

X- und C-Band Multi-Sensor-Fusion zur Erkennung von Deformationsmustern an Staubauwerken in Deutschland mittels Radarinterferometrie

Jonas Ziemer, Jannik Jänichen, Clémence Dubois, Gideon Stein, Maha Shadaydeh, Joachim Denzler und Christiane Schmillius

Gefördert durch:
 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. Hintergrund und Motivation



1. Hintergrund und Motivation

- Deformationsmessungen mittels PSI durch Sentinel-1 C-Band-Daten an den meisten Staubauwerken schon gut möglich, **ABER:**
 - Bei Wellenlänge von 5 cm (C-Band) können weniger PS-Punkte detektiert werden, als mit kürzeren Wellenlängen (z.B. X-Band)
 - An vielen Staubauwerken werden deshalb zu wenige PS-Punkte für eine aussagekräftige Deformationsanalyse der einzelnen Bauwerksabschnitte gefunden
 - daher streben wir eine **räumliche** Multi-Sensor-Fusion aus C- und X-Band-Daten an, um die Dichte an PS-Punkten zu erhöhen

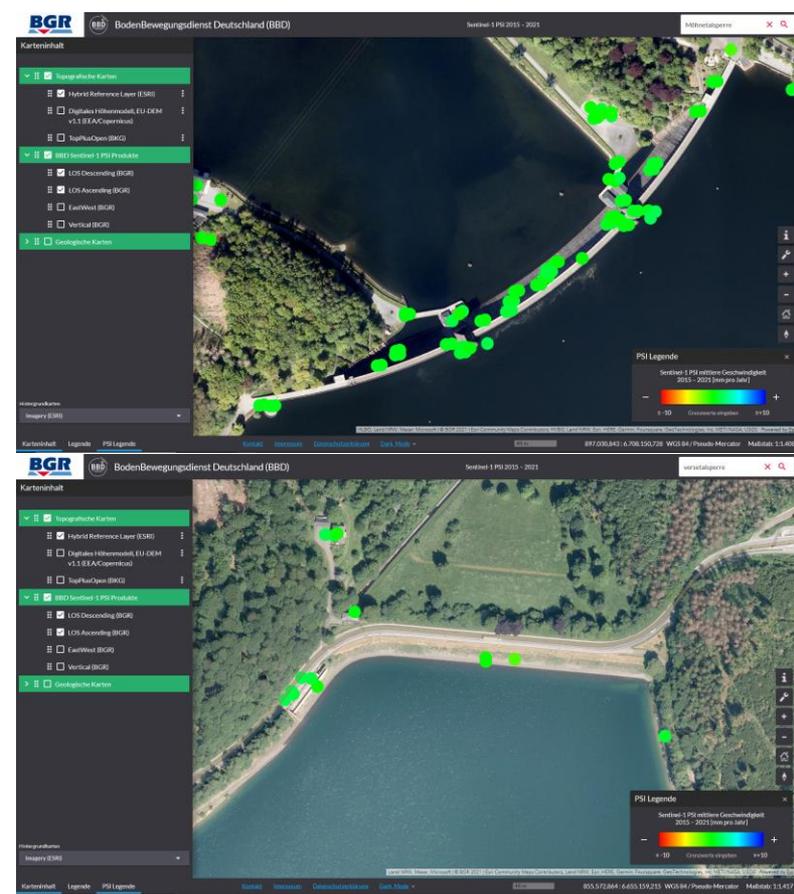


Abb.1: Vergleich der detektierten PS-Punkte in LOS an der Möhnestaumauer (oben) und am Versedamm (unten). (Quelle: Bodenbewegungsdienst Deutschland)

1. Hintergrund und Motivation

- Deformationsmessungen mittels PSI durch Sentinel-1 C-Band-Daten in der Regel alle 6 Tage möglich, **ABER**:
 - Beobachtungszyklus kann durch Daten anderer Satelliten/Orbits noch weiter verkürzt werden
 - d.h. dichtere Zeitserie möglich
 - Kann Datenlücken oder kompletten Ausfall eines Satelliten kompensieren
 - daher streben wir eine **zeitliche** Multi-Sensor-Fusion aus C- und X-Band-Daten an, um die Dichte der Zeitreihe zu erhöhen

Satellit Sentinel-1B aufgegeben

Europas Radarpanne in der Umlaufbahn

Ende des vergangenen Jahres fiel plötzlich die Stromversorgung der Radarantenne des Satelliten Sentinel 1-B aus. Alle Bemühungen, die Elektronik wieder in den Griff zu bekommen, sind fehlgeschlagen. Nun haben die Fachleute den Satelliten aufgegeben.

Von Dirk Lorenzen | 07.10.2022

▶ Hören 02:32

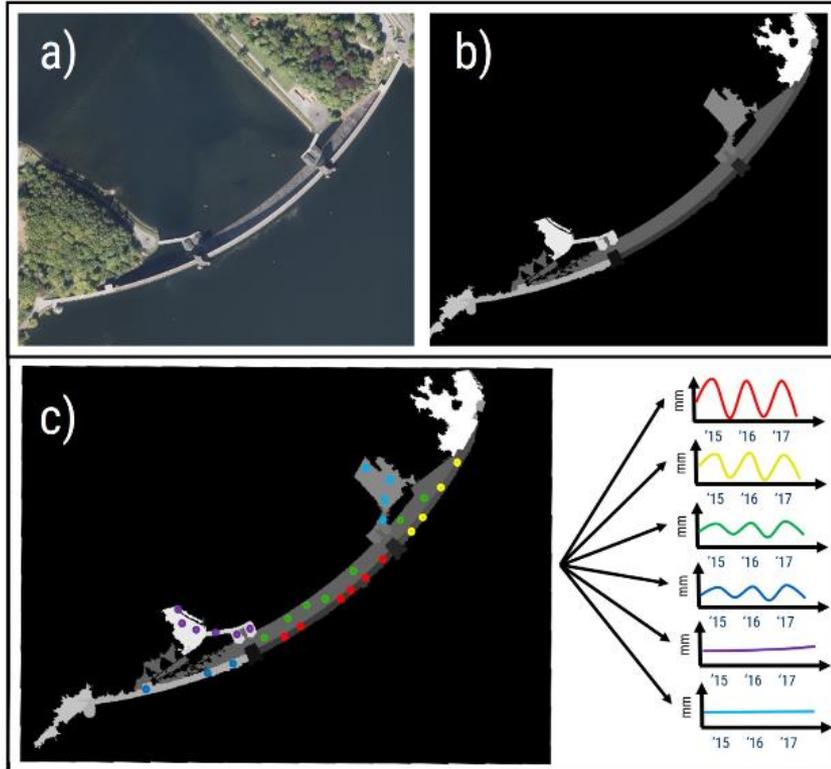
↓ Audio herunterladen



Abb.2: Sentinel-1B Radarsatellit der ESA.

(Quelle: <https://www.deutschlandfunk.de/satellit-sentinel-1b-aufgegeben-100.html>)

1. Hintergrund und Motivation



- Ableiten von Clustern/Segmenten des gleichen Deformationsmusters
- Rückschlüsse ziehen auf das (unterschiedliche) **Bewegungsverhalten verschiedener Bauwerksabschnitte**
- **Erkennung von Anomalien** oder Bewegungstrends, die z.B. durch klimatische Veränderungen verursacht werden
- **Vorhersage von zukünftigen Bewegungen** an den Stauanlagen, z.B. durch KI
- Unterstützen und Erweitern der bisher eingesetzten Techniken zur **Anlagenüberwachung**

Abb.3: Segmentierung von Staubauwerken (b) auf Basis von frei verfügbaren Geodaten (a) als Grundlage für die Analyse von Multi-Sensor-PSI-Zeitreihen (Sentinel-1 & TerraSAR-X) mit entsprechenden Bewegungsmustern pro Segment (c).

(Quelle Bild a): Digitales Orthofoto; <https://www.geoportal.nrw/>)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

2. Praktische Umsetzung



2. Praktische Umsetzung – Multi-Sensor-Fusion

- Untersuchungsgebiet:
 - Insgesamt 4 Stauanlagen des Ruhrverbands im Sauerland, NRW

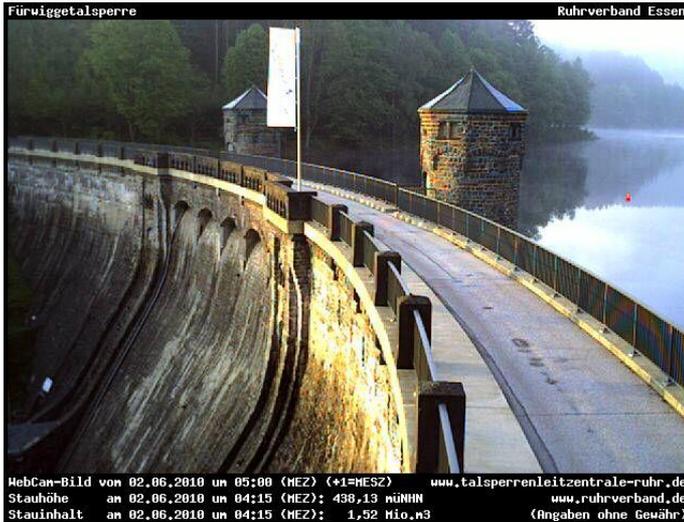


Abb.4: Fürwiggetalsperre, Meinerzhagen. (Quelle: Ruhrverband)

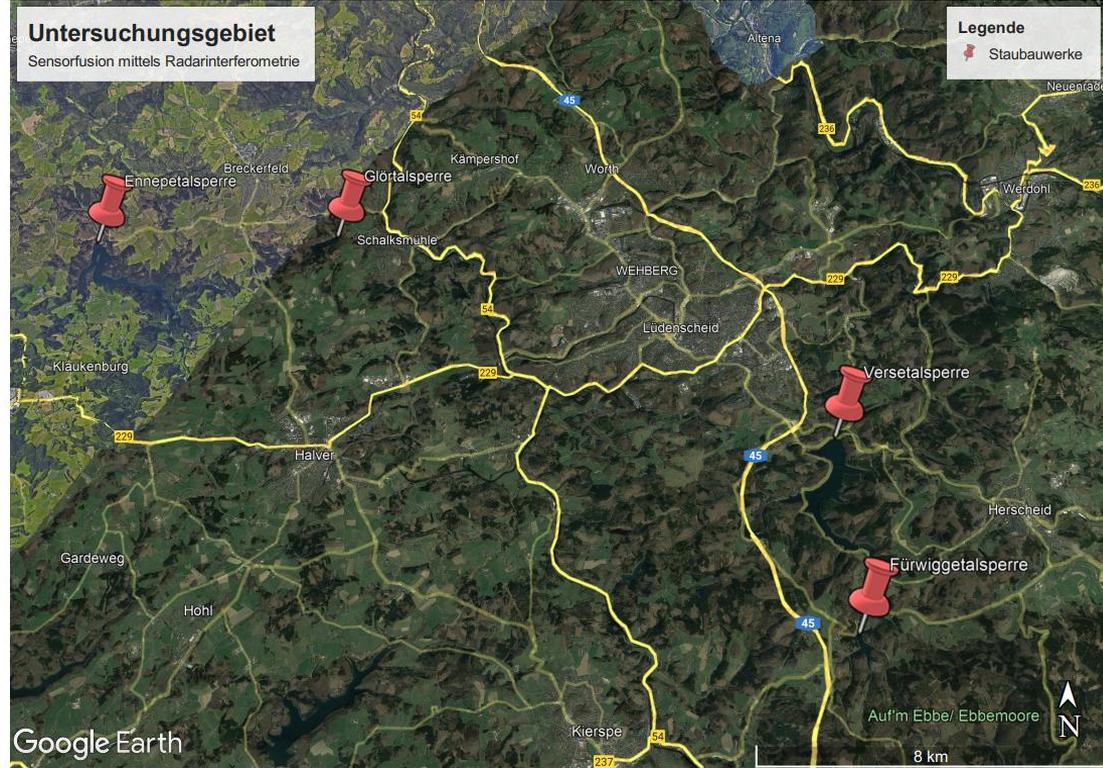


Abb.5: Untersuchungsgebiet. Die untersuchten SBW sind mit roten Pins gekennzeichnet. (Quelle: GoogleEarth)

2. Praktische Umsetzung – Multi-Sensor-Fusion

- Verwendete Daten:

- Sentinel-1 Ascending (C-Band; 5 cm Wellenlänge); Zeitraum: 2014-2022; frei verfügbar
- Terra-SAR-X Ascending (X-Band: 3 cm Wellenlänge); Zeitraum: 2016-2022; vom DLR bereitgestellt

→ Um Vergleichbarkeit aller untersuchten Stauanlagen zu gewährleisten, wurden nur Daten aus denjenigen Orbits verwendet, die das U-Gebiet **vollumfänglich abdecken**

- Persistent Scatterer Interferometry:

- Prozessierung der Daten getrennt voneinander, später Umwandlung in einheitliche LOS-Geometrie
- Verwendete Software: *StaMPS*
- Vorverarbeitung mittels *snap2stamps* und Entwicklung des Packages *TSX2StaMPS* (<https://github.com/jziemer1996/TSX2StaMPS>)



Abb.6: PSI-Workflow (vereinfacht)

2. Praktische Umsetzung

Tab.1: Anzahl an gefundenen PS-Punkten an ausgewählten Staubauwerken, vor und nach der Sensorfusion.

Staubauwerk	Vorher (nur S1)	Nachher (mit TSX)
Ennepetalsperre (Ruhrverband)	2	52 (+50)
Glörtalsperre (Ruhrverband)	2	21 (+19)
Versetalsperre (Ruhrverband)	3	52 (+49)
Fürwiggetalsperre (Ruhrverband)	5	28 (+23)

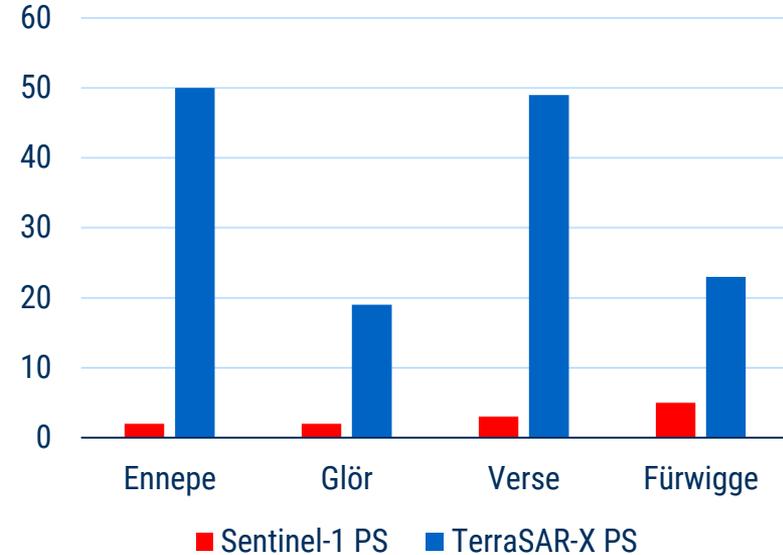


Abb.7: Anzahl an gefundenen PS-Punkten an ausgewählten Staubauwerken, für Sentinel-1 und TerraSAR-X.

2. Praktische Umsetzung – Beispiel Fürwiggetalsperre

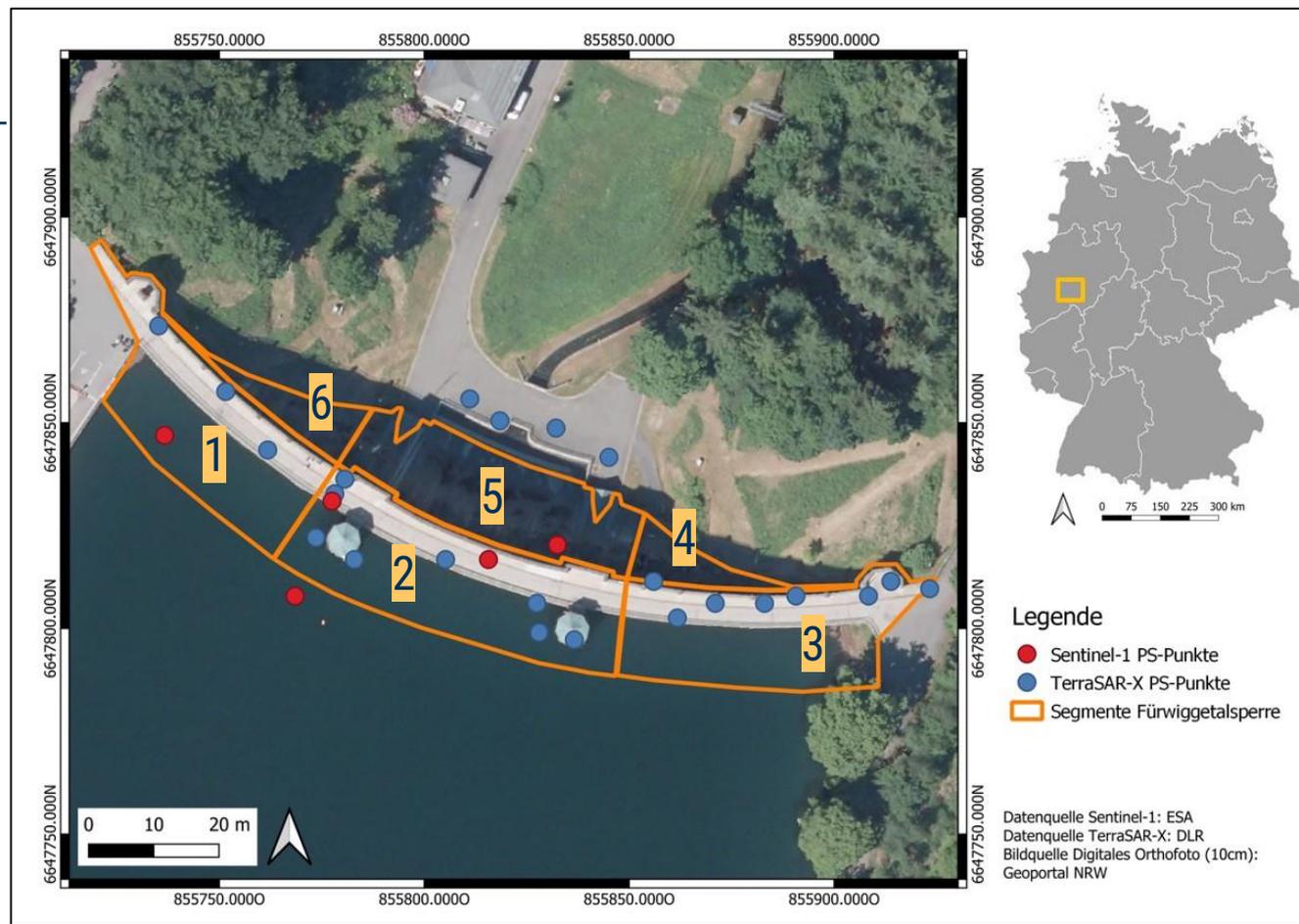


Abb.8: Übersicht der detektierten PS-Punkte (rot: Sentinel-1, blau: TerraSAR-X) an der segmentierten Fürwiggetalsperre (orange).

2. Praktische Umsetzung – Beispiel Fürwiggetalsperre

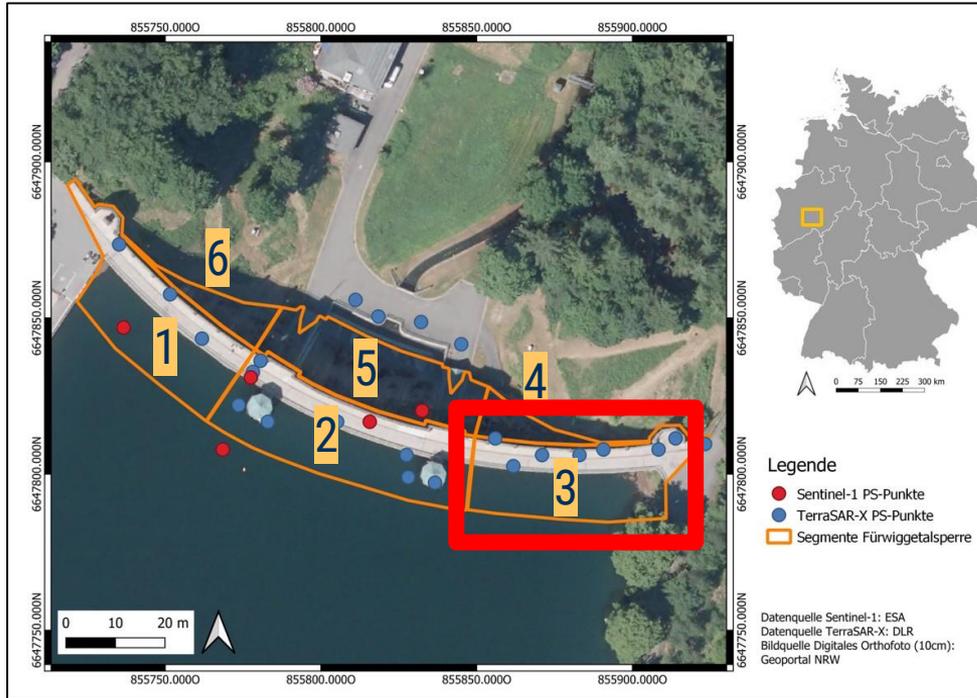


Abb.9: Übersicht der detektierten PS-Punkte (rot: Sentinel-1, blau: TerraSAR-X) an der segmentierten Fürwiggetalsperre (orange) (l.) und Wasserstand und Lufttemperatur an der Fürwiggetalsperre (r.) (Ruhrverband 2022).

2. Praktische Umsetzung – Beispiel Fürwiggetalsperre

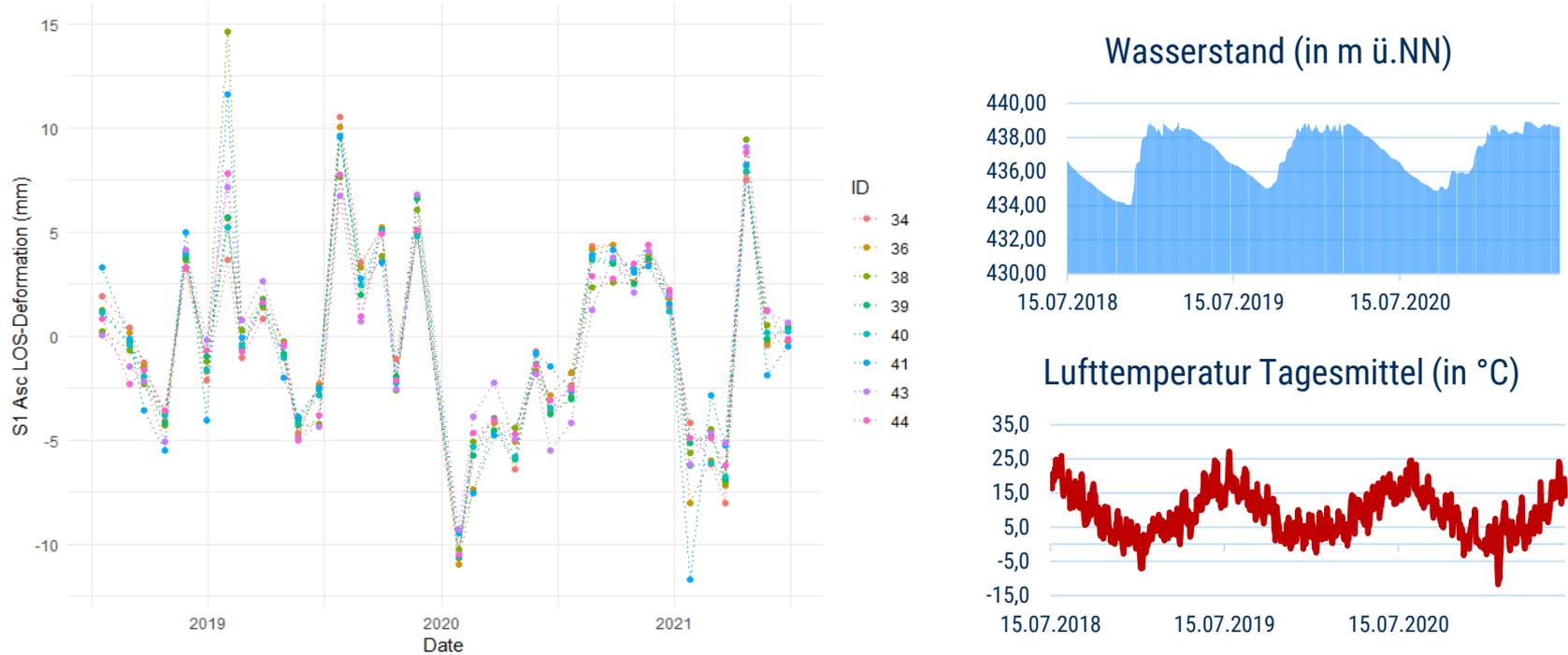


Abb.10: Bewegungsmuster (in mm) des Kronensegments Nr. 3 der Fürwiggetalsperre in LOS-Richtung für alle detektierten PS-Punkte (l.) und Wasserstand und Lufttemperatur an der Fürwiggetalsperre (r.) (Ruhrverband 2022). Die gepunktete Linie zwischen den Zeitpunkten dient lediglich der besseren Veranschaulichung des Bewegungsverlaufs. Positive LOS-Bewegungen signalisieren eine Bewegung der Mauer zur Wasserseite, negative Werte eine Bewegung zur Luftseite.

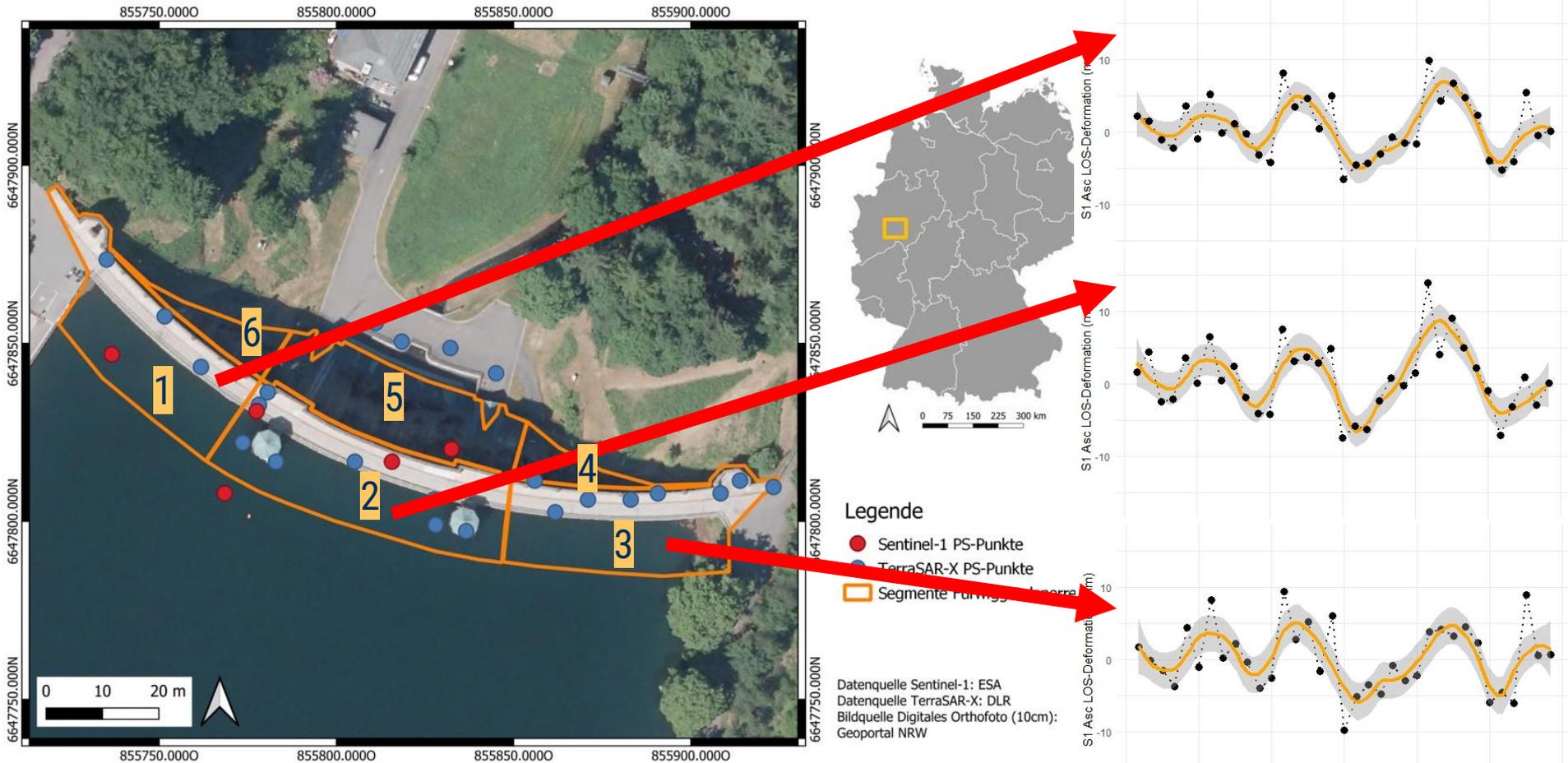


Abb.11: Mittleres Bewegungsmuster (in mm) der Kronensegmente der Fürwiggetalsperre in LOS-Richtung für alle detektierten PS-Punkte (Sentinel-1 und TerraSAR-X). Die gepunktete Linie zwischen den Zeitpunkten dient lediglich der besseren Veranschaulichung des Bewegungsverlaufs. Positive LOS-Bewegungen signalisieren eine Bewegung der Mauer zur Wasserseite, negative Werte eine Bewegung zur Luftseite. In orange/grau: Loess-Regression mit 68,3%-Konfidenzintervall.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

3. Diskussion



3. Diskussion

- Deformationsmuster zeigen ähnliche saisonale Dynamiken wie physikalische Einflussgrößen
 - Erkennbar ist jedoch ein gewisser zeitlicher Versatz zwischen Satellitendaten und In-Situ-Messungen
- Terra-SAR-X-Daten erhöhen die räumliche Punktdichte an den Stauanlagen um ein Vielfaches
 - Sind allerdings nicht frei verfügbar
 - Punktdichte bei Sentinel-1 kann auch mit Daten aus mehreren Orbits sowohl räumlich als auch zeitlich erhöht werden, ABER: reicht nicht bei allen Stauanlagen aus, siehe Versetalsperre!
- Umwandlung von LOS in Vertikal/EW-Deformationen aufgrund der komplexen saisonalen Bewegungsdynamik von Stauanlagen nicht ohne Expertenwissen möglich
- Umgang mit unterschiedlichen Sensorgenauigkeiten zwischen TSX und S1

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

4. Ausblick



4. Ausblick

- Vergleich der Ergebnisse mit Lotmessungen und den wesentlichen Einflussgrößen, die zu Verformungen an den Staubaauwerken führen (z.B. Wasserstand & Temperatur)
- Ausweitung der Analyse auf einen längeren Beobachtungszeitraum (2016-2022)
- Im Rahmen des Projekts KI4KI: Übertragen bzw. Anpassen der Methodik auf andere Großinfrastrukturen, wie z.B. Brücken



Abb.12: Saisonales Deformationsmuster an einer Brücke in Essen.
(Quelle: Bodenbewegungsdienst Deutschland)

Literatur

- Bettzieche, V. (2020). Satellitenüberwachung der Verformungen von Staumauern und Staudämmen. *Wasserwirtschaft*, 9, 48-51.
- Charrier, L., Yan, Y., Koeniguer, E. C., Trouve, E., Mouginot, J., & Millan, R. (2022). Fusion of multi-temporal and multi-sensor ice velocity observations. In *International Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Chen, F., Lin, H., Li, Z., Chen, Q., & Zhou, J. (2012). Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai–Tibet Railway detected via jointly analysis of C-and L-band small baseline SAR interferometry. *Remote sensing of environment*, 123, 532-540.
- Duan, L., Gong, H., Chen, B., Zhou, C., Lei, K., Gao, M., ... & Cao, J. (2020). An improved multi-sensor MTI time-series fusion method to monitor the subsidence of Beijing subway network during the Past 15 Years. *Remote Sensing*, 12(13), 2125.
- Jänichen, J., Schmullius, C., Baade, J., Last, K., Bettzieche, V., & Dubois, C. (2022). Monitoring of Radial Deformations of a Gravity Dam Using Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. *Remote Sensing*, 14(5), 1112.
- Schneider, P. J., & Soergel, U. (2022). Matching Persistent Scatterer Clusters to Building Elements in Mesh Representation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3, 123-130.
- Wang, Y., Bai, Z., Zhang, Y., Qin, Y., Lin, Y., Li, Y., & Shen, W. (2021). Using TerraSAR X-band and sentinel-1 C-band SAR interferometry for deformation along Beijing-Tianjin intercity railway analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 4832-4841.