

# Monitoring einer Schleuse mittels satellitengestützter DInSAR-Techniken

PHILIPP J. SCHNEIDER<sup>1</sup> & UWE SÖRCEL<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Die Auswertung hochaufgelöster Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten mittels Persistent Scatterer Interferometry (PSI) kann kleinste Oberflächenbewegungen detektieren und bietet so eine Möglichkeit, bodengebundenen Überwachungsmessungen durch eine Satellitentechnik zu ergänzen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes soll ein Schleusenbauwerk überwacht werden. Es kann gezeigt werden, dass sich die PSI Technik dazu eignet, kleinräumige Deformationen im Umfeld der Schleuse aufzudecken. Die Auswertung zweier verschiedener Beobachtungsgeometrien erlaubt eine Dekomposition der Line-of-Sight-Messungen in vertikale und horizontale Bewegungen. Eine statistische Analyse der Zeitserien mittels EOF legt nahe, dass sich die Bewegung des Bauwerks hauptsächlich auf einen Jahresgang zurückführen lassen.*

## 1 Motivation

Satellitengestützte differentielle SAR-Interferometrie-Methoden (DInSAR) wie die Persistent Scatterer Interferometry (PSI) haben sich mittlerweile als Verfahren zum Monitoring flächenhafter Deformationsprozesse der Erdoberfläche etabliert (CROSETTO 2016), etwa zur Überwachung von Vulkanen oder langsam fortschreitenden Hangrutschungen. Klassische Ansätze zur Bauwerküberwachung wie Nivellement und kontinuierliche Totalstationsmessungen liefern zwar hochgenaue Koordinatenwerte, die jedoch auf eine vergleichsweise geringe Menge von Messpunkten beschränkt bleiben müssen.

In einem Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart wird die Schleuse Hessigheim am Neckar überwacht. Das Umfeld der Schleuse sinkt durch instabilen Boden und untergrabenden Wasserfluss um bis zu 2 cm pro Jahr ab (KAUTHER & WOLF 2018).

In diesem Projekt untersuchen wir unter Anderem das Potential von PSI, die genannten traditionellen Methoden zur Überwachung von Wasserbauwerken zu ergänzen, insbesondere was die Ausweitung der Überwachung in die Fläche anbelangt.

## 2 Methoden

Im Folgenden werden wir zunächst auf die verwendeten Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten eingehen, insbesondere was deren zeitliche und räumliche Auflösung anbelangt. Des Weiteren wird die PSI-Technik mit ihren speziellen Stärken und Einschränkungen erklärt. Durch Fusion zweier Messreihen, aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtung, kann ein umfassenderes Bild des tatsächlichen Deformationsgeschehens gewonnen werden. Schlussendlich wenden wir Methoden der Zeitserienanalyse an, um räumliche und zeitliche Muster aus den PSI Ergebnissen ableiten.

---

<sup>1</sup> Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: [philipp.schneider, uwe.soergel]@ifp.uni-stuttgart.de

## 2.1 Datengrundlage

Für die hier beschriebene Analyse wurden hochaufgelöste SAR Bilder des Satelliten TerraSAR-X (TSX) über einem Zeitraum von 4.5 Jahren verwendet (Siehe Abb. 1). Die Auflösung von TSX im „High Resolution Spotlight Mode“ beträgt etwa 1m x 1m. Der Satellit arbeitet im X-Band (9.65 GHz), was einer Wellenlänge von etwa 3 cm entspricht. Für den Zeitraum 2018 bis 2019 liegen zwei Bildstapel vor (aufsteigender und absteigender Orbit), sodass die LOS-Messungen in horizontale und vertikale Komponenten zerlegt werden können. Für den Zeitraum 2015 bis Ende 2017 ist hingegen nur der absteigende Orbit verfügbar. Das kommerzielle TSX-System ist theoretisch dazu in der Lage, alle 11 Tage ein Bild von derselben Position im Orbit aufzunehmen, jedoch können konkurrierende Aufnahmen höherer Priorität zum Aufnahmeverzicht und somit zu Datenlücken führen. Es wurde in einer vorherigen Studie auch untersucht, ob sich in ähnlicher Weise die frei verfügbaren Sentinel-1-Daten für eine PSI-Analyse des Studiengebiets nutzen lassen. Durch den räumlichen Auflösungsunterschied der beiden Systeme ist hier jedoch mit einer zu geringen PSI-Punktdichte zu rechnen, sodass die kleinräumigen lokalen Deformationsgeschehen nicht zufriedenstellend abgebildet werden können.

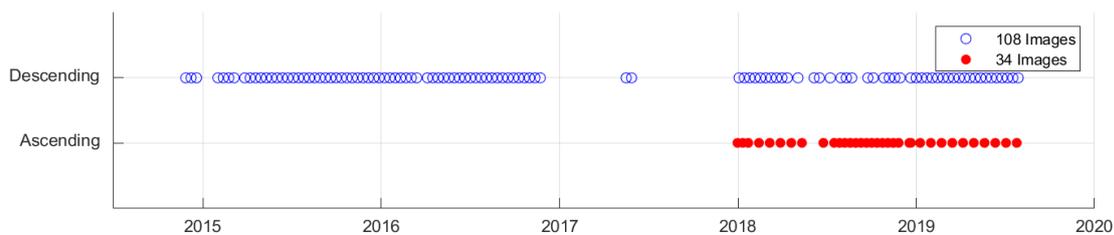


Abb. 1: Aufnahme Zeitpunkte der TSX Bilder. Blau: Absteigender Orbit. Rot: Aufsteigender Orbit.

## 2.2 Persistent Scatterer Interferometrie

Die SAR-Auswertetechnik Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) zählt zu einer speziellen Klasse der DInSAR-Methoden. Die prinzipielle Idee ist hierbei, in einer Zeitreihe von SAR-Satellitenbildern solche Pixel zu detektieren, welche über die Zeit ein „kohärentes“ also stabiles Signal aufweisen. SAR-Bilder liegen komplexwertig vor, was eine Analyse des zeitlichen Verlaufs der Phasenlage dieser Pixel ermöglicht, welche wiederum Rückschlüsse auf den zugrundeliegenden Deformationsverlauf erlaubt (FERRETTI et al. 2000).

PSI ist ein opportunistisches Verfahren, das bedeutet, dass die genaue Position und Verteilung der PS-Punkte vor der Auswertung nicht bekannt ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei höherer räumlicher Auflösung der ausgewerteten Bilder mehr PS Punkte pro Fläche erhalten werden. Die Rückstreuungseigenschaften von Metall und rechtwinkligen Strukturen führen dazu, dass auf menschengemachten Objekten mit einer hohen PS-Punktdichte zu rechnen ist.

PSI hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten zu einem gutverstandenen Standardverfahren entwickelt, für das auch kommerzielle Auswertungsprogramme angeboten werden (CROSETTO 2016). Für eine aussagekräftige Analyse wird in der Regel eine Zeitreihe von mindestens 20 Bildern vom selben Orbit benötigt.

In der PSI-Auswertung kann neben der 3D-Lage auch eine Deformationszeitserie für jeden der Reflexionspunkte bestimmt werden. Unter bestimmten Voraussetzungen ist das Verfahren dazu in der Lage, Geländedeformationen in der Größenordnung von Millimetern aufzudecken. Wird von

einem linearen Deformationsgeschehen ausgegangen, kann die Geschwindigkeit durch lineare Regression hierbei mit besser als 1mm/Jahr bestimmt werden (FERRETTI et al. 2001).

### 2.3 Line-of-Sight Dekomposition

Von einem beliebigen 3D-Deformationsgeschehen kann bei interferometrischen SAR-Auswertungen nur jene Komponente erfasst werden, welche dessen Projektion auf den sogenannten „Line-of-Sight“-Vektor (LOS), also der Radialrichtung bezogen auf den Satelliten, entspricht (Abb. 2). Im Rahmen des Projekts werden deshalb zwei parallel erfasste Zeitreihen von TerraSAR-X-Daten betrachtet. Es werden hochauflösende TSX-Bilder von auf- und absteigenden Satellitenbahnen verarbeitet und zunächst unabhängig voneinander mit der PSI-Methode analysiert, was beutet, dass die Szene einmal von Westen und einmal von Osten her beobachtet wurde. Die Zweiorbitkonfiguration ermöglicht es, die LOS-Messung in horizontale und vertikale Komponenten zu zerlegen und mögliche Verformungen zu validieren. Um die beiden unabhängigen Messungen zu verknüpfen, muss als erster Schritt eine Interpolation der punkthaften Messungen auf ein gleichförmiges Gitterraster durchgeführt werden. Anschließend kann so für jede Gitterzelle eine Zerlegung in horizontale und vertikale Bewegungen durchgeführt werden.

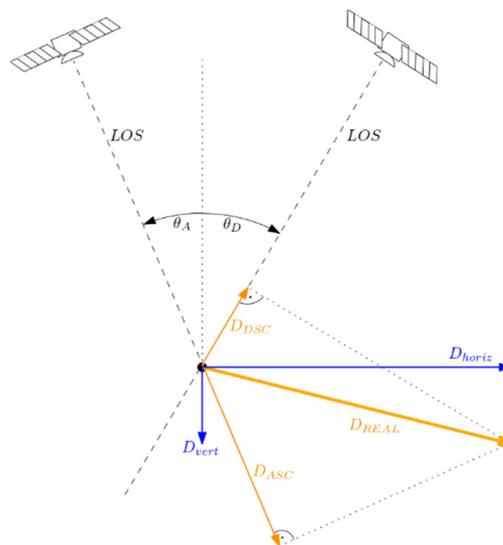


Abb. 2: Die tatsächliche Bewegung  $D_{REAL}$  wird auf den Line-Of-Sight Vektor des Satelliten projiziert. Aus zwei unabhängigen Messungen kann auf die vertikale und horizontale Komponente geschlossen werden.

Die horizontale und vertikale Komponente  $D_{horiz}$  und  $D_{vert}$  ergeben sich aus der Lösung folgenden Gleichungssystems,

$$\begin{bmatrix} D_{ASC} \\ D_{DSC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_A & \sin \theta_A / \cos \Delta\alpha \\ \cos \theta_D & \sin \theta_D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{vert} \\ D_{horiz} \end{bmatrix}$$

wobei  $\theta$  der Einfallswinkel und  $\Delta\alpha$  der Unterschied im Azimut der Satelliten sind (vgl. Abb. 2) (SAMIEI ESFAHANY et al. 2010).

## 2.4 Zeitserienanalyse mittels Empirischer Orthogonaler Funktionen

Die PSI-Punkte enthalten neben der recht groben Lage- und Höheinformation (Genauigkeiten im Meter-bis Dezimeterbereich, unter anderem abhängig von der Anzahl der SAR-Bilder) auch die LOS-Bewegung des Punktes über die Zeit. Da Aufnahmen über mehrere Jahre vorliegen, bietet die Auswertung einer Zeitserie von 2015 bis 2019 die Möglichkeit, mittels statistischer Verfahren wie „Empirischer Orthogonaler Funktionen“ (EOF) unterschiedliche Bewegungsmuster zu identifizieren und so lineare Trends von saisonal bedingten Jahregängen zu trennen (BJORNSSON & VENEGAS 1997).

Sortiert man die  $N$  Deformationszeitserien in einem Gebiet, welche jeweils aus  $M$  Messungen bestehen in eine Matrix  $F$

$$F = \begin{bmatrix} d_1(t_1) & d_2(t_1) & \dots & d_{N-1}(t_1) & d_N(t_1) \\ d_1(t_2) & d_2(t_2) & \dots & d_{N-1}(t_2) & d_N(t_2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

und führt eine Singulärwertzerlegung (ökonomische Variante) dieser durch,

$$U \cdot S \cdot V^T = svd(F)$$

so erhält man mit den Spalten von  $U$  orthogonale Funktionen  $M$ , sogenannte „Moden“.

Durch Analyse der Spur von  $S$  kann diesen Moden ein entsprechender Anteil der Gesamtvarianz der Zeitserien zugeordnet werden. Typischerweise gehen lineare Trends oder periodische Signale mit signifikanten Moden einher. Enthalten die Zeitserien allerdings weitere Auffälligkeiten, welche aus einer fehlerhaften Prozessierung oder dem Einfluss der Atmosphäre herrühren können, so bilden diese auch einen Modus aus.

Möchte man nun feststellen, welche der Zeitserien hauptsächlich aus einer der Moden aufgebaut ist, können die Spalten von  $V$  analysiert werden, deren Einträge einer Gewichtung der Moden zur Rekonstruktion der einzelnen Zeitserien entsprechen.

## 3 Ergebnisse

Aufgrund der hohen PSI-Punktdichte der TerraSAR-X Ergebnisse können flächenhafte Deformationsprozesse beobachtet und lokal eingegrenzt werden. So zeigt Abb. 3 Bereiche mit kritischer Absenkung deutlich. Diese decken sich mit Erwartungsbereichen, die sich durch geophysikalische Modellierung der Beschaffenheit des Untergrundes und der darauf einwirkenden Kräfte ergeben, welche die Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt hat (KAUTHER & SCHULZE 2015).

Die gemittelten Deformationszeitserien in den markierten Bereichen „Osten“ in Abb. 3 sind in Abb. 4 jeweils für die aufsteigende und absteigende Messung dargestellt, es zeigt sich hierbei signifikante, lineare Absenkungen von ca. 15mm/Jahr in LOS Richtung. Die Unterschiede in der beobachteten Geschwindigkeit können hierbei auf die leicht unterschiedlichen Einfallswinkel der LOS zurückgeführt werden. Die Dekomposition der beiden Messungen in ihre vertikale und horizontale Komponente in Abb. 3 zeigt, dass das Deformationsgeschehen vornehmlich von vertikale Natur ist. Es bestätigt die Absenkungen am südöstlichen Ufer, sowie kleinere Setzungen im Norden und Nordwesten.

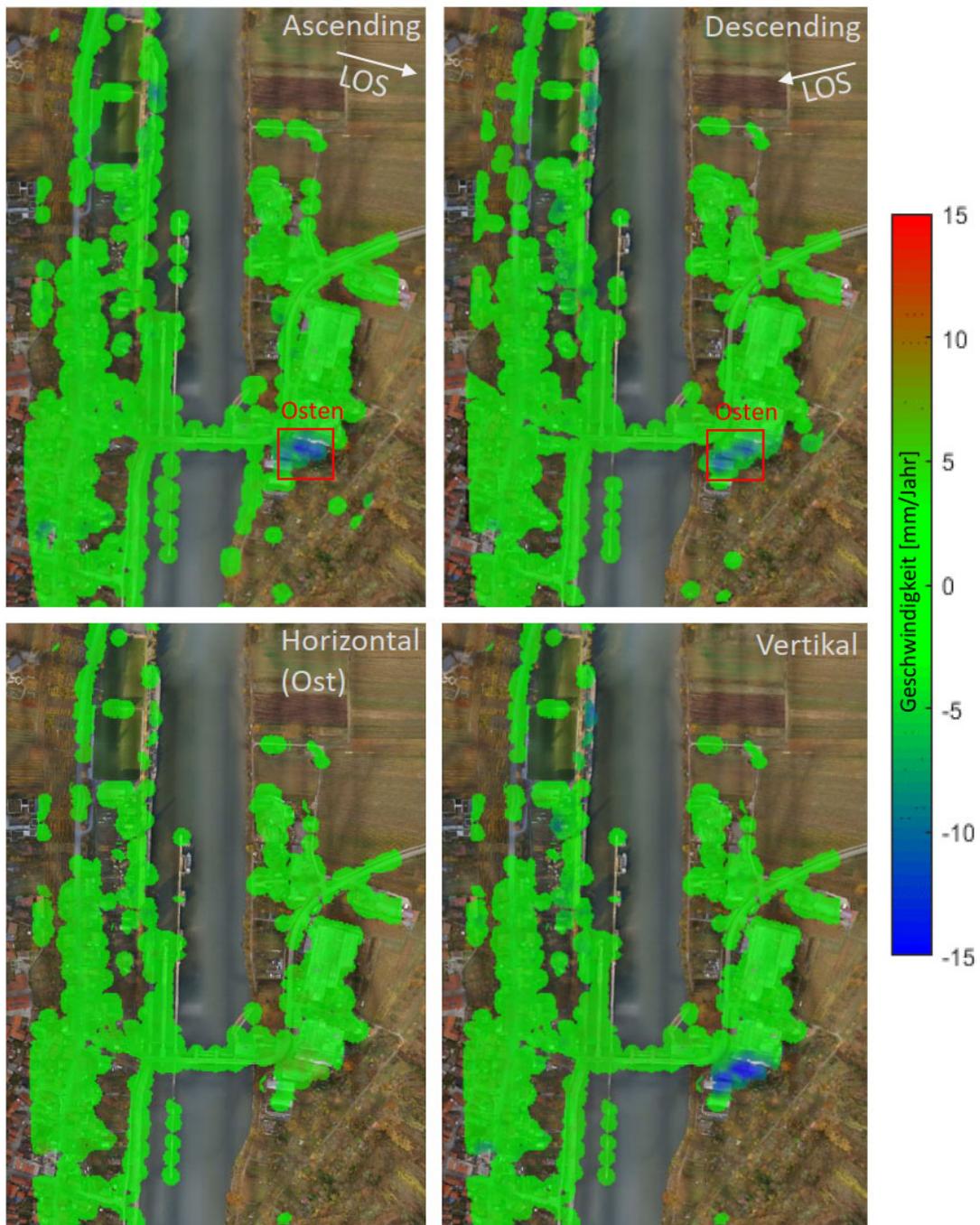


Abb. 3: Oben: LOS-Deformationen in mm/Jahr aus TSX PSI (auf Raster) mit ausgewähltem Bereich „Osten“. (Links: ascending, rechts descending Orbit). Darstellung der Zeitserien der markierten Bereiche in Abb. 4. Unten: Horizontale und vertikale Bewegung nach Dekomposition.

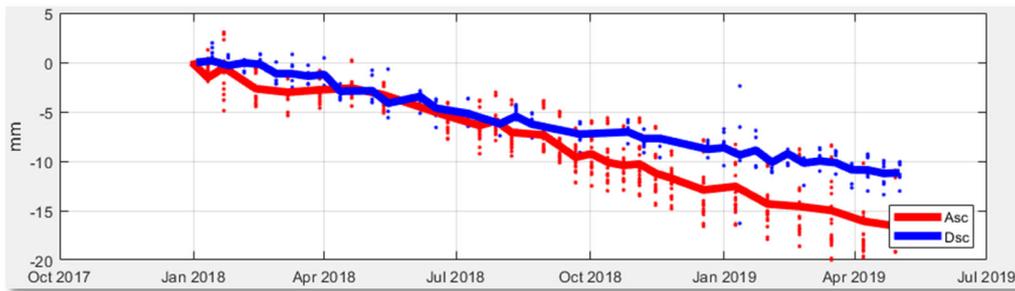


Abb. 4: Zeitreihe der LOS-Deformationen im markierten Gebiet „Osten“ in Abb. 3. Rot: Aufsteigender Orbit, blau: Absteigender Orbit.

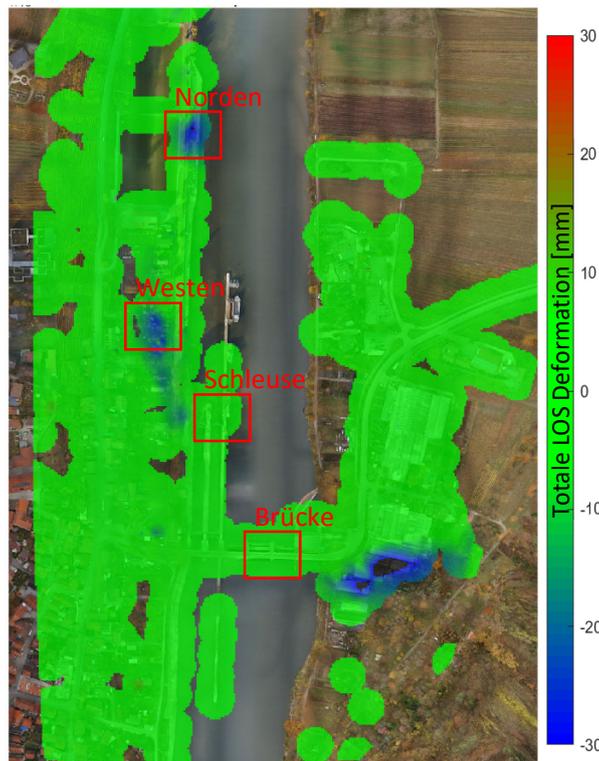


Abb. 5: LOS-Deformationen für gesamten verfügbaren Bilder des absteigenden Orbits (2015-2019). Die Zeitserien für die markierten Bereiche sind in Abb. 6 dargestellt.

Durch die Auswertung der mehrjährigen Zeitserie können die Bodenbewegungen am südöstlichen Ufer bestätigt werden. Des Weiteren heben sich nun die Deformationen in den Bereichen „Norden“ und „Westen“ in Abb. 5 deutlich vom Messrauschen ab. Eine Analyse der Punkte auf dem Schleusenbauwerk („Schleuse“ und „Brücke“ in Abb.5) zeigt lediglich eine periodische Bewegung, welche als Jahrgang identifiziert werden kann (Abb.6).

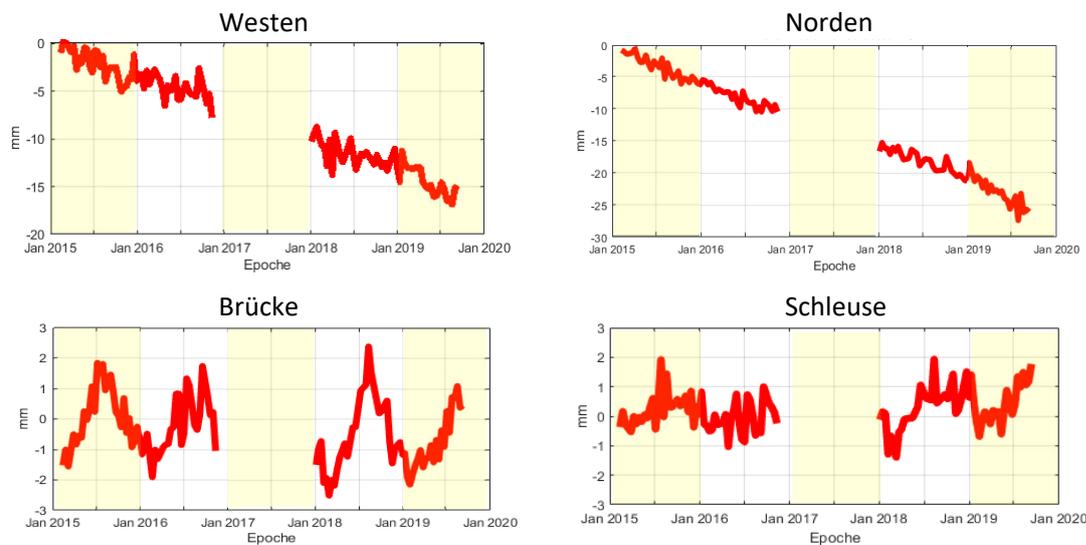


Abb. 6: Die LOS Deformationen für die Markierten Bereiche in Abb. 5. Die Bereiche „Brücke“ und „Schleuse“ weisen einen deutlichen Jahresgang auf, wohingegen „Westen“ und „Norden“ einen klaren linearen Trend aufweisen.

Die Dekomposition der Zeitserien des gesamten absteigenden Bildstapels von 2015 bis 2019 in Empirische Orthogonale Funktionen (EOF) zeigt, dass die beiden signifikantesten Bewegungsmuster (Moden) ein linearer Trend und ein Jahresgang sind.

Eine Analyse der Gewichtungen dieser beiden Moden für jeden der einzelnen Punkte ergibt, dass die zuvor detektierten Deformationsbereiche im Südosten und Westen der mehrjährigen linearen Bewegung unterliegen. Für den Schleusenbereich liegen keine generellen Trends vor. Die dort beobachteten Bewegungen können plausibel durch saisonale Effekte erklärt werden, welche periodischen auftreten. In Abb. 7 werden alle PS-Punkte auf der Schleuse und dem Uferbereich dargestellt. Alle Punkte, deren Deformationshistorie sich hauptsächlich durch eine Mode beschreiben lässt sind farbig dargestellt. Die Einfärbung gibt an wie groß der Betrag der Gewichtung der jeweils darunter dargestellten Mode ist.

## 4 Diskussion

Wir konnten zeigen, dass sich die PSI-Analyse von hochaufgelösten TerraSAR-X Daten über dem Zeitraum von einem Jahr dazu eignet, kleinräumige, lineare Deformationen in der Größenordnung von kleiner als 1cm/Jahr zuverlässig zu erkennen. Durch die geometrische Dekomposition zweier Line-of-Sight-Messungen ergab sich, dass die Verformungen hauptsächlich vertikaler Natur sind. Die Analyse einer mehrjährigen Zeitserie bestätigt die zuvor ausgemachten Bereiche einer Geländebewegung und kann weitere, langsame Deformationen aufdecken. Durch die EOF-Analyse konnten die Bewegungsmuster in lineare und periodische Bewegungen getrennt werden. Daraus geht die Erkenntnis hervor, dass das Schleusenbauwerk an sich, neben dem unkritischen Jahresgang, keiner signifikanten Bewegung mehr unterliegt.

Ausgehend von dieser Erkenntnis schlagen wir vor, die Überwachungsmessungen der Schleuse auch auf die umliegenden Bereiche auszudehnen. Um eine Einschätzung zu bekommen, in wiefern

Auslaugungsprozesse die Ursache für die Senkungen sind, könnten ggf. weitere geologische Untersuchungen und eventuell Sondierungsbohrungen in den von uns detektierten Bereichen durchgeführt werden.

Die PSI-Technik stellt sich zusammenfassend als nützliches Werkzeug in einem umfassenden Monitoringkonzept dar. Eine Ausweitung und gegebenenfalls routinemäßige Überprüfungen aller Binnenschleußen könnte helfen, Deformationen im Umland frühzeitig zu erkennen und existierende Messprogramme in der Fläche zu ergänzen.

Die durch die zukünftig weiter steigende Verfügbarkeit von hochaufgelösten SAR-Daten kann davon ausgegangen werden, dass sich satellitengestützte InSAR-Verfahren zu einer weiteren Standardmethode im Repertoire des Bauwerksmonitoring entwickeln.

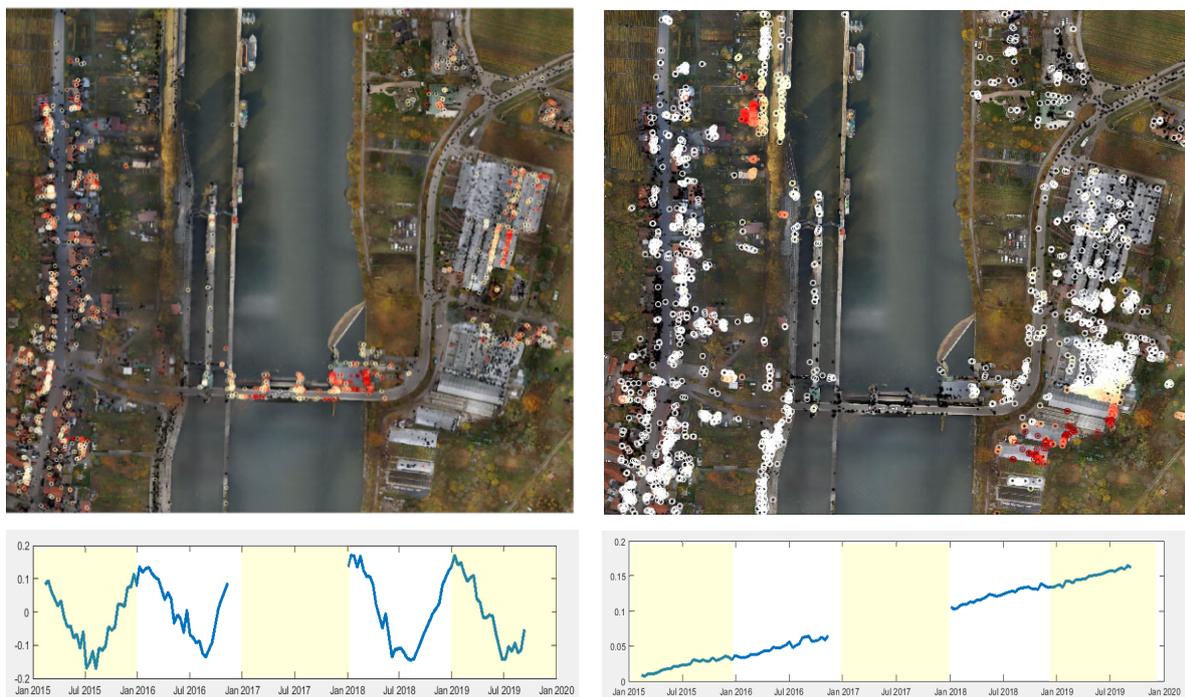


Abb. 7: Links: Punkte die sich hauptsächlich durch die „Jahresgang“ Mode (unten links) beschreiben lassen. Rechts: Punkte die sich hauptsächlich durch die „Lineare Mode“ (unten rechts) beschreiben lassen. Es wurden die Spalten von  $V$ , wie in Kap. 2.4 beschrieben analysiert und die Punkte mit dem Betrag der Gewichtung farbcodiert eingefärbt, sodass auch eine hohe negative Gewichtung der Mode als hoher Anteil dargestellt wird.

## 5 Literaturverzeichnis

- BJORNSSON, H., & VENEGAS, S. A., 1997: A Manual for EOF and SVD Analyses of Climatic Data. Centre for Climate and Global Change Research Report No. 97-1, 52.
- FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F., 2001: Permanent scatterers in SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 8-20.
- FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F.: 2000: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR Interferometry. Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on, 2202-2212.
- KAUTHER, R., & SCHULZE, R., 2015: Detection of subsidence affecting civil engineering structures by using satellite InSAR. Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Australian Centre for Geomechanics, 207-218.
- KAUTHER, R., & WOLF, C., 2018: Detection of Cavities in Karst Subsoil Affecting Civil Engineering. IFMGM 2018, 89-93.
- MICHELE CROSETTO, O. M.-G., 2016: Persistent Scatterer Interferometry: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 78-89.
- SAMIEI ESFAHANY, S., HANSEN, R., THIENEN-VISSER, K., & MUNTENDAM-BOS, A. G., 2010: On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. Fringe 2009 Proceedings.