

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

06/2026

HN 134

Hydrographie
im Kontext der
Nachhaltigkeit



Beiträge vom
38. Hydrographentag
und DVW-Seminar



Satelliten statt Sensoren: Hebt InSAR das Monitoring auf ein neues Level?

Ein Beitrag von FLORIAN ZIMMERMANN und THOMAS ARTZ

Bauwerksüberwachung | Bundeswasserstraßen | Echtzeitdatenverarbeitung | InSAR
real-time monitoring | maritime situational awareness | real-time data processing | InSAR

Autoren

Dr. Florian Zimmermann und Dr. Thomas Artz arbeiten bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

zimmermann@bafg.de

1 Einleitung

Die Bauwerksüberwachung stellt eine der klassischen Aufgaben der Ingenieurgeodäsie dar (Kuhlmann et al. 2014). Insbesondere bei der Infrastruktur im Verkehrssektor wird dem Monitoring aufgrund des stetig steigenden Bedarfs ein immer höherer Stellenwert zugewiesen und der Versuch unternommen, die Potenziale der ständigen technischen Weiterentwicklungen im Bereich von Messsensorik, Automatisierung und Auswertesoftware abzuschöpfen. Neben Straßen und der Schiene trifft dies auch auf die Bundeswasserstraßen (BWaStr) und deren Infrastrukturbauwerke zu. Das zunehmende Alter der Bauwerke und die Notwendigkeit, diese weit über deren ursprünglich vorgesehene Nutzungsdauer zu betreiben, verschärft den Handlungsdruck und stellt aktuell eine der großen Herausforderungen im Betrieb der BWaStr dar.

Einer der letzten größeren Innovationsschübe im Bereich des Infrastrukturmonitorings entstand durch den vielfach zitierten Paradigmenwechsel, der den Übergang von der punkthaften zur flächenhaften Geometrieffassung beschreibt (Kuhlmann et al. 2014). Gepaart mit der rasanten Entwicklung mobiler Erfassungssysteme und nicht zuletzt auch aufgrund der aktuellen Entwicklungen im Bereich des KI-Einsatzes in der Datenverarbeitung und -auswertung wurde es möglich, die Geometrie von Infrastrukturbauwerken effizient

und in ihrer Gesamtheit zu erfassen, und diese auch über mehrere Messepochen hinweg hochpräzise zu beobachten (Holst et al. 2026). Dies gilt nicht nur für die über Wasser gelegenen Teile von Infrastrukturbauwerken. Mittlerweile ermöglichen am Markt verfügbare Systeme auch die flächenhafte Erfassung der unter Wasser gelegenen Bauwerksbereiche und realisieren somit ein Infrastrukturmonitoring, welches wirklich das gesamte Bauwerk umfasst (Hesse et al. 2021).

Abb. 1 zeigt eine Bahnbrücke über die Mosel, deren Geometrie unter Einsatz verschiedenster Sensorik und verschiedener Trägerplattformen über und unter Wasser erfasst wurde (Witte und Zimmermann 2024). Insbesondere der Ausschnitt im linken Bereich der Abbildung verdeutlicht, dass in diesem Fall mit verschiedenen Punktwolkenqualitäten umgegangen werden muss, dennoch aber ein ganzheitliches Bild der Bauwerksstruktur, über und unter Wasser, erzeugt werden kann.

Nun stellt sich natürlich die Frage, warum überhaupt der Bedarf bestehen sollte, das Monitoring in irgendeiner Art und Weise auf ein neues Level zu heben oder, etwas defensiver ausgedrückt, weiter zu optimieren. Die vielen positiven Entwicklungen und erfolgreichen Beispiele aus der Praxis der Bauwerksüberwachung sprechen ja eigentlich dafür, dass sich die gesamten Prozesse auf dem richtigen Weg befinden und wir für die einzelnen Bauwerke genau die richtigen und bedarfsgerech-

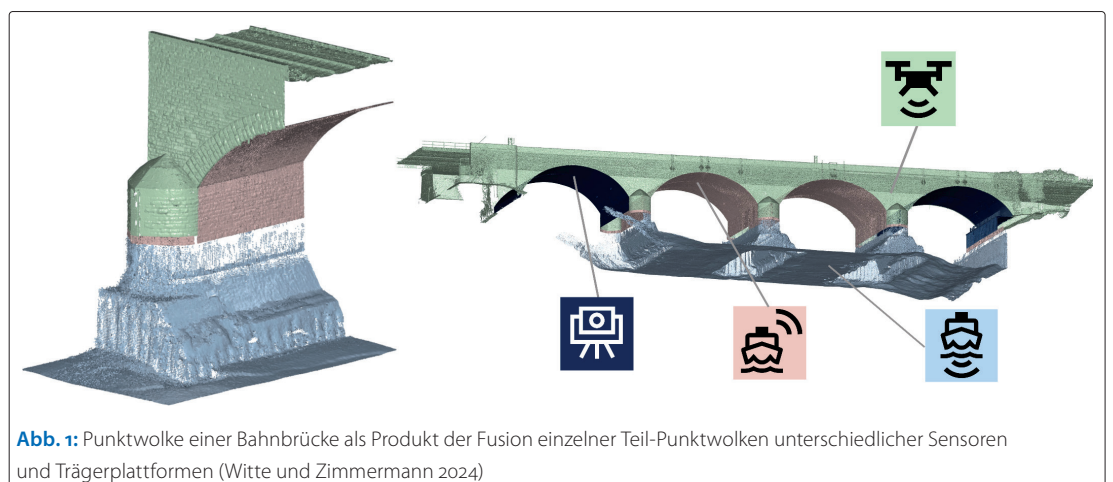


Abb. 1: Punktwolke einer Bahnbrücke als Produkt der Fusion einzelner Teil-Punktwolken unterschiedlicher Sensoren und Trägerplattformen (Witte und Zimmermann 2024)

ten Produkte generieren können. Drei Aspekte, welche insbesondere für Infrastrukturbetreibende relevant sind, liefern hier die Antwort:

- Das Monitoring fokussiert sich nicht nur auf ein einzelnes Bauwerk, sondern auf Hunderte bis Tausende Bauwerke, welche über das gesamte Bundesgebiet hinweg verteilt sind.
- Wir müssen derzeit an jedem Bauwerk aktiv etwas tun. Abgesehen von dem rein logistischen Aufwand bei der Vielzahl der Bauwerke, sind sowohl die finanziellen sowie die personellen Ressourcen ein begrenzender Faktor.
- In den meisten Fällen handelt es sich nicht um isolierte, einmalige Vermessungstätigkeiten. Das Monitoring lebt von der regelmäßigen Datenerfassung und kann auch nur so die Aufgabe der Bauwerksüberwachung bedienen.

Diese drei Aspekte zeigen, dass es einen Bedarf gibt, die lokale, bauwerksspezifische Komponente um ein großräumiges und kontinuierliches Monitoring der gesamten Verkehrsinfrastruktur zu erweitern. Und genau dieses Potenzial bietet die satellitenbasierte Radarinterferometrie (InSAR).

2 InSAR

2.1 Funktionsprinzip

Die satellitengestützte Radarinterferometrie (InSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar) ist in der Fernerkundung bereits seit vielen Jahren ein erprobtes und etabliertes Verfahren (Massonet und Feigl 1998), welches seit einigen Jahren auch vermehrt im Bereich des Infrastrukturmonitorings eingesetzt wird (Milillo et al. 2018). SAR-Satelliten zählen mit einer Flughöhe von etwa 500 bis 800 km zu den Low-Earth-Orbitern (LEO) und umkreisen die Erde in einem polnahen Orbit. Dabei wird die südwärts orientierte Flugrichtung (Nordpol Richtung Südpol) als absteigender (engl.: descending) Orbit und die nordwärts gerichtete (Südpol Richtung Nordpol) als aufsteigender (engl.: ascending) Orbit bezeichnet. Aufgrund der Erdrotation wird nach einer gewissen Anzahl von Tagen ein Ort auf der Erde in exakt gleicher Aufnahme­konstellation überflogen. Die Aufnahmen erfolgen dabei üblicherweise mit einem rechtsblickenden Seitensicht­radar, das bedeutet, die Radarsignale werden rechtwinklig zur Flugrichtung in schräger Blickrichtung, der sogenannten Line-of-Sight (LOS), abgestrahlt und auf einen definierten Bereich am Boden, den Footprint, gebündelt (siehe [Abb. 2](#)). In diesem Bereich werden die ausgesandten Wellen an der Erdoberfläche reflektiert und wieder von der Satellitenantenne empfangen. Über die Positionen des Satelliten und die Laufzeiten der empfangenen Signale werden die Amplituden und Phasen in Radarbilder (Szenen) überführt.

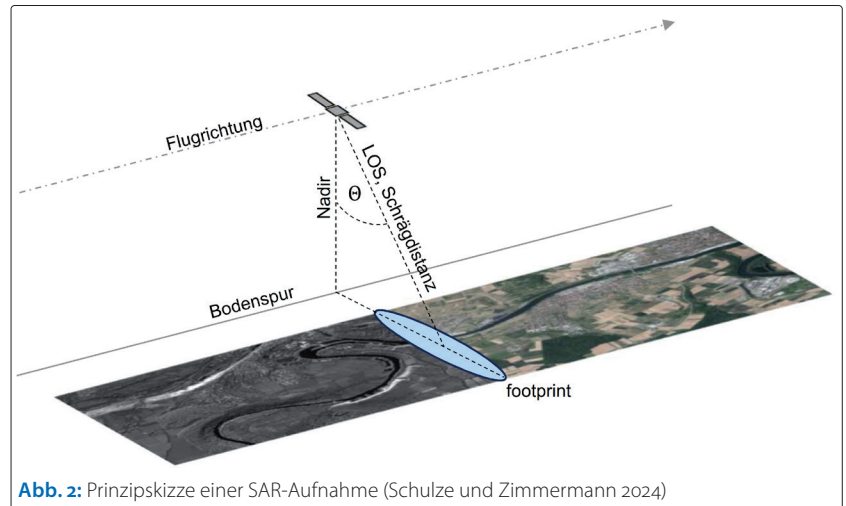


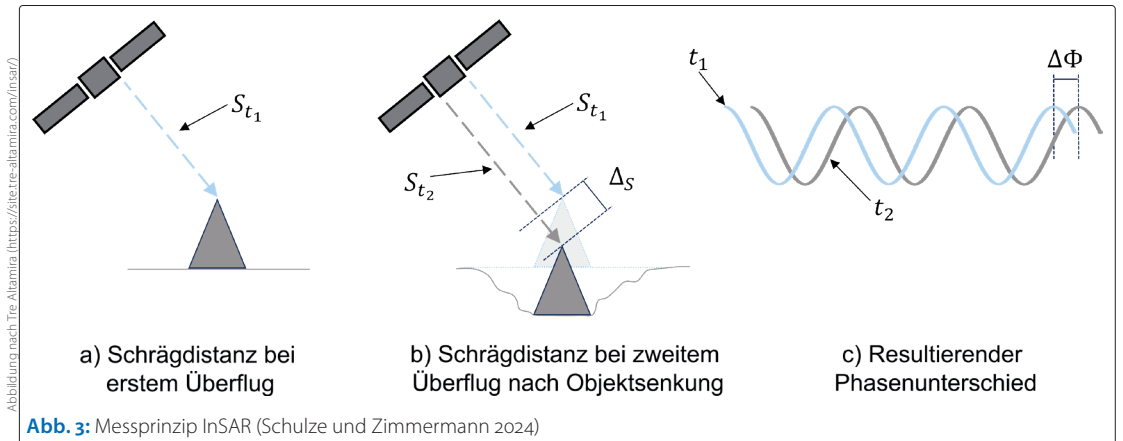
Abb. 2: Prinzipskizze einer SAR-Aufnahme (Schulze und Zimmermann 2024)

In der Radarinterferometrie wird in der Regel zwischen zwei Typen von sogenannten Rückstreuern – also den Objekten an der Erdoberfläche, an denen die Radarsignale reflektiert werden – unterschieden. Punktartige Rückstreuer, welche ein starkes und konstantes Rückstreusignal aufweisen, werden als permanente Rückstreuer (engl.: persistent scatterer) bezeichnet und treten meist an menschengemachten Objekten wie Gebäuden, Schildern oder anderen linienhaften Objekten auf. Wird dagegen in einem Bereich an der Erdoberfläche ein zwar schwaches, aber homogenes Rückstreusignal erzeugt, so wird diese Fläche als flächenhafter Rückstreuer (engl.: distributed scatterer) bezeichnet.

Diese Art von Rückstreuern kann beispielsweise im Bereich von Brach-, Geröll- oder Wegeflächen auftreten. In Gebieten mit Vegetation werden kaum auswertbare Signale reflektiert, und über Wasserflächen werden grundsätzlich keine Rückstreuer bzw. Messpunkte bestimmt. Generell ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Lage und die Verteilung von Rückstreuern a priori nicht bekannt ist und auch nur eingeschränkt vorhergesagt werden kann. Erst im Rahmen der InSAR-Auswertung zeigt sich, wo und wie viele Messpunkte tatsächlich gefunden werden können.

Bei jedem Überflug des Satelliten über das gleiche Gebiet werden für die Rückstreuer an der Erdoberfläche die Amplituden und Phasen gemessen. Finden Bewegungen an der Erdoberfläche statt, so ändern sich auch die gemessenen Phasenlagen, und es kann ein Phasenunterschied berechnet werden aus dem wiederum über die Wellenlänge des Signals auf die Weglängenänderung in Blickrichtung des Satelliten (LOS) geschlossen werden kann (siehe [Abb. 3](#)).

Bei der Ableitung der Weglängenänderung aus dem Phasenunterschied ist die Wellenlänge des jeweiligen Signals der limitierende Faktor, da nur eine Bewegung in der Größenordnung eines Viertels der Wellenlänge eindeutig bestimmbar ist. Bei



einem C-Band-Satelliten wie dem Sentinel-1 des europäischen Copernicus-Programms ($\lambda = 5,6 \text{ cm}$) führt dies zu einem Wert von $\pm 1,4 \text{ cm}$ und bei dem kommerziellen X-Band-Satelliten TerraSAR-X ($\lambda = 3 \text{ cm}$) zu einem Wert von $\pm 0,8 \text{ cm}$. Da sich diese Werte auf die Weglängenänderung zwischen zwei Überflügen beziehen wird deutlich, dass insbesondere langsame und kontinuierliche Prozesse gut beobachtbar sind. Laufen Bewegungsprozesse dagegen sehr schnell ab und übersteigen die genannte Größenordnung, können Bewegungen entweder zwar noch erkannt, aber nicht mehr eindeutig quantifiziert oder aber gar nicht mehr erfasst werden.

Werden Bereiche der Erdoberfläche aus beiden Orbits (ascending und descending) beobachtet und wurden im Rahmen der Auswertung für beide Satellitenorbits Rückstreuer gefunden, so lassen sich diese einem vordefinierten Gitter mit individuell festgelegter Gitterweite zuweisen. Für jede Gitterzelle können dann über Mittelbildung und zeitliche Interpolation ein Pseudomesspunkt und zugehörige LOS-Beobachtungen berechnet werden, welche im Rahmen einer sogenannten 2D-Dekomposition in eine vertikale und eine horizontale Ost-West-Komponente aufgespalten wer-

den können. Aufgrund der polnahen Umlaufbahn und der senkrecht zur Flugrichtung erfolgenden Beobachtung ist dieses Verfahren gegenüber Nord-Süd-gerichteten Bewegungsanteilen nicht sensitiv, sodass diese auch im Zuge der 2D-Dekomposition nicht bestimmbar sind.

Für eine belastbare und statistisch gut bewertbare InSAR-Auswertung werden in der Regel mindestens 20 Radarszenen über einem relevanten Untersuchungsgebiet benötigt, wobei die Größe des abgedeckten Bereichs und auch die Bodenauflösung vom gewählten Aufnahmemodus abhängen. Letztere beträgt im Fall der Sentinel-1-Satelliten ca. $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ und im Fall des TerraSAR-X-Satelliten im HRS-Mode etwa $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

2.2 Anwendungsbeispiele

In den folgenden Abschnitten wird der Einsatz von InSAR kurz an zwei Anwendungsbeispielen exemplarisch vorgestellt.

Hamburg Elbphilharmonie

Das erste Anwendungsbeispiel zeigt Daten des frei zugänglichen Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD, Kalia et al. 2021) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)



Abb. 4: Rückstreuer im Bereich der Elbphilharmonie in Hamburg. Links: Rückstreuer aus dem absteigenden Orbit. Rechts: Pseudomesspunkte aus der 2D-Dekomposition (Quelle: BBD). Die Zeitreihen der schwarz eingekreisten Rückstreuer sind in Abb. 5 abgebildet

im Bereich der Elbphilharmonie in Hamburg. Hier ist in den aus dem absteigenden Orbit bestimmten Rückstreuer ein Bereich im östlichen Teil der Philharmonie zu erkennen, in welchem die Rückstreuer nach der Einfärbung der Messpunkte zu urteilen ein anderes Bewegungsverhalten aufweisen (siehe Abb. 4). Dieses kleinere Cluster zeigt deutliche Bewegungen vom Satelliten weg, was auf eine Setzung hinweist. Im rechten Teil der Abb. 4 sind zusätzlich die aus der 2D-Dekomposition resultierenden Pseudomesspunkte dargestellt.

Die Zeitreihen der in Abb. 4 schwarz markierten Rückstreuer, bzw. des Pseudomesspunktes, bestätigen den rein optischen Eindruck, wobei in der Zeitreihe des Pseudomesspunktes die Senkungsbewegung noch mit einem zyklischen Verhalten überlagert ist (siehe Abb. 5). An diesem Anwendungsbeispiel wird deutlich, dass die Analyse der InSAR-Ergebnisse nicht ganz trivial ist. Da die Rückstreuer in diesem Fall nach ihrer mittleren Geschwindigkeit pro Jahr koloriert sind, wird ein zyklisches Verhalten nicht direkt sichtbar, während reine Hebungs- oder Senkungsprozesse auch an den mittleren Geschwindigkeiten erkannt werden können.

Betrachten wir diesen Fall aus Sicht einer hypothetischen Bauwerksüberwachung, so könnte InSAR hier unter Umständen ein unbekanntes und auffälliges Bewegungsverhalten im Bereich der Elbphilharmonie aufzeigen. Nach einer Bewertung durch die zuständige Stelle könnte basierend auf diesen Daten eine gezielte Betrachtung dieses Bereichs initiiert werden. Damit sollte es dann möglich sein, ein auffälliges Bewegungsverhalten örtlich besser einzugrenzen und genauer zu untersuchen.

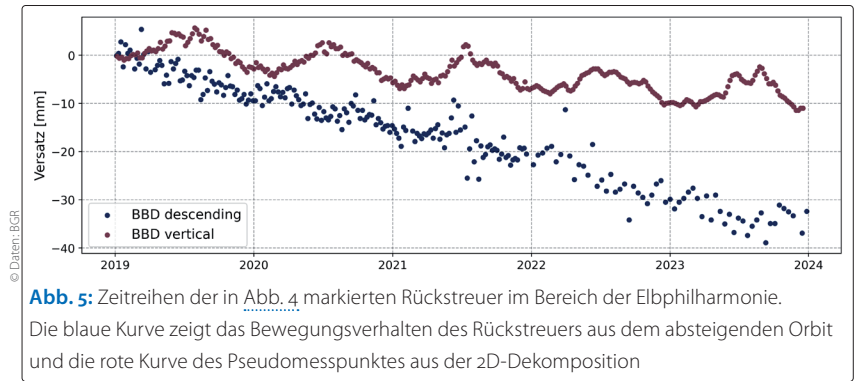


Abb. 5: Zeitreihen der in Abb. 4 markierten Rückstreuer im Bereich der Elbphilharmonie. Die blaue Kurve zeigt das Bewegungsverhalten des Rückstreuers aus dem absteigenden Orbit und die rote Kurve des Pseudomesspunktes aus der 2D-Dekomposition

Monitoring Schleusenbauwerk

Das zweite Anwendungsbeispiel stammt aus einem laufenden Projekt, welches gemeinsam mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Donau-MDK (Main-Donau-Kanal) durchgeführt wird. Das Ziel des Projektes ist es, das Bewegungsverhalten des Bauwerks zu bestimmen, und dann auf Basis dieser Erkenntnisse die existierenden Messprogramme für die Bauwerksüberwachung an die bestehende Situation anzupassen. Vor diesem Hintergrund wurde die Aufnahme hochauflöser Daten des spanischen PAZ-Satelliten beauftragt, und diese Daten wurden in verschiedenen Epochen durch die Firma Tre Altamira ausgewertet. Abb. 6 zeigt exemplarisch die Rückstreuer nach einer SqueeSAR-Auswertung (Ferretti et al. 2011) der Radarszenen des absteigenden Orbits.

An der räumlichen Verteilung der Rückstreuer wird deutlich, dass InSAR – ohne vor Ort aktiv zu sein – mit zeitlicher Konstanz eine Informationsdichte bereitstellen kann, welche mit klassischen oder auch innovativeren Messverfahren nur schwer erreichbar ist. Für alle in Abb. 6 darge-

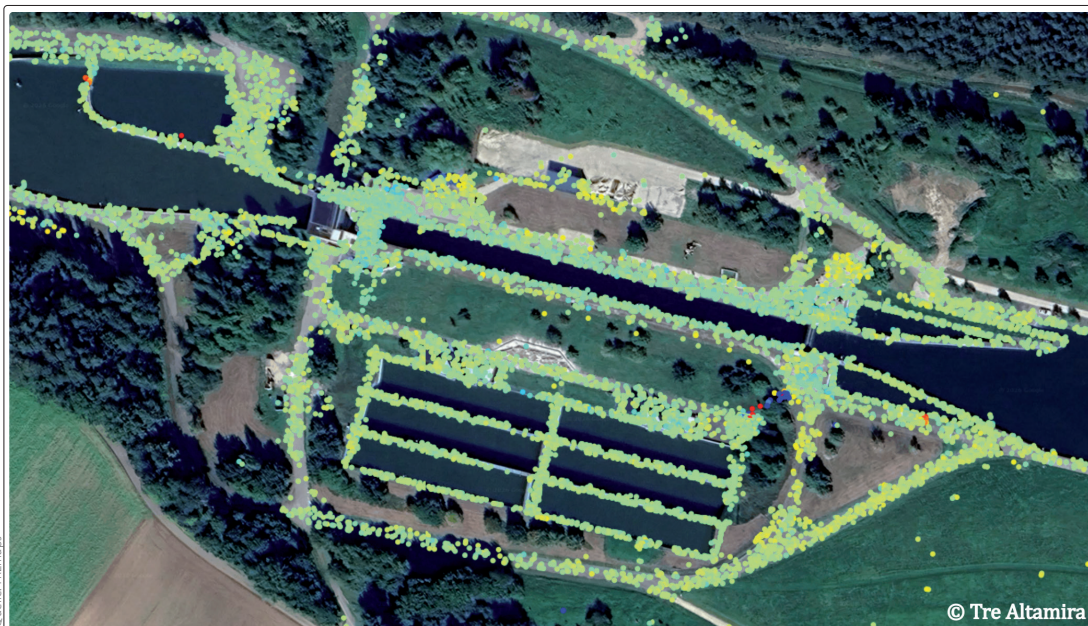


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Rückstreuer nach der SqueeSAR-Auswertung von Radarszenen aus dem absteigenden Orbit des PAZ-Satelliten im HRS-Mode für ein Schleusenbauwerk und dessen Umfeld

stellten Rückstreuer liegen Zeitreihen vor, welche deren relatives Bewegungsverhalten mit einer zeitlichen Auflösung von elf Tagen und einer Präzision weniger Millimeter beschreiben. Mit aufwendigen Laserscans oder Befliegungen lassen sich geometrische Informationen mit dieser Qualität auch erzeugen, jedoch ist hier insbesondere eine vergleichbare zeitliche Auflösung nur mit einem Aufwand zu erreichen, welcher nicht mehr als wirtschaftlich bezeichnet werden kann. Dennoch können diese Daten die klassischen Überwachungsmessungen nicht ersetzen, da zum einen die Messpunkte in der Regel nicht eindeutig und reproduzierbar bekannt sind und somit auch bautechnische Zielgrößen nicht direkt ableitbar sind. Zum anderen liegt zwar eine hohe Informationsdichte vor, diese beschränkt sich jedoch auf die sichtbaren Bauwerksteile. Die unter Wasser gelegenen Bereiche werden nicht betrachtet und Gebiete, in denen in der InSAR-Auswertung keine Messpunkte gefunden werden können, lassen sich auch weiterhin nur mit den bekannten Verfahren überwachen.

3 Skalenübergreifendes Monitoring

Betrachtet man das große Anwendungspotenzial von InSAR stellt sich im Umkehrschluss natürlich auch die Frage, ob InSAR nicht einfach das Bauwerksmonitoring in seiner Gesamtheit bedienen kann. Und an dieser Stelle ist die Antwort sehr einfach, nämlich »Nein«. Die in Kapitel 1 genannten klassischen oder auch moderneren Messsysteme sind weiterhin das Mittel der Wahl, wenn eine bauwerksspezifische, detaillierte Erfassung das Ziel darstellt. Hier ist klar, dass InSAR im Allgemeinen kein gleichwertiges Produkt zur Verfügung stellen kann, insbesondere nicht für den unter Wasser gelegenen Bauwerksbereich. Stellt man die Vorteile und Charakteristika der beiden Ansätze allerdings gegenüber, so wird deutlich, dass eine Kombination der beiden einen enormen Benefit mit sich bringen kann. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, sind die dort charakterisierten Erfassungssysteme auf dem besten Weg zu einem standardisierten Einsatz im Wirkbetrieb und können bereits jetzt einen Großteil der bestehenden Anforderungen bedienen. Die großen Herausforderungen bestehen hier eher im Bereich einer standardisierten Datenauswertung, einer Automatisierung der zugehörigen Prozesse und primär auch in der schieren Anzahl an Objekten, welche zu überwachen sind. Auf der anderen Seite steht die InSAR-Technik. Der große Vorteil der InSAR-Technologie ist es, dass großräumig hochpräzise Bewegungsinformationen bereitgestellt werden können, die je nach verwendetem Datentyp auch bauwerksscharf verdichtet werden können. Aus diesem Grund könnten große Infrastrukturbetreiber wie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) davon

profitieren, die gesamte Aufgabe der Bauwerksüberwachung in einem skalenübergreifenden Ansatz zu organisieren (Zimmermann und Artz 2022). Auf der obersten Ebene könnte mit InSAR eine Art Frühwarnsystem aufgebaut werden, welches für die gesamte Infrastruktur Bewegungsdaten bereitstellt und damit auf Netzebene bereits auffällige Bewegungsbereiche identifizierbar macht. Ein solcher Überblick auf Netzebene könnte dann auf der nächsten Ebene ermöglichen, objektspezifische Überwachungsmessungen gezielt und anlassbezogen zu initiieren. Dies führt zu einem ressourcenschonenden Handeln und erzeugt hochwertige Daten – nur an der Stelle, an der sie wirklich benötigt werden. Ob die objektspezifische Verdichtung letztlich über die Initiierung geodätischer Vor-Ort-Vermessungen, oder über den Wechsel auf hochauflösende InSAR-Produkte erfolgt, muss allerdings individuell entschieden werden und hängt vom vorliegenden Anwendungsfall ab. Generell könnte es jedoch möglich sein, die derzeit vorgeschriebenen Inspektionsintervalle bauwerksspezifisch festzulegen und nach Möglichkeit deutlich zu verlängern.

Bundesweit werden bereits Bodenbewegungsinformationen kostenfrei über den BBD bereitgestellt. Da dieser aber nicht mit dem Fokus Infrastrukturmonitoring entwickelt wurde, sind dort nicht in jedem Fall die notwendigen Informationen enthalten. Aus diesem Grund wird aktuell in einem Leuchtturmprojekt der Deutschen Raumfahrtagentur in einem Konsortium aus drei Oberbehörden des Verkehrsministeriums, der BGR als Betreiber des BBD und zwei Forschungseinrichtungen ein Bodenbewegungsdienst entwickelt, welcher speziell auf die Bedarfe des Verkehrssektors ausgerichtet ist und perspektivisch die Rolle eines solchen Frühwarnsystems einnehmen könnte (BBD-V 2025).

4 Fazit

Wählt man für einen Beitrag einen Titel mit einer provokanten Frage, so sollte diese spätestens am Ende dieses Beitrags auch beantwortet werden. Daher nun zurück zum Anfang, also »Hebt InSAR das Monitoring auf ein neues Level?«. Die Antwort aus Sicht der Autoren lautet hier klar »Ja«. Aber nicht dadurch, dass InSAR bestehende und etablierte oder sich in Entwicklung befindende Ansätze ablöst oder generell infrage stellt. InSAR bietet vielmehr die Möglichkeit, bewährte Techniken zu einem ganzheitlicheren und gut skalierbaren Ansatz zu ergänzen. Gleichzeitig wird jedoch auch klar, dass noch einige technische und methodische Schritte notwendig sind – insbesondere für eine routinemäßige Verwendung unter realen Prozessbedingungen. InSAR ist kein Allheilmittel, welches unmittelbar alle bestehenden geodätischen Herausforderungen im Bereich der Infrastruktur

überwachung verschwinden lässt. Es ist aber ein bereits umfassend evaluiertes Werkzeug, dessen Anwendung einige Herausforderungen kleiner erscheinen lässt.

Schlussendlich sollten sich die Infrastrukturbe-

treiber die Frage stellen, ob die vertrauten und etablierten Routinen – so innovativ sie auch sein mögen – wirklich noch genügen, denn Optionen für eine durchgreifende Optimierung liegen klar auf dem Tisch. //

Literatur

- BBD-V (2025): Bodenbewegungsdienst für den Verkehrssektor (BBD-V). <https://bbd-v.de>
- BMV (2025): Infrastruktur. www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/infrastruktur-statistik.html
- Ferretti, Alessandro; Alfio Fumagalli; Fabrizio Novali et al. (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465
- Hesse, Christian; Karsten Holste; Ingo Neumann; Ralf Esser; Michael Geist (2021): 3D-Hydromapper – Ein innovatives Messsystem für die Erfassung, Prüfung und das Management von Wasser-Infrastrukturbawerken. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, DOI: 10.12902/zfv-0371-2021
- Holst, Christoph; Volker Schwieger; Corinna Harmening; Alexander Reiterer; Jörg Blankenbach (2026): Ingenieurgeodäsie. In: Theo Kötter; Hansjörg Kutterer; Stefan Ostrau; Jens Riecken (Hrsg.): *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen 2025*, VDE-Verlag
- Kalia, Andre C.; Michaela Frei; Thomas Lege (2021): Boden-Bewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, DOI: 10.12902/zfv-0365-2021
- Kuhlmann, Heiner; Volker Schwieger; Wolfgang Niemeier; Andreas Wieser (2014): Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. *Journal of Applied Geodesy*, DOI: 10.1515/jag-2014-0020
- Massonnet, Didier; Kurt L. Feigl, K. L. (1998): Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, DOI: 10.1029/97rg03139
- Milillo, Pietro; Bryan Riel; Brent Minchew et al. (2016): On the synergistic use of SAR constellations' data exploitation for Earth science and natural hazard response. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2465166
- Schulze, Roland, Florian Zimmermann (2024): Detektion von Verschiebungen mittels SAR-Interferometrie. In: Joachim Stahlmann (Hrsg.): *Messen in der Geotechnik 2024: Fachseminar am 22./23. Februar 2024*, Mitteilungen des Instituts für Geomechanik und Geotechnik 116, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, S. 295–321
- Witte, David; Florian Zimmermann (2024): Multitemporale Zustandserfassung von Verkehrsinfrastrukturbawerken. *Forschungsergebnisse kompakt*, www.bmv-forschungsnetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/Kurzberichte/TF3/Witte_Zimmermann_12-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Zimmermann, Florian; Thomas Artz (2022): Empfehlungen für satelliten-fernerkundliche Monitoringsysteme Massiv- und streckenbezogener Infrastrukturbawerke. *BfG-Bericht*, DOI: 10.5675/BfG-2120