by incorporating NBDPs. This is to achieve product improvement in terms of accuracy and completeness of the deformation times series.

#### Desired results or findings

Based on a systematic survey of different types of bridges in Austria and abroad, BOOST will come up with clear evidence under which circumstances MTI based monitoring and alert systems are feasible using Sentinel-1 data. BOOST will also investigate if and when the spatial resolution of HR data is the limiting factor in monitoring certain bridges and whether this can be mitigated by the usage of VHR data or not.

With respect to the estimation of NBDPs and their integration in into InSAR workflows, BOOST will not only contribute to improve the accuracy and completeness of MTI based deformation time series but also to quantify the information gain that can be obtained. Validation with reference in-situ measurements will clearly show if the methods developed in BOOST can replace existing procedures in monitoring the condition of bridge structures.

## **Endberichtkurzfassung**

### Initial Situation

Transport infrastructure and its components must be functionally intact, perform at a high level of reliability in order to guarantee the safety of road users. This places high demands on engineering structures such as bridges in terms of resilience, long-term durability and adequate structural safety. Further requirements include low maintenance costs and minimal maintenance work as well as cost-efficient operation throughout the entire life cycle. Against this background, the project BOOST (Bridge mOnitOring uSing senTinel-1) focused on the development, evaluation, and validation of methods for bridge monitoring using the satellite-based method InSAR (interferometry with synthetic aperture radar technology).

### Key Results and Innovation s

Over the past two decades, remote sensing, in particular interferometry with multitemporal synthetic aperture radar (MTI), has developed into an operational technique for monitoring landslides and ground movements, and its potential to also become an effective tool for bridge monitoring, is generally considered to be very high.

In BOOST, already established MTI methods were reviewed for their suitability for bridge monitoring tasks, user group requirements were analysed, and innovative InSAR-based detection and alerting strategies were developed. In close cooperation with stakeholders, we developed a detailed catalogue of critical deformation framework of different bridge types and their detection possibilities. Particular attention was paid to the integration of reference methods for accurate millimetre-deformation detection, which were used for validation purposes.

One particular outcome was that the geographical orientation and bridge type significantly determine the monitorability with InSAR: Due to the still predominantly polar orientation of satellite orbits, transverse movements for east-west oriented bridges and longitudinal movements for north-south oriented bridges cannot be detected. Similarly, geometric effects such as foreshortening, layover and shadow, which occur in SAR geometry, are limiting factors in measurement accuracy. InSAR is particularly useful for larger concrete or steel bridges when sufficient scatter points are available. An exception are suspension and cable-stayed bridges, which are difficult or even impossible to measure reliably with common satellites such as Sentinel-1. We assume this is probably due to strong vibrations and high reflectivity of the cables, which may override the reflectivity of the road on the bridge deck. Further investigations with longer SAR wavelengths are therefore necessary for adequate monitoring of these structures.

#### Methodological Advances

Significant progress was made in the development and validation of methods taking thermally induced bridge deformations into account. By integrating temperature time series and models for thermal length change, it was possible to determine the normal bridge deformation pattern on the basis of data and models and to eliminate it from the deformation measurements. The recording and compensation of the temperature effect significantly increases the informative value of the InSAR measurement series and enables the detection of deviations that may indicate irregularities or even damage.

In addition, a prototypical, automated flagging system was developed, that uses time series analyses methods to identify distinct patterns (trends, breaks, accelerations) in deformation data sets. The system subsequently prepares these findings in a form suitable for bridge management. Validation methods for comparing InSAR data with in-situ data (e.g. hydrostatic measurement systems) show standard deviations of position differences in millimetre range, thus confirming the high accuracy of the methods developed. For the test case 'Mur bridge G46', there was no significant deviation between InSAR-based detection to the reference measurements. Both, Sentinel-1 and TerraSAR-X delivered precise and consistent results (standard deviation: Sentinel-1 evaluation provided by the European Ground Motion Service (EGMS) 3.8 mm, Sentinel-1 evaluation by the project consortium 2.1 mm, TerraSAR-X evaluation 1.7 mm).

#### Practical Demonstration and Case Studies

The developed workflows were tested on over 30 bridges in Central Europe, with a focus on Austrian bridges. For selected bridges in the development cycle, including the Schottwien bridge (A), Mur bridge G46 (A), Prackovice bridge (CZ) and Radotínský Most (CZ), the InSAR-based time series were successfully compared with in-situ measurements and EGMS reference data. The application of the developed methods in independent case studies shows that MTI methods are particularly suitable for prestressed concrete and steel bridges with low vibrations and of sufficient length and width. Restrictions only remain for short spans or cable-bridges, as well as for structures with strong temperature gradients or

vibrations.

## Recommendations and Outlook

The key recommendations are:

InSAR-based bridge monitoring is a cost-effective addition to traditional measurement systems, especially for steel or prestressed concrete bridges with large spans.

For optimal use, the bridge geometry (alignment, length, material) and the availability of high-resolution SAR data sets should be taken into account.

The inclusion of local temperature data significantly increases accuracy.

For cable-bridges (suspension or cable-stayed bridges) or bridges with high vibration levels, it is recommended to investigate the use of InSAR in combination with longer wavelengths and special evaluation methods.

The developed flagging system for automatic alarms is suitable in practice as a decision-making aid for prioritising inspections but is not a substitute for detailed structural assessments on site.

The project results provide a sound basis for large-scale and continuous monitoring of important bridge structures using satellite radar. The methods have already been implemented in several pilot applications and open up new perspectives for future-proof infrastructure monitoring.

### **Projektkoordinator**

- JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH

### **Projektpartner**

- GISAT s.r.o.
- RED Bernard GmbH
- AIT Austrian Institute of Technology GmbH
- GeoSphere Austria - Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie