Satellitengestütztes Bauwerksmonitoring – Verformungsmessungen an der Großbrücke Schottwien als Demonstrationsprojekt

- DI Dr. Alois Vorwagner[1], DI Maciej Kwapisz[1], Mag. Dr. Leopold Philip[1], Dr. Ing. Vazul Boros[1], DI Dr. Thomas Moser[2]
- [1] AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien
  [2] ASFINAG Bau GmbH, Wien

KURZFASSUNG

Die Radarinterferometrie (engl. Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR) ist ein Fernerkundungsverfahren, das Verformungen der Erdoberfläche aus dem Weltraum mit Zentimeter- bis Dezimetergenauigkeit erfasst und in der Erdbeobachtung vielseitig eingesetzt wird. Ein vielversprechendes neues Anwendungsgebiet ist die Verformungsmessung von Brücken, das bisher aufgrund unzureichender Genauigkeit kaum erschlossen war. Forschungssatelliten der ESA erfassen in Zyklen von zwölf bzw. sechs Tagen bei einer Radarwellenlänge von 5,5 cm Erdoberflächenverformungen, die durch InSAR ausgewertet werden. Dieser Beitrag präsentiert Ergebnisse aus Projekten, die den Einsatz von Satellitendaten zur Brückenüberwachung untersuchen. Das Verfahren nutzt natürliche oder künstliche Reflektoren und optimiert die Genauigkeit durch Temperaturkompensationsmodelle und Phasenausgleichsalgorithmen. An der Großbrücke Schottwien zeigten Messungen eine Abweichung von nur 1,7 mm (Standardabweichung) im Vergleich zum Referenzsystem, einer digitalen Schlauchwaage, und unterstreichen das Potenzial dieser Methodik.

1 Einleitung

Die ständige Beobachtung von Bauwerksverformungen ist ein potenziell vielversprechender Zustandsindikator, aber als dauerhafte Überwachung nicht einfach zu verwirklichen. Das derzeit immer noch am häufigsten verwendete permanente Messsystem für vertikale Verschiebungsdifferenzen ist eine flexible digitale Schlauchwage. Diese eignet sich für die kontinuierliche Überwachung von geotechnischen Phänomenen oder Verformungsproblemen von Brücken, erfordert jedoch eine ständige Wartung der Sensoren (z. B. Wechsel der Flüssigkeit) sowie intakte und verbundene Rohre zwischen den Sensoren. Im abgeschlossenen Forschungsprojekt „VerBewIng – Verformungsbasierte Bewertung von Ingenieurtragwerken" [1], gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), wurden drei verformungsbasierte Methoden an Brücken getestet: Laserscan mit Drohnen, *Mobile Mapping* mit Scans der Bordsteinkante und satellitengestütztes Monitoring mit Radarsatellitendaten (*Interferometric Synthetic Aperture Radar* – InSAR). Testobjekt war die Seitenhafenbrücke Wien. Der Fokus lag hier auf der Schadenserkennung mittels Verformungsmessung, wobei das große Potenzial von InSAR-Daten identifiziert wurde [2]. In diesem aktuellen Beitrag werden weiterführende Auswertemethoden und Anwendungen der berührungslosen Radarmessung für das Brückenmonitoring und notwendige Kompensationsmaßnahmen zur Genauigkeitssteigerung vorgestellt.

2 Verformungsmessung mit Radarsatelliten

2.1 Grundlegendes zu InSAR-Methoden

Die Überwachung von Bauwerksverformungen mithilfe von Radarsatelliten ist eine völlig neue

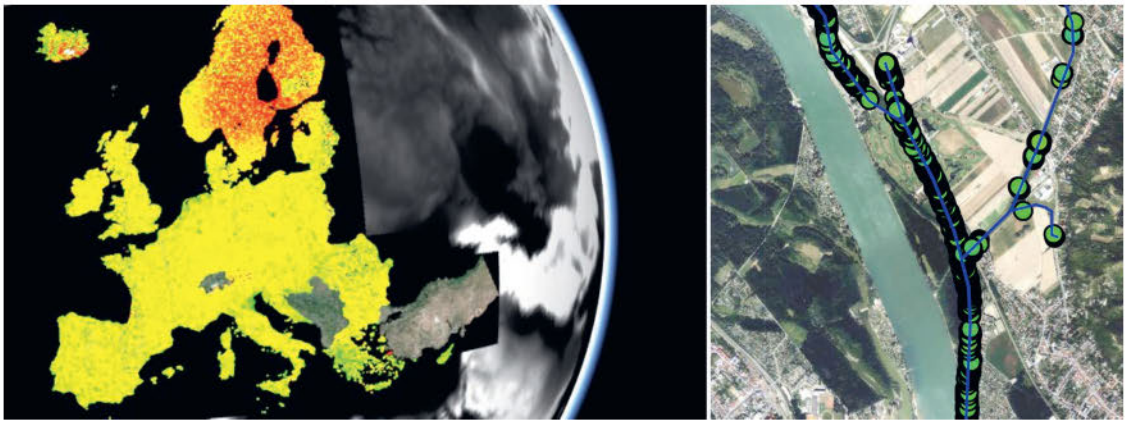

Bild 1: EGMS-Daten aus Europa [14] von Sentinel-1-Satelliten (links) und mögliche EGMS-Daten entlang eines Autobahnabschnitts in Österreich (rechts)

Möglichkeit, die durch berührungslose Messungen aus dem Weltraum ermöglicht wird. Spezielle Satelliten mit Radarantennen nutzen die Radarinterferometrie, um Bewegungen auf der Erdoberfläche sensorlos zu erfassen. InSAR-Methoden werden bereits erfolgreich zur Überwachung von Massenbewegungen und Gletschern erforscht [4]–[6].

Für die Messdatenerfassung werden entweder natürliche Reflektoren wie Lärmschutzwände, Gebäudekanten, Masten oder Straßenausrüstungsgegenstände etc. genutzt oder künstliche Cornerreflektoren angebracht. Die reflektierten Radarsignale werden vom Satelliten erfasst und zeitversetzt zentral gespeichert. Diese Daten werden mit Fernerkundungsmethoden vorprozessiert und entsprechend korrigiert [3]–[14]. Aus Zeitreihenmessungen können damit langfristige Verformungstrends durch Bildung einer Basisreferenz bestimmt werden. Details werden in den folgenden Abschnitten noch beschrieben.

Derzeitige kommerzielle Satellitenanbieter wie *COSMO-SkyMed*, *ICESat* oder *TerraSAR-X* bieten Rohdaten für InSAR-Messungen an. Diese Daten sind jedoch oft kostenintensiv und zeitlich sowie örtlich limitiert. Die Europäische Weltraumorganisation (*European Space Agency* – ESA) stellt seit kurzem mit dem Europäischen Bodenbewegungsdienst (*European Grund Motion Service* – EGMS) bereits vorprozessierte InSAR-Daten der Sentinel-1-Satelliten frei zugänglich zur Verfügung (s. Bild 1) [14]. Damit entstehen auch für Infrastrukturbauten neue Möglichkeiten zur Überwachung von Langzeitverformungen wie Setzungen, Kriechbewegungen oder zur Identifikation von Hotspots von verformungsaktiven Gebieten.

2.2 Radar-Satellitenmessungen mit Sentinel-1

Die ESA stellt für die beschriebene Methodik die Forschungs- und Erdbeobachtungssatelliten der Sentinel-1-Baureihe zur Verfügung, welche in einer Flugbahnhöhe von 693 km über der Erdoberfläche kreisen [3]. Die Punkte auf der Erdoberfläche werden in zwei Orbitalrichtungen (Flugbahnen) überflogen, einmal von Süden nach Norden (ansteigende Umlaufbahn = *ASCENDING*) und einmal von Norden nach Süden (absteigende Umlaufbahn = *DESCENDING*), s. Bild 2. Die beiden Sentinel-1-Satelliten 1A und 1B überfliegen die Erde auf einer synchronen, ungefähr polaren Umlaufbahn (Orbit), welche gegenüber der Erdachse leicht geneigt ist [3].

Die Satellitenaufnahmen zur Erdbeobachtung mit Radarwellen erfolgen in einer schrägen Blickrichtung, und zwar rechtsschauend und normal zur Flugrichtung, Bild 3. Die Sentinelsatelliten verfügen über Radarantennen, welche Signale aussenden und die Rückstreuung von der Erdoberfläche wieder empfangen. Bestimmt wird die Interferenz des Radarsignals als Bruchteil der Wellenlänge λ (bei Sentinel-1

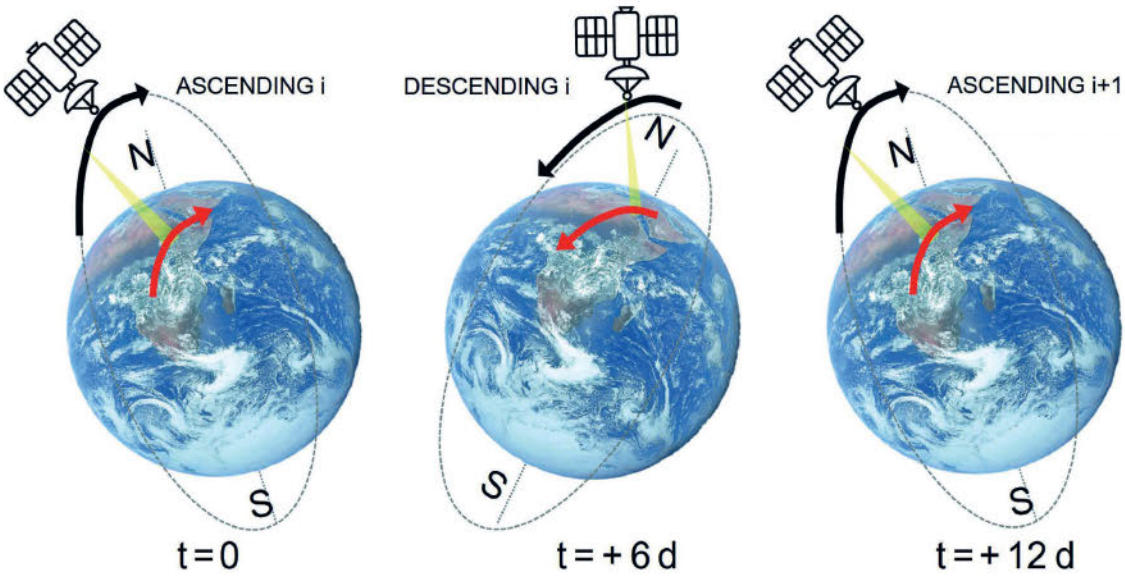

Bild 2: Überflugbahnen des verbleibenden Satelliten Sentinel-1A, gegengleicher Orbit + 6 d, wiederholter gleicher ASC-Orbit + 12 d

ist λ = 5,5 cm). Damit kann theoretisch eine sehr hohe Genauigkeit erreicht werden. Die Flugbahn eines Satelliten folgt in einer sonnensynchronen Umlaufbahn mit einem Wiederholungszyklus von 12 d im gleichen Orbit bzw. 6 d im gegengleichen Orbit. Gleiche Aufnahmepunkte an der Erdoberfläche werden somit bei zwei Satelliten im gleichen Orbit mit einer Wiederkehrzeit von 6 d überflogen. Seit Dezember 2021 ist der Satellit 1B aufgrund eines Sonnensturmes ausgefallen. Damit reduzierte sich zwar die Anzahl der Bilder auf die eines Satelliten auf 12 d im gleichen bzw. alle 6 d im gegengleichen Orbit (Bild 2). Durch den Ausfall ist aber die Grundaussagekraft der generellen Methodik nicht betroffen [4]. Die neuen Satelliten Sentinel-1C und -1D sollen 2025 in Betrieb gehen [3].

2.3 Persistent Scatterer Interferometry

Die Methode der *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI) nach [7] basiert auf einer konstanten Rückstrahlung von Radarsignalen, die nach 20 bis 25 Aufnahmen (Szenen) einen Referenzpunkt in der Bodenauflösungszelle bilden, auf den differenzielle Verformungsänderungen bezogen werden. Das Prinzip ist in Bild 3 exempla-

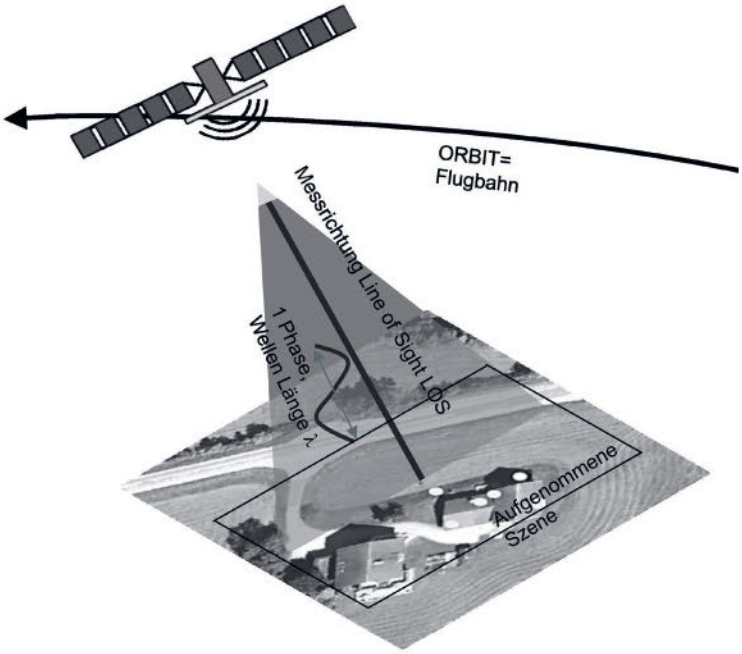

Bild 3: PSI-Methode nach [7], die Messrichtung erfolgt in der Blickrichtung LOS des Satelliten, z. B. bei Sentinel-1 mit einer Wellenlänge λ = 5,5 cm

risch dargestellt. Die Messung erfolgt in schräger Richtung, bezeichnet als *Line of Sight* (LOS). Das Radarsignal wird an natürlichen oder künstlichen Reflexionspunkten konstant (persistent) rückgestrahlt. Damit werden nach Bildung einer Grundreferenz kontinuierlich Zeitreihen messbar, solange der persistente Reflexionspunkt erhalten bleibt.

Bild 4: Cornerreflektor auf einer Brücke zur Verbesserung der Radarsatellitendaten

Die InSAR-Technologie liefert, wie beschrieben, die Aufzeichnung von Zeitreihen von Satellitenbeobachtungen. Die Radarsatellitendaten müssen mit Fernerkundungsmethoden vorprozessiert und auf eine Vielzahl von lokalen Gegebenheiten (z. B. Atmosphäre etc.) korrigiert werden. Mit dieser Methode wurden bei der Beobachtung von Verformungstrends von Massenbewegungen oder Gletschern bereits Genauigkeiten im Dezimeterbereich erreicht [2], [6]. Neu entwickelte Modelle sorgen für eine nochmals verbesserte Genauigkeit, speziell bei Anwendungen im Bauwerksmonitoring. Die Kompensation von thermischen Verformungen der betrachteten Bauwerke nach [4], [10]–[12] sowie eine um die entsprechende Phasendifferenz durchgeführte Signalkorrektur sind für die Anwendung von entscheidender Bedeutung. Erst damit können Brückenverformungen im Wochenrhythmus genau erfasst und auch Auswertungen historischer Daten vorgenommen werden.

Mit kontaktlosen Methoden können auch schwer zugängliche Flächen oder Bauwerke sowie ganze Bauwerksabschnitte und deren Umgebung erfasst und bewertet werden, solange ausreichend persistente Rückstreuer (*persistent scatterer*) identifiziert werden. Das Verfahren arbeitet sowohl mit natürlichen als auch mit künstlichen Reflektoren. Bei letzteren handelt es sich i. d. R. um Cornerreflektoren, die aus drei jeweils zueinander senkrechten metallischen Oberflächen bestehen und so am Bauwerk angebracht werden, dass sie gezielt auf die Umlaufbahn der Satelliten ausgerichtet sind (Bild 4). Werden Messungen mit Satelliten vom Weltraum aus durchgeführt, ergibt sich der zusätzliche Vorteil einer extraterrestrischen Referenz. Ein weiterer Vorteil ist, dass Daten großräumig und zeitlich durchgängig seit 2016 zur Verfügung stehen. Statt bisheriger Einzelinformationen an diskreten Stellen können künftig flächenhaft ganze Streckenabschnitte (z. B. eine Vielzahl von Brücken, setzungsempfindliche linienförmige Bauwerke etc.) kontinuierlich überwacht werden. Vor allem Langzeitverformungen von Bauwerken haben ein großes Potenzial für eine InSAR-Überwachung.

Zusammengefasst lassen sich folgende Vorteile eines satellitengestützten Bauwerksmonitorings auflisten:

- Keine baulichen Installationen am Bauwerk und keine Personen vor Ort nötig,
- Kontinuierliche Aufzeichnung zu disktreten Zeitpunkten,
- Gleichzeitige Erfassung großer Untersuchungsgebiete,
- Historische Datenauswertung bei Sentinel-1 bis 2016 möglich, zukünftig ist ein Ausbau der Mission geplant [3],
- Extraterrestrische Referenz,
- Grundsätzlich kostenfreie Verfügbarkeit auch von bereits vorprozessierten Sentinel-1-Daten durch den EGMS via Download [14],
- Prinzipielle Anwendung für Verformungsmessung sowohl mit als auch ohne Cornerreflektoren möglich.

3 Notwenige Kompensationen für InSAR-Monitoring

3.1 Anforderung an die Genauigkeiten

Im Rahmen eines aktuell bei AIT laufenden Forschungsprojektes [13] wurden in einem Workshop Brückenbetreiber, Sensorhersteller und Forschungseinrichtungen zu einer Online-Veranstaltung eingeladen. Die Teilnehmenden wurden gebeten, die derzeit von ihnen verwendeten Methoden zur Überwachung von Brücken zu beschreiben und die Art des zulässigen „Fehlers" anzugeben, den sie mit der jeweiligen Methode zu erkennen beabsichtigen. Diese Methoden wurden dann in einer Grafik zusammengefasst, wobei die erforderliche Häufigkeit der Messungen und der erwartete Verformungsbereich angegeben wurden. Zusätzlich wurde von den Teilnehmenden Rechtecke (rote Umrahmung) definiert, in denen der Messbereich für InSAR-Anwendungen liegen sollte.

Das Ergebnis ist in Bild 5 zusammengefasst. In den farbigen Kreisen sind die Teilnehmenden vermerkt. Die in den Rechtecken enthaltenen Methoden und Fehlerarten geben einen guten Hinweis darauf, wo das größte Potenzial für InSAR-Methoden liegt, das derzeit auf eher langfristige Verformungstrends wie Setzungen oder Kriechverformungen von Bauwerken bei einer Abtastrate in der Dimension von Tagen abzielt. Erkennbar ist das in der Überlappung der Rechtecke, worin auch klar wird, dass für das Bauwerksmonitoring vorrangig der Subzentimeterbereich erreicht werden muss.

3.2 Koordinatentransformation

Um die Auswertung der InSAR-Daten als Hilfsmittel für die Tragwerksbewertung heranziehen können, müssen diese von der schrägen Aufnahmerichtung (LOS) auf die Tragwerksorientierung transformiert werden (Bild 6). Dabei ist es irrelevant, ob diese Daten mit natürlichen oder künstlichen Reflektoren gewonnen wurden.

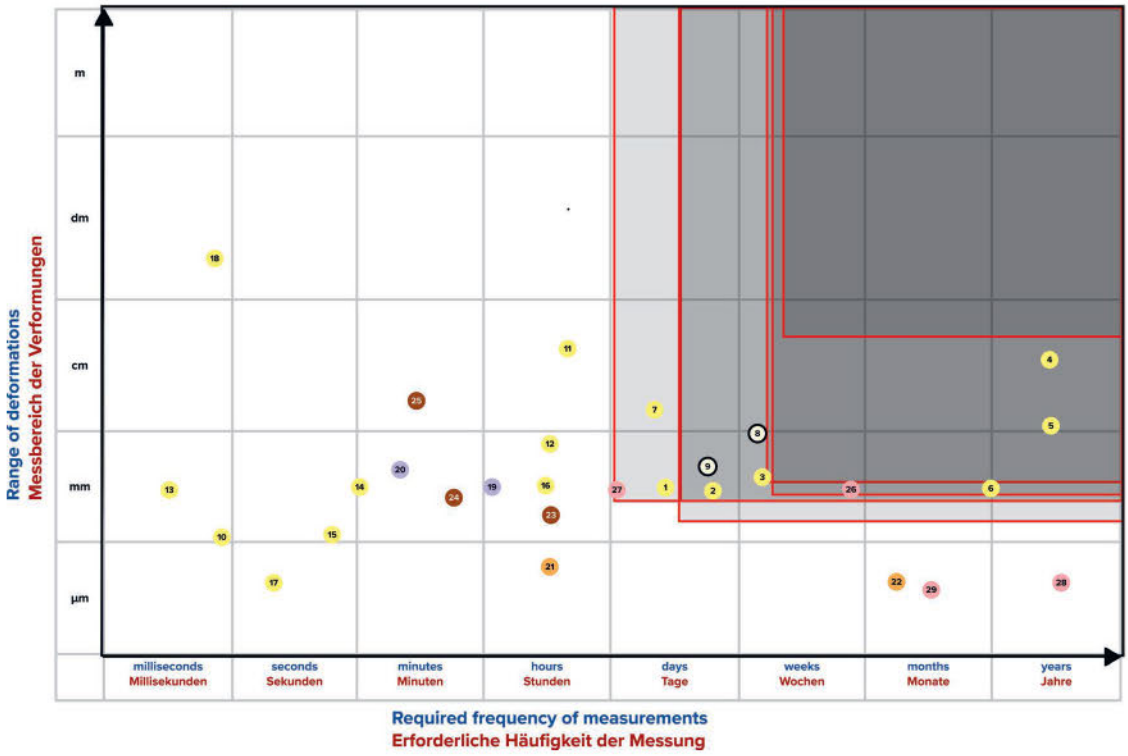

Bild 5: Ergebnis einer Umfrage in Bezug auf Häufigkeit der Messung und Messbereich der Verformungen aus dem FFG-Projekt BOOST [13]

Wesentliche Aspekte sind die geometrischen Randbedingungen, wie z. B. die schräge Blickrichtung der Satelliten oder die Ausrichtung einer Brücke sowie die zeitlich versetzten Satellitenaufnahmen. Die in der Blickrichtung der SAR-Antenne gewonnenen Verformungen d_{LOS} müssen final in die vertikale Verformungsrichtung d_{up} der Brücke umgerechnet werden, was im Allgemeinen nicht trivial ist [8]. Die Veränderung der Verformung in LOS beinhaltet außer der vertikalen Bewegungskomponente auch diejenigen in der Nord- und Ostrichtung, was im Bild 6 farbig dargestellt ist. Wesentlich dabei ist auch, dass Verschiebungsanteile in Flugbahnrichtung (Nord–Süd) nicht mit InSAR erfasst werden.

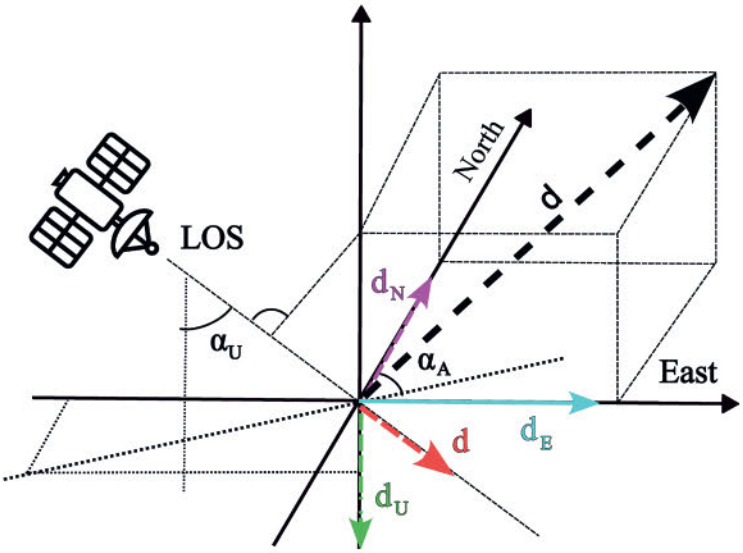

Bild 6: Koordinatentransformation nach [9]

Zur Genauigkeitssteigerung müssen Bauwerksverformungen kompensiert werden, die durch äußere Einflüsse wie v. a. Temperatur hervorgerufen werden. Dies ist essentiell, da Aufnahmezeitpunkte bis zu mehrere Tage auseinanderliegen und unterschiedliche Tageszeiten (morgens und mittags) umfassen können. Die derzeitigen Methoden der Satellitenbeobachtung betrachten hauptsächlich die absoluten Koordinatenverformungen der Zeitreihen. Im Gegensatz dazu haben die Autoren in [4], [10], [11] ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die Genauigkeit deutlich steigern lässt. Es wird ein Relativbezug von relevanten Betrachtungspunkten hergestellt und die Verformungen aufgrund von Temperaturdifferenzen zwischen den Aufnahmezeitpunkten mit einbezogen. Mit der entwickelten Methode des *Virtual Sensing* [11] werden zentrale Wetterdaten verwendet und damit auch historische Bauwerkstemperaturen ermittelbar.

Die Verformungen aus Temperaturdifferenzen werden in Richtung der Bauwerksachsen transformiert und können so bei der Kompensation berücksichtigt werden.

3.3 Umgang mit Phasenfehlern

Eine weitere Herausforderung, die sich bei der eigenständigen Prozessierung der InSAR-Daten, bspw. bei Verwendung von Cornerreflektoren, ergibt, ist die Korrektur des Phasenfehlers, auch als phase unwrapping bezeichnet. Der Abstand zwischen Satelliten und Rückstrahlpunkt ist aus der *Signallaufzeit nur* ungefähr bekannt. Genau gemessen werden kann jedoch die Interferenzverschiebung in Bezug auf die Wellenlänge innerhalb einer Phase. Eine exakte Definition, ob sich der nachfolgende Punkt in der gleichen oder in einer gegengleichen Phase befindet, ist nicht eindeutig möglich. Das bedeutet, dass bei einer fehlinterpretierten Phasenanzahl Abweichungen in der Verschiebung um ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge $n \cdot \lambda / 2$ vorliegen können (s. Bild 7 für λ = 5,5 cm für den Satelliten Sentinel-1A). Dieser Effekt wird als Phasenfehler bezeichnet. Gerade Bauwerksmessungen bei Großbrücken, bei denen in den Messungen innerhalb der Aufnahmen von Tagen aufgrund von Temperatursprüngen eine große Verformung auftreten kann, ist ein Phasenausgleich besonders relevant.

Eine Signalkorrektur zur Kompensation von Phasenfehlern ist für die Anwendung im Bauwerksmonitoring von entscheidender Bedeutung. In

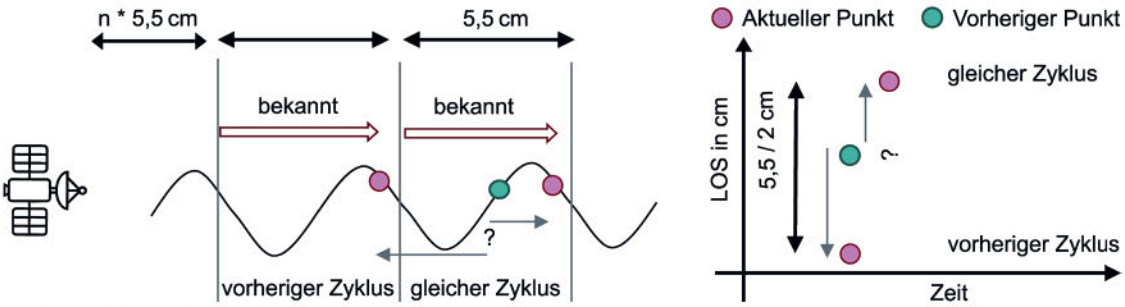

Bild 7: Grundschema der Korrektur von Phasenfehlern [10]

dem hier vorgestellten automatisierten Ansatz zur Minimierung bzw. Korrektur der Phasensprünge wird auf ein bekanntes affines thermisches Verformungsverhalten des Bauwerks aus mehreren Orbitalrichtungen aufgebaut. Voraussetzung dafür ist, dass eine ausreichend lange Zeitreihe von Satellitenmessungen mehrerer Orbits vorliegt, wofür i. d. R. ca. eineinhalb Jahre benötigt werden. Nur dann kann eine zufriedenstellende Korrelation zwischen der Temperatur und der gemessenen Verformung hergestellt werden. Von mindestens zwei Orbits bzw. Orbitalrichtungen aus wird dabei eine gegenseitige Korrektur der Phasenzahl in Blickrichtung LOS mit statistischen Methoden durchgeführt. Dazu wird eine Schwellwertabweichung vom gleitenden Mittelwert der betrachteten Orbits im Bereich des Bruchteils einer Wellenlänge ermittelt. Werte außerhalb des gewählten Schwellwertbereichs (i. d. R. ¼ λ) werden phasenkorrigiert – jeweils um den Wert der Hälfte der Wellenlänge (entweder addiert bzw. subtrahiert) – und es wird der Vorgang mehrmals wiederholt und erneut ein gleitender Mittelwert mit den korrigierten Daten gebildet. Dieser Prozess wird so lange iterativ durchlaufen, bis eine bestmögliche Übereinstimmung erzielt wird (Bild 7).

Die Vorgehensweise ist in Bild 8 exemplarisch für zwei unterschiedliche DESCENDING-Orbits ersichtlich, welche Aufnahmen zur selben Tageszeit lieferten. Der graue Bereich kennzeichnet den Schwellwertbereich mit einer Abweichung von maximal ± ¼ λ bezogen auf den gleitenden Mittelwert. Befindet sich ein Punkt außerhalb dieses Bereichs, wird die gesamte Zeitreihe wie zuvor beschrieben angepasst, bis alle Punkte innerhalb der grauen Zone liegen.

4 Messungen am Demonstrationsobjekt

4.1 Großbrücke Schottwien

Der Talübergang Schottwien an der Semmering Schnellstraße S6 (km 22,2) ist eine der größten Spannbetonbalkenbrücken in Österreich. Mit einer Länge von 632 m befindet sie sich in Niederösterreich südlich von Wien. Sie wurde im Freivorbau erstellt und überragt das Tal in einer Höhe von bis zu 130 m. Eröffnet wurde sie im Jahr 1989. Die Konstruktion besteht aus drei Betonpfeilern in Form von zwei Doppelstützen und einem Einzelpfeiler. Der höchste Pfeiler ist 75 m hoch. Die Hauptstützweite im Mittelfeld zwischen den zwei Doppelstützen beträgt 250 m (Pfeiler 3-1 und Pfeiler 2-2 in Bild 9).

Das Tragwerk besteht aus einem einzelligen Hohlkasten mit variabler Höhe. Beide Richtungsfahrbahnen befinden sich auf einem gemeinsamen Überbau. Die Brücke wird seit 1989 regelmäßig geodätisch vermessen, darüber hinaus ist seit 2020 ein digitales Schlauchwaagesystem am Tragwerk installiert [10]. Dieses wurde im Zuge eines Forschungsprojekts [15] in Betrieb genommen und kann als Referenzgröße herangezogen und mit den ausgewerteten Satellitendaten verglichen werden. Im Rahmen eines weiteren ASFINAG-Forschungsprojekts [10] wurden im Dezember 2021 am Mittelquerschnitt drei Cornerreflektoren – CR 1 und CR 7 über den beiden Doppelpfeilern sowie CR 4 in Feldmitte – installiert und über mindestens ein Jahr aufgezeichnet. Die Satellitendaten wurden prozessiert und entsprechend ausgewertet. Ebenso wurden die Daten des EGMS zum Vergleich aufbereitet.

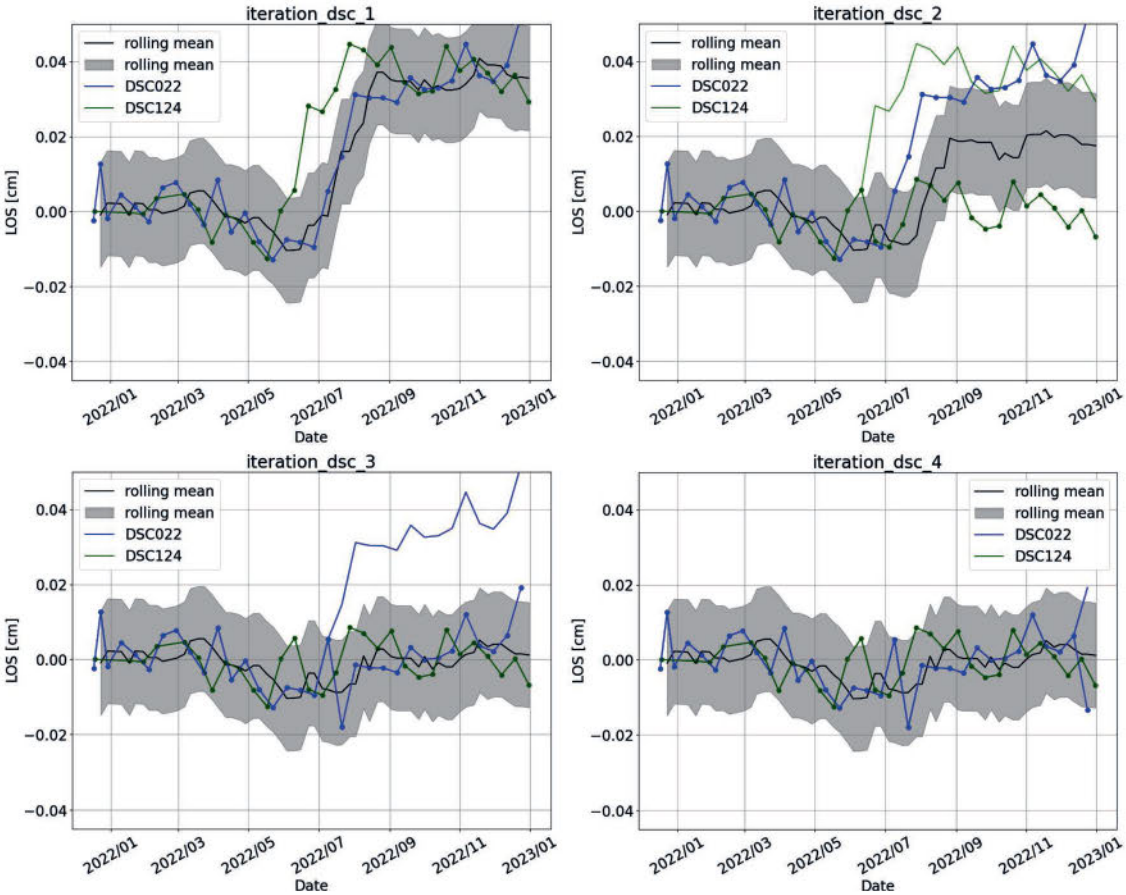

Bild 8: Iterative Methode zur Phasenkorrektur durch Bildung eines gleitenden Mittelwertes und Schwellwertbereichs mit einer maximalen Abweichung von ¼ λ

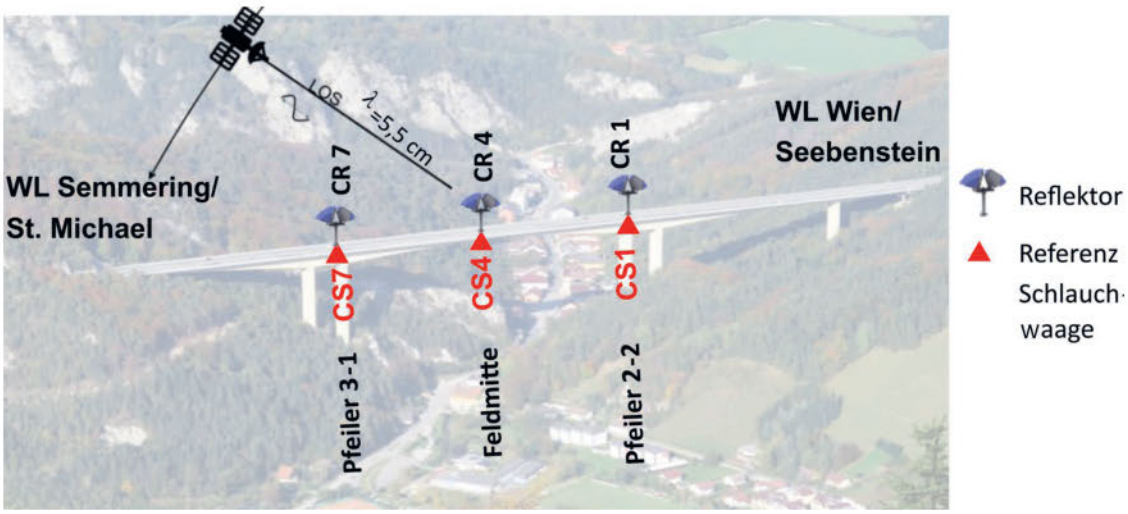

Bild 9: Talübergang Schottwien; Blick in Richtung Norden mit den Positionen der drei Cornerreflektoren CR 1, CR 4 und CR 7 in den Messpunkten CS 1, CS 4 und CS 7

4.2 Prozessierung der Daten der Cornerreflektoren

Es wurden die InSAR-Daten als Relativverformung der ausgewählten Messpunkte mit den Cornerreflektoren ausgewertet. Dazu wurde die relative vertikale Verformung im Messquerschnitt CS 4 (Tragwerksmitte) in Bezug auf den Messquerschnitt CS 7 (Pfeiler 3-1) für jeden Orbit getrennt aus den InSAR-Daten transformiert und den relativen Messwerten der digitalen Schlauchwaage gegenübergestellt. Die Temperaturkompensation der InSAR-Messung erfolgte mit einem einfachen Stabwerkmodell gemäß dem empirischen Modell nach der von AIT entwickelten *Virtual Sensing Method* [4]. Damit kann die Bauwerkstemperatur unter Verwendung von Rasterwetterdaten zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten mit einer Genauigkeit von ca. 1 °C in Bezug auf die Standardabweichung berechnet werden. Außerdem wird in dem Verfahren die mittlere Bauwerkstemperatur ermittelt, die besser mit der temperaturbedingten Brückenausdehnung korreliert als die vor Ort üblicherweise auf der Oberfläche gemessene Temperatur. Damit können die Zeitreihen temperaturkompensiert für den Jahresgang von 2022 ausgewertet werden.

Des Weiteren wurde die in Abschnitt 3.3 beschriebene Methode zur Korrektur der Phasenfehler angewendet. Die Ergebnisse der so errechneten Abweichungen für den Orbit DSC022 und für alle vier Orbits zusammen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Differenzverformung von Mittelfeld zu Pfeiler wurde gebildet und sowohl für die Referenzmessung (Schlauchwaage) als auch für die InSAR-Daten ausgewertet. Die Abweichungen wurden als einfache Standardabweichung σ über den Jahresgang von 2022 ermittelt. Die Auswertung erfolgte sowohl mit und ohne Anwendung der Temperaturkompensation. Deren Relevanz für die Genauigkeit ist klar ersichtlich, da die Abweichungen z. B. beim Orbit DSC022 von σ = 21,2 mm auf σ = 1,7 mm verbessert werden. Ohne Temperaturkompensation konnte der Algorithmus des Phasenausgleichs an dieser Brücke nicht zufriedenstellend angewendet werden.

4.3 Prozessierung EGMS-Daten

Der EGMS liefert konsistente und zuverlässige Informationen über natürliche und anthropogene Bodenbewegungen in den Copernicus-Teilnehmerstaaten und über nationale Grenzen hinweg [14]. Dies beinhaltet auch vorprozessierte Sentinel-1-Daten, welche seit 2016 aufgezeichnet und jährlich geupdatet werden. Die prinzipielle Eignung und das Potenzial wurden ebenfalls im Rahmen der zugrundeliegenden Projekte untersucht und für die Brücke Schottwien demonstriert. Die EGMS-Daten [14] wurden mit der Virtual-Sensing-Methode nach [4], [11] thermisch kompensiert aufbereitet. Die Bauwerkstemperaturen wurden rückwirkend für die Brücke für das Jahr 2021 ausgewertet und so die vertikalen Differenzverformungen berechnet.

In der Datenbasis des EGMS [14] sind die Daten nach Orbits getrennt gespeichert. Die Abdeckung der Brücke mit natürlichen Rückstrahlpunkten ist für eine Auswertung der entwickelten Algorithmen hoch genug. Die Punkte des Orbits DSC022, die die beste Abdeckung ergeben, sind in Bild 10 oben dargestellt. Die Daten sind seit 2016 für diese Brücke vorhanden, Wetterrasterdaten für meteorologische Analysen

Orbit		DSC022	Kombination von DSC022, ASC073, ASC146, DSC124
Punktdichte in [d]		12	im Mittel 3
Genauigkeit (σ Abw.) in [mm] – Relativbezug CS 4 zu CS 7	Ohne Temperaturkompensation	21,2[a)]	14,5[a)]
	Mit Temperaturkompensation (empirisches Modell)	1,7	2,9

[a)] Phasenausgleich hat nicht funktioniert (brückenspezifisch)

Tabelle 1: Abweichungen der Daten der Cornerreflektoren im Vergleich zur Schlauchwaagemessung – aufbereitet für die Differenz zwischen den Messpunkten CS 4 (Mittelfeld) und CS 7 (Pfeiler)

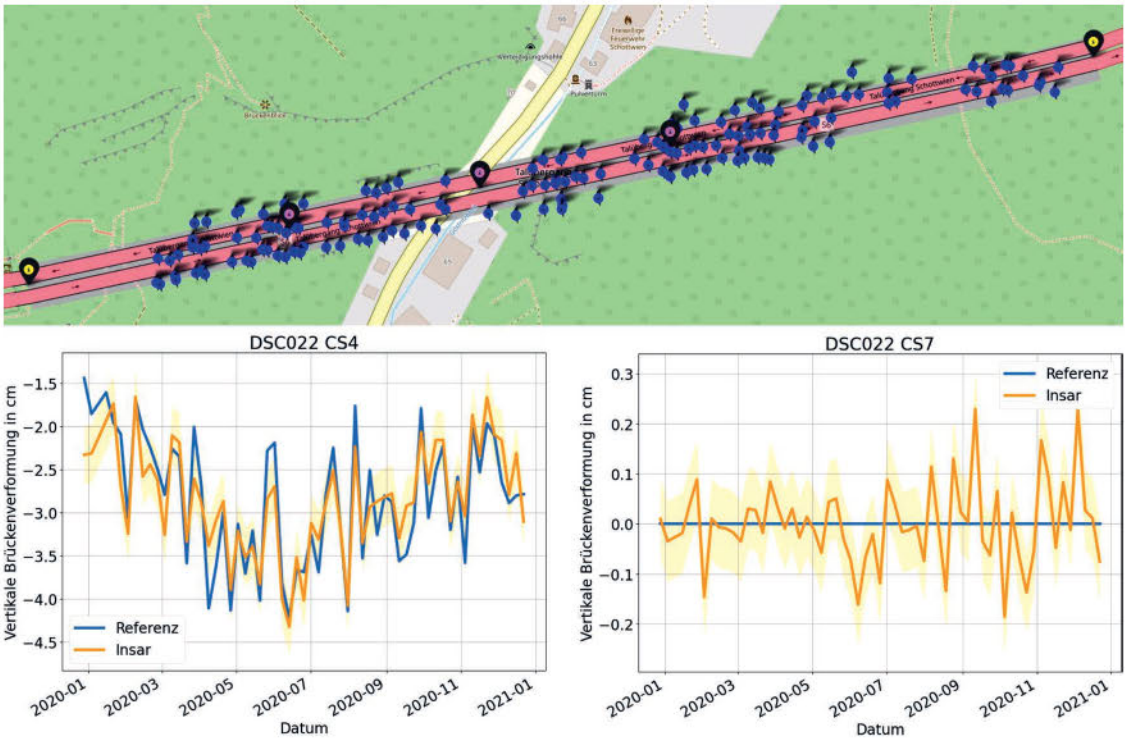

Bild 10: Orbit DSC022, oben: Übersicht der ausgewerteten Punkte auf der Brücke (gelb markiert sind die Widerlager), unten: Jahresgänge der Brücke für Mittelfeld CS 4 (links) und für Bezugspfeiler CS 7 (rechts) für das Jahr 2021

liegen ebenfalls vor, womit auch zurückliegende Verformungen entsprechend ausgewertet werden können.

Die Temperaturkompensation und die Umrechnung in die vertikale Verformung der Brücke haben ein stimmiges Bild über beinahe die gesamte Brückenlänge für das Jahr 2021 ergeben. Dazu wurden die Verformungen entlang von „Pfaden" referenziert zu einem Punkt in der Umgebung des Pfeilers (CS 7) bzw. des Mittelfelds (CS 4) geplottet (Bild 10 unten). Die blauen Linien kennzeichnen die Referenzmessung der Schlauchwaage, die gelben Linien zeigen die vertikalen Verformungen, die durch die Auswertung der InSAR-EGMS-Daten gewonnen wurden. Am Referenzpunkt CS 7 kann die Bandbreite der Abweichung direkt abgelesen werden, da dieser als Referenz definiert wurde und die Werte dort maximal bei ± 2 mm liegen. Bei Punkt CS 4 im Mittelfeld sind die Auswirkungen der Temperaturdifferenzen zwischen den Aufnahmezeitpunkten klar ersichtlich. Dennoch stimmen InSAR- und Schlauchwaagedaten visuell gut überein.

Die EGMS-Punkte für die Differenzverformung zwischen den bearbeiteten InSAR-Daten und den Daten des Referenzmesssystems wurden für 2021 und den Orbit DSC022 entlang des betrachteten Brückenfelds auch statistisch ausgewertet. Wird die Temperatur kompensiert, liegen alle Punkte in einer Genauigkeit bis $\sigma = 3{,}1$ mm. Ohne Kompensation ist die Genauigkeit mit $\sigma = 6{,}4$ mm nur halb so gut.

5 Zusammenfassung

InSAR-Monitoring hat prinzipiell ein großes Potential für die Bauwerksüberwachung, allerdings müssen dafür Genauigkeiten im Subzentimeterbereich erreicht werden. Es wurde gezeigt, wie dies mit der Korrektur der Phasensprünge und der Kompensation der thermischen Verformung der Messobjekte bei der Auswertung und Transformation der Satellitenmessdaten erreicht werden kann.

Am Demonstrationsobjekt Brücke Schottwien wurden frei verfügbare Sentinel-Satellitenmessdaten von Cornerreflektoren und natürlichen Rückstreupunkten untersucht, entsprechend aufbereitet und korrigiert sowie mit einer Referenzmessung, einer digitalen Schlauchwaage, verglichen. Die Verwendung von Cornerreflektoren erlaubt eine eindeutige Zuordnung der Messpunkte am Objekt. Allerdings müssen auch hier eventuelle Phasensprünge ausreichend korrigiert werden, weil sonst die gewünschten Genauigkeiten nicht erreicht werden. Dazu wurde ein Algorithmus auf Basis eines gleitenden Mittelwerts präsentiert. Der Algorithmus funktioniert bei Cornerreflektoren und bei im Brückenbau üblichen maximalen Verformungsunterschieden zwischen den Aufnahmezeitpunkten, zwischen denen mehrere Tage liegen, mit dem vorgeschlagenen Schwellenwert von $\pm \frac{1}{4} \lambda$ sehr gut.

Die erreichten Genauigkeiten eines Jahresgangs der vertikalen Relativmessungen aus InSAR-Daten für Cornerreflektoren haben mit Temperaturkompensation im Vergleich zum Referenzsensor eine Standardabweichung von $\sigma = 1{,}7$ bis 2,9 mm erreicht. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Methode für ein Verformungsmonitoring von Brücken sehr gut geeignet ist.

Das Verfahren funktioniert auch ohne Cornerreflektoren auf der Brücke nur mit den prozessierten natürlichen Rückstreupunkten (wie z. B. Maste, Lärmschutz, Kanten etc.) aus der EGMS-Datenbank sehr gut. Eine vorherige Analyse des generellen Brückenverhaltens ist jedoch unerlässlich, um Verformungstendenzen zu identifizieren und um die richtigen Korrekturen anzuwenden. Die von den Autoren entwickelte Virtual-Sensing-Methode in Kombination mit historischen Wetterdaten eignet sich hervorragend für die Temperaturkompensation und liefert bei einer Transformation der Sattelitendaten in die vertikale Verformungsrichtung vergleichbar gute Ergebnisse.

Ein Orbit (DSC022) liefert bei sehr guter Punktabdeckung ähnlich gute Ergebnisse wie Cornerreflektoren, andere Orbits ergaben größere Einzelstreuungen bei schlechterer Objektabdeckung. EGMS-Daten stehen zwar nur mit einem Zeitversatz von ca. einem Jahr zur Verfügung, erlauben aber historische Rückblicke bis ins Jahr 2016. Sie haben ein hohes Potenzial zur Überwachung von Langzeitverformungen und für rückblickende Auswertungen bei unvorhergesehenen Ereignissen in der Gegenwart.

Literatur

[1] FFG-Projektdatenbank: Projekt VerBewIng – Verformungsbasierte Bewertung von Ingenieurtragwerken. https://projekte.ffg.at/projekt/3200204 (Zugriff am 12.12.2024).

[2] Schlögl, M.; Dorninger, P.; Kwapisz, M.; Ralbovsky, M.; Spielhofer, R.: Remote Sensing Techniques for Bridge Deformation Monitoring at Millimetric Scale: Investigating the Potential of Satellite Radar Interferometry, Airborne Laser Scanning and Ground-Based Mobile Laser Scanning. PFG 90 (2022), 391–411 – https://doi.org/10.1007/s41064-022-00210-2.

[3] ESA: Sentinel Online. https://sentinel.esa.int/ (Zugriff zwischen 01.05.2023 und 19.11.2024).

[4] Vorwagner, A.; Kwapisz, M.; Leopold, P.; Ralbovsky, M.; Gutjahr, K. H.; Moser, T.: Verformungsmonitoring von Brücken mittels berührungsloser Satellitenradarmessungen. Beton- und Stahlbetonbau 119 (2024), 636–647 – https://doi.org/10.1002/best.202400017.

[5] Wegmuller, U.; Walter, D.; Spreckels, V.; Werner, C. L.: Nonuniform Ground Motion Monitoring with TerraSAR-X Persistent Scatterer Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 (2010) 2, 895–904 – https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2030792.

[6] Gutjahr, K.; Leopold, P.: Two Years of Sentinel-1 Observations over Austria. Poster at ESA Fringe 2017 in Helsinki (Finnland), 2017 – https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24810.93126.

[7] Hooper, A.; Segall, P.; Zebker, H.: Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. Journal of Geophysical Research 112 (2007) B7 – https://doi.org/10.1029/2006JB004763.

[8] Samieie-Esfahany, S.; Hanssen, R. F.; van Thienen-Visser, K.; Muntendam-Bos, A.: On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. In: Proc. of Fringe 2009 Workshop, 30.11.–04.12.2009 in Frascati (Italien), publ. in ESA SP-677, 03/2010, 7 S.

[9] Xiaoxuan, Y.; Busch, W.: Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekongurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines

radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. Tagungsband GeoMonitoring 2018, TU Clausthal, 2018, S. 119–138.

[10] Vorwagner, A.; Kwapisz, M.; Leopold, P.; Avian, M.; Schlögl, M.; Schlaffer, S.; Gutjahr, K. H.: SENBRIDGE – Sentinel for Bridge. Abschlussbericht, 2023 (unveröffentlicht).

[11] Kwapisz, M.; Vorwagner, A.; Leopold P.: Method for determining the relative vertical deformation of an object to be examined. Patent A50625/2023, angemeldet 08/2023.

[12] Lazecky, M.; Hlavacova, I.; Bakon, M.; Sousa, J. J.; Perissin, D.; Patricio, G.: Bridge Displacements Monitoring Using Space-Borne X-Band SAR Interferometry. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 10 (2017) 1, 205–210 – https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2587778.

[13] FFG-Projektdatenbank: Projekt BOOST – Bridge mOnitOring uSing senTinel-1. https://projekte.ffg.at/projekt/4373994 (Zugriff am 21.02.2024).

[14] European Ground Motion Service: Calibrated 2018-2022 (vector), Europe, yearly, Oct. 2023 – https://doi.org/10.2909/d92e61be-d6e8-4bc1-aa10-f742bf27bab9.

[15] Schlicke, D.; Nguyen, V. T.; Nguyen, D. T.; Dormann, E.; Gheorghiu, D.; Furtner, P.; Fritz, M.: Ganzheitliche Betrachtung des Verformungsverhaltens von Freivorbaubrücken aus Spannbeton – ConDef. Ergebnisbericht, Projekt VIF 2016, 2016, 142 S. – online: https://projekte.ffg.at/projekt/2738389.

Bildquellen

Bild 1 links: ESA [14]

Bild 1 rechts: nach [14], open Streetmap und ESA, bearbeitet von AIT

Bild 2: ESA, bearbeitet von AIT, entnommen aus [4]

Bild 3: AIT (nach [7])

Bilder 4, 5, 7, 8, 10 (unten): AIT

Bild 6: Xiaoxan Yin, bearbeitet von AIT

Bild 9: ASFINAG, bearbeitet von AIT

Bild 10 (oben): open Streetmap, bearbeitet von AIT