

Satellitenüberwachung der Bewegungen der Möhnestaumauer

Die Radarfernerkundung mittels Satellitendaten und der Persistent-Scatterer-Interferometrie berechnet für Objekte auf der Erdoberfläche Deformationen. Diese Studie untersucht anhand der seit 2014 frei verfügbaren Sentinel-1-Satellitendaten des europäischen Copernicus-Programms die Anwendbarkeit am Beispiel der Möhnestaumauer. Zudem werden Aussagen über die Genauigkeit durch Vergleiche mit geodätischen In-situ-Messungen getroffen. Es konnten Deformationen berechnet werden, die im Vergleich mit den In-situ-Daten hohe Genauigkeiten aufweisen.

Jannik Jänichen, Clémence Dubois, Jussi Baade, Christiane Schmullius, Volker Bettzieche und Katja Last

1 Erdbeobachtung mit Satelliten

Die differentielle Synthetic-Aperture-Radar-Interferometrie (SAR-Interferometrie oder InSAR) ist ein Anwendungsbereich der Radarfernerkundung, bei der meist Satellitendaten genutzt werden, um Bewegungen der Erdoberfläche und ihrer sich darauf befindenden Objekte zu messen. Technische Fortschritte, insbesondere die Technik der Persistent-Scatterer-Interferometrie, kurz PSI, erlauben die Identifikation bestimmter Punktstreuer im Bild, für die mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern Deformationen berechnet werden können. Frei zugängliche und kostenlose SAR-Daten der Sentinel-1-Reihe des europäischen Copernicus-Programms erlauben seit 2014 die Anwendung dieser Technik mit einer Wiederholrate von 6 bis 12 Tagen [1].

Bei den identifizierten Objekten handelt es sich zumeist um über einen langen Zeitraum stabile Objekte, wie beispielsweise Gebäude oder Strommasten, weshalb die Technik zu einem großen Teil zur Infrastrukturüberwachung genutzt wird. Eine weitere konkrete Motivation der Anwendung der PSI-Technik besteht in der Einschätzung der Sicherheit von Strukturen, deren Nutzung bestimmte Risiken und Gefahren mit sich bringen. Staubauwerke stellen hier einen besonders perspektivischen Ansatz dar, zudem sie in der Fachliteratur bisher wenig behandelt wurden. Stauanlagen sind auf der Grundlage des § 36 (2) des Wasserhaushaltsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland nach den allgemein anerkannten Regeln zu über-

wachen. Wegen des hohen Schadenpotenzials, welches von einem Bruch einer Talsperre ausgeht, werden diese mit umfangreichen Messeinrichtungen ausgerüstet, die z. B. die Durchsickerung aber auch die Bewegungen von Staumauern und Staudämmen an verschiedenen Punkten und in verschiedenen Zeithorizonten aufzeichnen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei langsame Verschiebungen der Damm- und Mauerkronen, die sich jahrelang im Millimeterbereich bewegen können, bevor sie plötzlich zunehmen und letztlich zum Bruch einer Talsperre führen könnten [2]. Langfristige Trends werden jedoch gerade bei Staumauern durch kurzfristige Effekte verdeckt. So bewegt sich die Krone einer Staumauer durch den Jahresgang der Lufttemperaturen im Zentimeterbereich zur Luft- und Wasserseite. Auch der wechselnde Füllstand der Talsperre und der hieraus resultierende, veränderliche Wasserdruck auf die Staumauer führt zu Bewegungen in gleicher Größenordnung [3].

Eine erste Analyse hinsichtlich der Genauigkeit der PSI-Technik für die Überwachung von Staumauern und Staudämmen wurde durchgeführt, indem Daten des bundesweiten Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) analysiert wurden [4]. In diversen Studien wurden bereits Deformationen an Staudämmen mittels der PSI-Technik erfasst und validiert [5]. Im Vergleich zu Staudämmen ist die Beobachtung von Staumauern mit der PSI-Technik oder anderen Methoden der multitemporalen Radarinterferometrie (MTInSAR) in der Literatur noch nicht ausführlich dokumentiert worden. Dies ist überraschend, da Gewichtsstaumauern durch verschiedene Faktoren, wie Temperatur- oder Wasserstandsänderungen, die zu jährlichen Radialbewegungen im Bereich von mehreren Millimetern führen, stark beansprucht werden. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht in einer ausführlichen Genauigkeitsanalyse, die allerdings oftmals aufgrund fehlender In-situ-Daten nicht möglich ist [5]. Dies ist jedoch unerlässlich, um das Potenzial und die Möglichkeit eines automatischen Einsatzes der PSI-Technik für die Überwachung von Staumauern zu bewerten.

Das Ziel dieser Studie ist daher die Evaluation der PSI-Technik als potenzielle Ergänzung zu den geodätischen In-situ-Messungen, insbesondere unter dem Aspekt einer zeitlich hochauf-

Kompakt

- Die Radarfernerkundung mittels Satellitendaten und der Methodik der Persistent-Scatterer-Interferometrie (PSI) berechnet für Objekte auf der Erdoberfläche Deformationen.
- Diese Studie untersucht die Anwendbarkeit am Beispiel der Möhnestaumauer und trifft Aussagen über die Genauigkeit durch Vergleiche mit geodätischen In-situ-Messungen.

gelösten Messmethode. Am Beispiel der Staumauer der Möhnetalsperre wird die Technik angewendet und evaluiert. Dabei wird ebenfalls die Beobachtungsfrequenz mit den Satellitendaten untersucht. In einer folgenden Genauigkeitsanalyse soll die Anwendbarkeit der PSI-Technik in Bezug auf Staumauern diskutiert werden, indem sie mit den geodätischen In-situ-Daten visuell und numerisch verglichen wird. Dabei soll die Frage beantwortet werden, ob die Messmethode genau genug ist und den Ansprüchen der DIN-Norm entspricht (DIN 19 700-11) [6].

2 Daten und Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet und Datenlage

Die Staumauer der Möhnetalsperre wurde 1912 errichtet. Die im Grundriss in einem Bogen gekrümmte Mauer ist 650 m lang und 40 m hoch. Trotz ihrer Bogenform erhält sie ihre Stabilität allein durch den dreiecksförmigen Querschnitt (**Bild 1**) und das Gewicht des massiven Bruchsteinmauerwerks. Das Staubecken der Talsperre kann bis zu 134,5 Mio. m³ Wasser aufnehmen und so maßgeblich zur Sicherung der Wasserversorgung des Ruhrgebiets beitragen. Unterhalb der Staumauer, und auf der Luftaufnahme in **Bild 2** gut erkennbar, befindet sich ein Ausgleichsweiher. Er dient der Vergleichmäßigung der Abgabe von Wasser aus der Möhnetalsperre in den Unterlauf, da das Hauptkraftwerk das Wasser aus der Möhnetalsperre nur stundenweise zur Stromgewinnung nutzt. Die Bewegungen der luftseitigen Oberfläche der Möhnestaumauer werden seit 1955 mit Hilfe von trigonometrischen Messpunkten erfasst. Diese geodätische Messung ist aufwändig und wird entsprechend den gültigen Normen nur zweimal jährlich durchgeführt.

Zur kontinuierlichen Beobachtung der Bewegungen der Mauerkrone gegenüber der Gründung wurde 1977 eine Lotanlage in die Staumauer eingebaut (**Bild 1**). Hier überwacht eine Laseranlage permanent die Bewegungen des Lotdrahtes. Die mit beiden Messmethoden erhobenen Daten zeigen den typischen Jahresverlauf der Bewegungen einer Staumauer

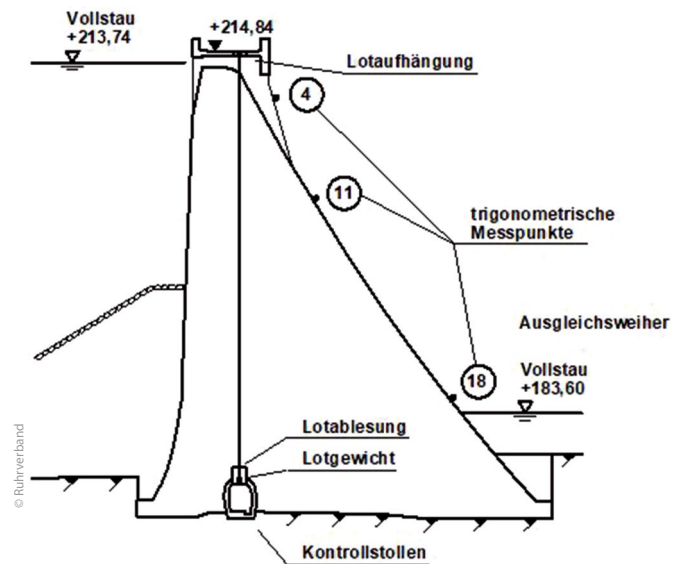


Bild 1: Querschnitt der Möhnestaumauer mit Messausstattung

unter dem Wechsel des Stauspiegels und der Lufttemperaturen, wobei sich aus der geodätischen Überwachung nur zwei Werte im Jahr ergeben, allerdings an 27 Messpunkten. Die Lotanlage liefert 15-minütliche Werte, allerdings nur für den einen Punkt der Lotaufhängung.

Die Möhnetalsperre befindet sich mittig innerhalb der aufsteigenden Flugbahn (Ascending) als auch der absteigenden Flugbahn (Descending) der Satelliten was die Satellitenbeobachtung begünstigt. Für beide Flugbahnen existiert ein dichter Datensatz für eine multitemporale PSI-Analyse. Die Staumauer erstreckt sich von nordöstlicher Richtung in südwestlicher Richtung mit dem Staubecken im Osten und der Luftseite im Westen. Somit fokussieren sich die beiden Aufnahmerichtungen, wie **Bild 2** zeigt, auf jeweils andere Bereiche der Mauer und liefern dabei ebenfalls verschiedene Einblicke und potenziell unterschiedliche identifizierbare Persistent-Scatterer-Punkte (PS-Punkte).

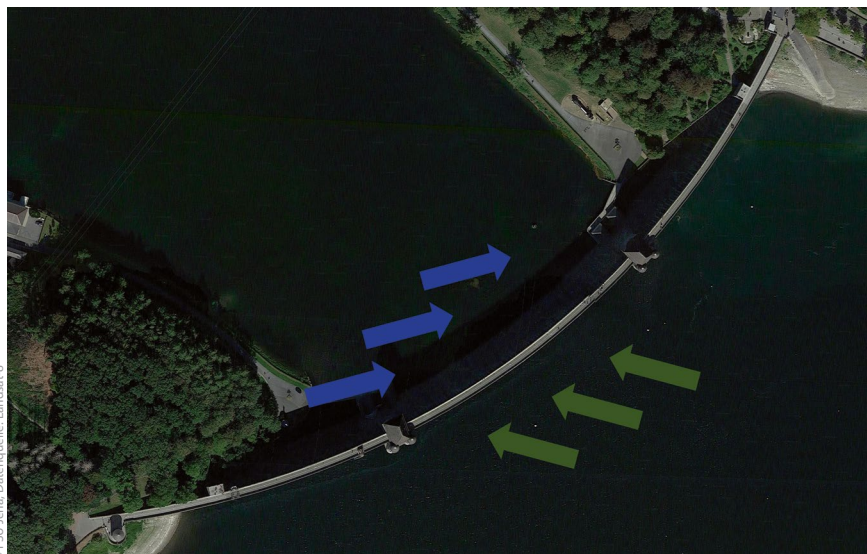


Bild 2: Geographische Ausrichtung der Möhnestaumauer und einfallende Satellitenorbits

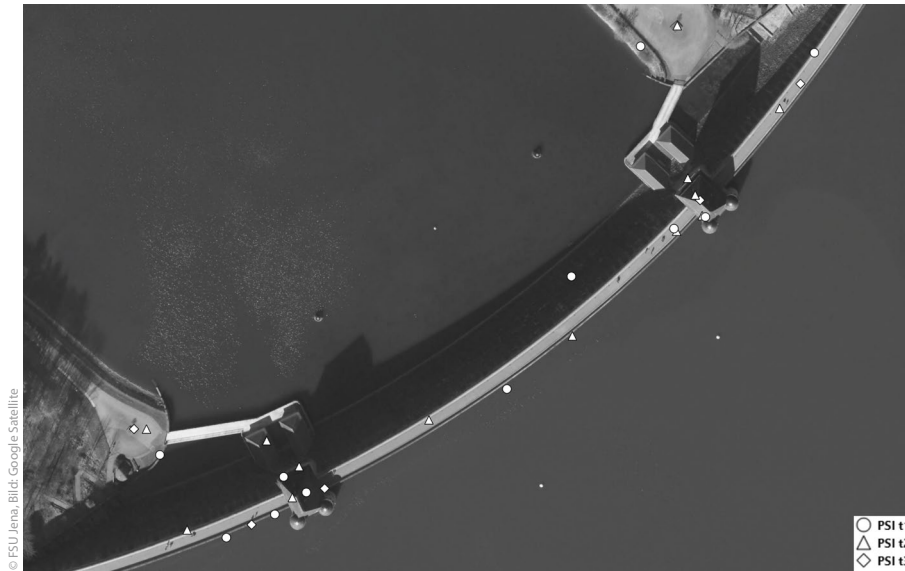


Bild 3: Lage der PSI-Punkte im Bereich der Möhnestaumauer

Die Ascending-Geometrie fokussiert sich vor allem auf die volle Ausdehnung der Luftseite der Staumauer, deren oberen Verlauf sowie auf die beiden Mauertürme und den unteren Bereich der luftseitigen Maueroberfläche. Aufgrund der im Vergleich zur Descending-Geometrie großen Abbildungsfläche der Mauer eignet sich die Ascending-Geometrie besser für eine große PS-Auswahl. Die architektonische Geometrie der Mauer kann hier für sogenannte Double-Bounce-Effekte bei der Aufnahme sorgen, was sich bei einer PS-Analyse positiv auf die Anzahl der identifizierbaren PS-Punkte auswirkt.

Die Descending-Richtung bietet im Vergleich nur wenige potenzielle Punkte für eine erfolgreiche PSI-Analyse. Grund hierfür ist vor allem die geringe Abbildungsfläche der wasserseitigen Maueroberfläche, da die Mauer meist vom Talsperrenwasser verdeckt wird. Die über den Jahresverlauf schwankenden Wasserstände sorgen zudem für nicht stabile Rückstreuverhältnisse der Radarsignale, was für eine PSI-Analyse nachteilig ist. Lediglich die kleineren wasserseitigen Schiebertürme, welche sich an die großen Mauertürme anlehnen, stellen zuverlässige stabile Streuer dar (**Bild 2**). In dieser Studie wurde daher ein Fokus auf die Analyse von Radardaten im Ascending-Orbit gelegt. Dazu wurden drei Datenstapel, die jeweils eine unterschiedliche Anzahl an Sentinel-1-Satellitenszenen enthalten, gebildet und prozessiert. Dies dient dem Zweck, Aussagen über die Auswirkungen der Aufnahmefrequenz auf die resultierende Dichte der PS-Punkte zu treffen, wie in Jänichen et al. [7] detaillierter ausgeführt wird. Hier erstreckt sich der Untersuchungszeitraum über sechs Jahre von Anfang 2015 bis Ende 2020.

2.2 Methode der Satellitenüberwachung

Wie in Jänichen et al. [7] hergeleitet, liefert die differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR) als Form der sog. Repeat-Pass-Interferometrie eine Technik der Fernerkundung, die als hochgenaues Werkzeug zur kostengünstigen Kartierung von Oberflächenbewegungen genutzt werden kann. Die Grundidee besteht darin, die Phasenunterschiede von zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Radarbildern für die

Bildung eines Interferogramms zu nutzen, um so die Ableitung von Bewegungen möglich zu machen. Dies geschieht durch eine Trennung der Phasenanteile, welche durch die Atmosphäre und Topographie sowie durch Rauschen verursacht werden. Als eine Erweiterung der DInSAR-Methode wurde das Verfahren der PSI entwickelt. Diese basiert auf der Identifizierung jener Pixel in einem multi-temporalen Datensatz, in denen langfristig kohärente Streuer die Amplitude und das Rückstreuverhalten des Pixels stabil halten. Diese Pixel werden Persistent Scatterer (PS) genannt. In der Regel handelt es sich dabei um künstliche Objekte, wie beispielsweise Gebäude oder Strommasten, die eine hohe zeitliche Stabilität und folglich eine minimale zeitliche Dekorrelation aufweisen. Damit ist die Anwendung dieser Technik auf Gebiete beschränkt, in denen solche Streuer existieren. Daher findet die PS-Technik vor allem in urbanen Bereichen oder der Infrastrukturüberwachung Anwendung.

Da die Ergebniswerte der PSI-Prozessierung in seitlicher Blickrichtung (Line of Sight, LOS) auf die Erdoberfläche vorliegen, müssen die PSI-Deformationen, wie in [7] beschrieben, über trigonometrische Berechnungen in die horizontale Bewegungskomponenten und im Anschluss in die radiale Achse, in der die geodätischen In-situ-Messungen vorliegen, überführt werden. In der anschließenden Genauigkeitsanalyse findet ein visueller und ein numerischer Vergleich der Zeitreihen, unter Berücksichtigung statistischer Parameter, wie dem Korrelationskoeffizienten (r^2) und der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Error, RMSE), statt.

Für die Validierung bzw. die Genauigkeitsanalyse, werden die Messdaten der Möhnetalsperre genutzt. Sie wurden vom Ruhrverband aufgenommen und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt [8]. Die Messungen des Gewichtslots liegen auf täglicher Basis in der tangentialen Achse und in der radialen Achse vor. Des Weiteren werden die an 27 Messpunkte aufgenommenen trigonometrischen Daten mit einer zeitlichen Auflösung von sechs Monaten genutzt. Für die Genauigkeitsanalyse wird dabei jener trigonometrische Messpunkt genutzt, der dem jeweiligen PS-Punkt am nächsten liegt.

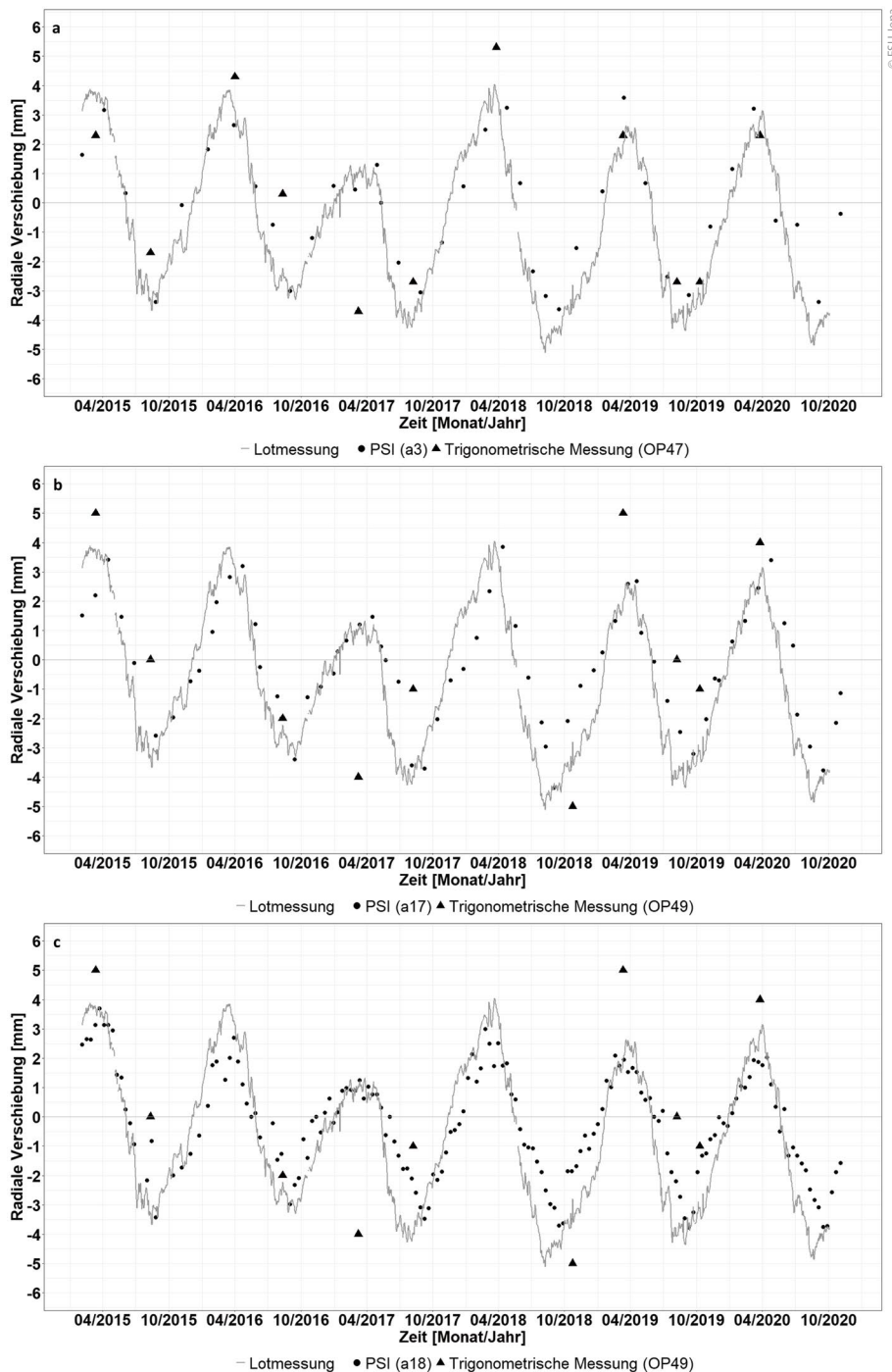


Bild 4: Geodätische In-situ-Messungen im Vergleich zu drei ausgewerteten PSI-Punkten an der Mauerkrone

3 Ergebnisse

Bild 3 zeigt die Lage der 29 resultierenden PS-Punkte der drei zuvor erstellten Datenstapel, die sich über die gesamte Mauer verteilen. Der Großteil der Punkte befindet sich auf der Mauerkrone, mit einer hohen Konzentration an den beiden Mauertürmen. Eine weitere größere Anzahl an Punkten befindet sich in den äußeren Bereichen und nur sechs Punkte fallen auf den mittleren Teil der Mauer.

Jeder einzelne Punkt besitzt eine eigene Messkurve, welche sich über den gesamten Beobachtungszeitraum von Anfang 2015 bis Ende 2020 erstreckt. **Bild 4** zeigt drei Beispiele dieser Messkurven an drei unterschiedlichen PS-Punkten. **Bild 4a** zeigt die Kurve eines PS-Punktes, der sich mittig auf der Mauerkrone befindet während die **Bilder 4b** und **4c** Kurven von PS-Punkten, die sich nahe des westlichen Mauerturms befinden, zeigen. Aufgrund ihres unterschiedlichen Ursprungs aus drei verschiedenen Datenstapeln variiert die Anzahl der PS-Beobachtungen. Zusätzlich ist die tägliche Lotmessung dargestellt und die verfügbaren trigonometrischen Messungen jenes Messpunktes, der sich dem PS-Punkt am nächsten befindet.

Am PS-Punkt zu **Bild 4a** liegen mit 38 Satellitenbeobachtungen die wenigsten Daten vor. Die PSI-Messreihe zu **Bild 4b** enthält 64 und jene zu **Bild 4c** 164 Satellitenbeobachtungen. Damit sind diese beiden Messreihen in ihrem zeitlichen Verlauf detaillierter. Schon der visuelle Vergleich der drei Messreihen in **Bild 4a** zeigt hohe Übereinstimmungen, insbesondere zwischen den Lotmessungen und den radialen PSI-Messungen. Die Minima und Maxima im Jahresverlauf bewegen sich bei den PSI-Werten in Regel zwischen 3,5 mm im März/April und -4 mm im August/September. Das Jahr 2017 stellt hier eine Ausnahme mit signifikant niedrigeren PS-Werten dar, die maximal Werte von 1,5 mm aufzeigen. Visuell folgen die PSI-Ergebnisse dem Verlauf der Lotmessungen. Beim Vergleich mit den trigonometrischen Messungen zeigen sich größere Abweichungen. Hier ist jedoch die vergleichsweise hohe Ungenauigkeit der trigonometrischen Messung von ± 3 mm [8] und auch die Tatsache, dass über den gesamten Untersuchungszeitraum

lediglich 12 Messungen vorliegen, zu beachten. Die **Bilder 4b** und **4c** zeigen für die PSI-Messungen vergleichbare Verläufe mit einer höheren Punktdichte. Auch hier sind die zeitlichen Verläufe der Lot- und PSI miteinander vergleichbar. Die Minima und Maxima der PSI-Messungen verhalten sich in ihren jährlichen Zyklen vergleichbar zu denen in **Bild 4a**.

Diese insgesamt sehr guten visuellen Übereinstimmungen zeigen sich auch an den in **Tabelle 1** gezeigten statistischen Werten. Insbesondere die Wurzel aus den mittleren quadra-

Tabelle 1: Statistischer Vergleich zwischen geodätischen In-situ-Messungen der Möhnestaumauer und drei ausgewählten PSI-Punkten (Quelle: FSU Jena)

Teilabbildung	RMSE (PSI – Lot)	RMSE (PSI – Trig.)	r^2 (PSI – LOT)	r^2 (PSI – Trig.)
Bild 4a	1,21 mm	2,70 mm	0,88	0,58
Bild 4b	1,20 mm	2,93 mm	0,91	0,77
Bild 4b	1,09 mm	2,76 mm	0,91	0,62

tischen Abweichungen (RMSE) zwischen den PSI- und den Lotmessungen sind mit Werten zwischen 1,09 mm und 1,21 mm sehr niedrig. Gleichzeitig zeigen sich mit Korrelationskoeffizienten (r^2) um 0,9 sehr hohe Anteile erklärter Varianz zwischen den beiden Messreihen.

Bei den trigonometrischen Messungen sind die Übereinstimmungen mit den PSI-Messungen deutlich geringer, aber immer noch vorhanden. Dies drückt sich in RMSE-Werten aus, die zwischen 2,7 mm und 2,93 mm liegen und r^2 -Werten, die einen Wert von 0,77 nicht überschreiten.

Bisher wurden nur die Ergebnisse von drei verschiedenen Punkten gezeigt, jedoch gilt für alle berechneten PS-Punkte, die sich auf der Möhnetalsperre befinden, ein ähnlicher jahreszeitlicher Zyklus sowie die guten Übereinstimmungen mit den Lotmessungen.

In **Bild 5** sind die Messreihen von zwei PSI-Punkten dargestellt, die sich nicht wie die anderen PSI-Punkte mittig auf der Mauerkrone befinden. **Bild 5a** zeigt die Messkurve eines Punktes, der sich am Mauerflügel befindet und **Bild 5b** die Kurve eines Punktes, der am Mauerfuß liegt. Die Kurven zeigen dabei über den gesamten Beobachtungszeitraum ein ähnliches Verhalten wie die Kurven in **Bild 4**. In ihrer Amplitude sind die Kurven jedoch erwartungsgemäß signifikant geringer, so dass in **Bild 5a** die Maximalwerte im März/April bei ca. 2 mm und die Minimalwerte im August/September bei ca. -2 mm liegen. In **Bild 5b** bewegen sich die radialen Deformationen zwischen -1 mm und 1 mm.

Als weitere Maßnahme zur Bewertung der Genauigkeit des Verfahrens können die statistischen Parameter der PS-Punkte betrachtet werden, die in größerer Entfernung zur Mauer lokalisiert sind und für die somit keine Verformung zu erwarten ist.

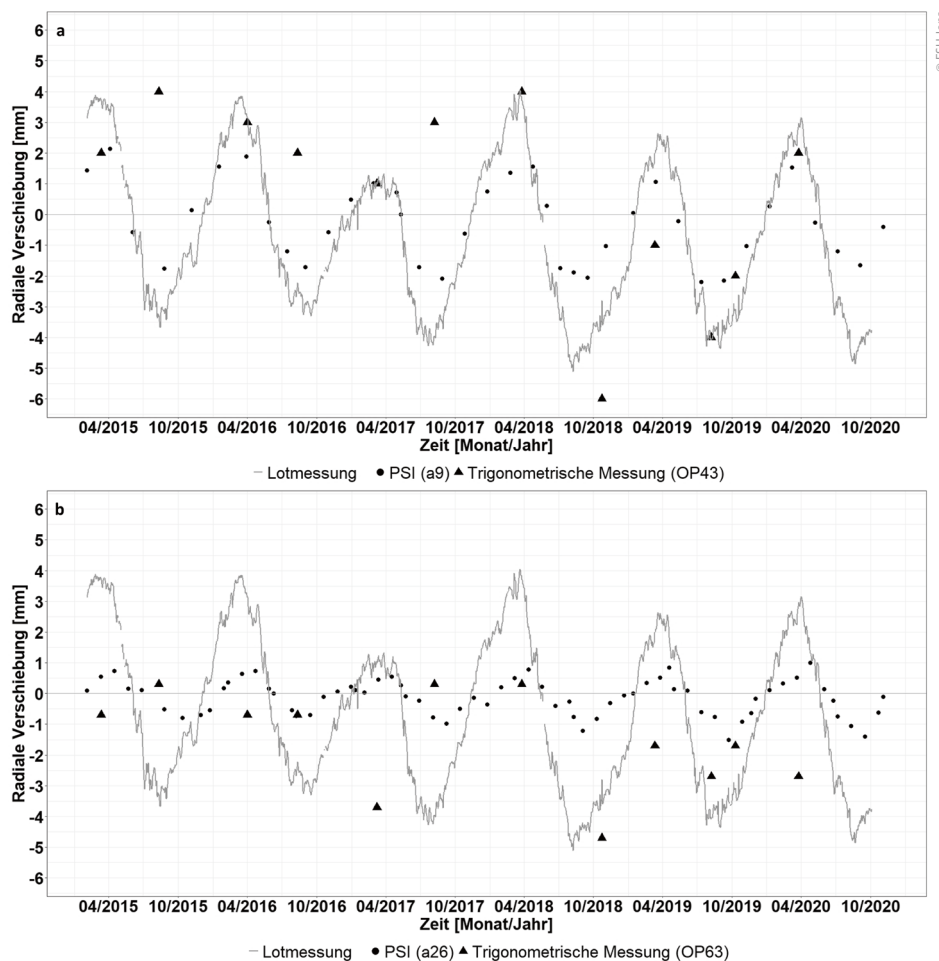


Bild 5: Geodätische In-situ-Messungen im Vergleich zu zwei ausgewerteten PSI-Punkten am Mauerflügel (a) und am Mauerfuß (b)

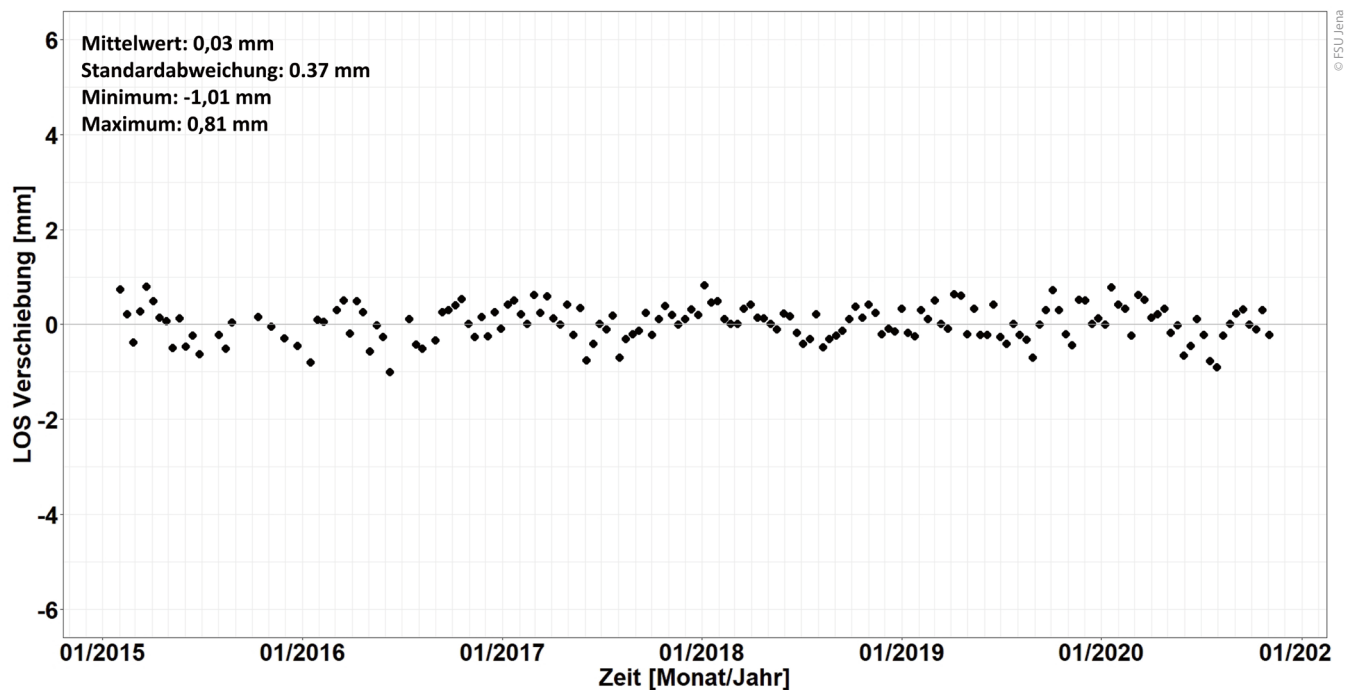


Bild 6: LOS-Verschiebungen eines sich nicht an der Mauer befindlichen PSI-Punktes (164 Messpunkte)

Ein Beispiel für einen solchen PS-Punkt ist in **Bild 6** dargestellt. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um die LOS-Werte handelt, da eine Umrechnung in radiale Werte aufgrund der Lage außerhalb der Staumauer nicht sinnvoll ist. Die Bewegungen der Punkte haben eine maximale Amplitude von 2,25 mm in LOS-Richtung, welche verglichen mit der Amplitude von 8 mm der auf der Staumauer befindlichen PS-Punkte deutlich niedriger ist. Wenn nachgewiesen werden kann, dass an diesen Punkten keine Bewegungen auftreten, können die Werte dieser Punkte als weiteres Maß für die Genauigkeit der PSI-Technik verwendet werden. Sie geben also die grundlegende Unsicherheit bzw. intrinsische Ungenauigkeit des Verfahrens an, die bei etwa $\pm 1,2$ mm liegt. Zu diesem Zweck sollte jedoch sichergestellt werden, dass an diesen Punkten tatsächlich keine Verschiebungen oder Bewegungen vorhanden sind, was in dieser Studie nicht vollständig überprüft werden konnte.

4 Bewertung der Ergebnisse

In dieser Studie wurde deutlich, dass sich die PSI-Technik eignet, die an Staumauern auftretenden Deformationen zu beobachten. Um die Überwachung der Stabilität der gesamten Mauer an möglichst vielen Punkten zu gewährleisten, ist die Bestimmung einer ausreichenden Anzahl von PS-Punkten erforderlich. Je höher die Dichte und Qualität der Punkte, desto detaillierter sind die Ergebnisse. Die physikalischen Eigenschaften der Objekte, die sich in den jeweiligen Pixeln befinden, sind die wichtigsten Kriterien für eine erfolgreiche Identifizierung. So sind eine hohe Rückstreuungsintensität der Radarstrahlen im Bild und eine hohe Phasenstabilität der zum Satelliten zurückkehrenden Signale für die Identifizierung von PS-Punkten erfor-

derlich. Diese Kriterien sind vor allem für bestimmte Landbedeckungsklassen, wie z. B. städtische Gebiete, gegeben. Auch Staumauern erfüllen mit ihrer Dicke und Bauart die Anforderungen. In dieser Studie führte die erfolgreiche PSI-Prozessierung zu einer Gesamtzahl von 29 PS-Punkten für alle drei im Vorfeld erstellten Sentinel-1-Datenstapel, was für die Überwachung einer Gewichtsstaumauer mit einer Länge von 650 m und einer Höhe von 40 m als ausreichend angesehen werden kann.

Zudem zeigten die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse, dass insbesondere die radialen PSI-Ergebnisse sehr gut mit den Lotmessungen übereinstimmen. Alle PS-Punkte, die sich auf der Mauerkrone befinden, zeigen über den gesamten Beobachtungszeitraum sehr ähnliche Verläufe wie die Lotmessungen. Dies wird auch durch die statistische Analyse bestätigt, bei der die r^2 -Werte im Bereich von 0,88 bis 0,95 für alle prozessierten PS-Punkte liegen. Auch die RMSE-Werte sind mit Werten zwischen 1,1 mm und 1,2 mm sehr gering. Somit könnte die PSI-Technik zur Überwachung von Schwergewichtsmauern gemäß DIN 19 700-11 auf einer regelmäßigeren Basis als die derzeitigen terrestrischen Messungen verwendet werden.

Die Ergebnisse der Vergleiche mit den trigonometrischen Daten ergeben in der Regel deutlich größere Abweichungen als die Vergleiche mit den Lotmessungen. Während der visuelle Vergleich viele Messpunkte zeigt, die gut mit den PSI-Messungen übereinstimmen, sind eine größere Anzahl an Abweichungen von bis zu mehreren Millimetern festzustellen. Dies ist hauptsächlich auf die ungenauere trigonometrische Messmethode im Vergleich zu den Lotmessungen zurückzuführen. Deren Unsicherheit wird mit einem Vertrauensbereich von ± 3 mm angegeben, während die Messgenauigkeit der Lotmessung mit $\pm 0,5$ mm angegeben wird [8]. Dadurch sind auch die RMSE-Werte deutlich erhöht und die r^2 -Werte signifikant kleiner. Allerdings ist an dieser Stelle zu

berücksichtigen, dass für den Beobachtungszeitraum nur zwölf oder weniger trigonometrische Messungen zur Verfügung stehen, da diese Messung nur zweimal im Jahr durchgeführt wird. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein Vergleich der PSI-Messungen mit den trigonometrischen Punkten aufgrund der geringen zeitlichen Abdeckung und der geringen Genauigkeit nur eingeschränkt möglich ist, jedoch eine gute räumliche Abdeckung der Staumauer liefert.

Abschließend war es ebenfalls möglich, eine Variabilität in den PSI-Deformationen in Abhängigkeit von der Lage der einzelnen PSI-Punkte zu identifizieren. Punkte, die am Mauerfuß oder an den Mauerflügeln liegen, weisen in Übereinstimmung mit den Erwartungen signifikant niedrigere Werte auf, im Vergleich zu den Punkten, die auf der Mauerkrone oder in der Nähe der Mauertürme liegen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Studie wurde die satellitengestützte PSI-Methode eingesetzt, um Deformationen an der Möhnestaumauer zu beobachten. Die PSI-Methode wurde bereits vermehrt an Staudämmen angewendet, jedoch ist ihre Anwendung am Beispiel von Staumauern bis jetzt noch nicht detailliert in der Fachliteratur beschrieben. Es wurde eine erfolgreiche Analyse mit anschließender Genauigkeitsanalyse durchgeführt, wobei sich zeigt, dass die PSI-Technik in der Lage ist, die saisonalen Verläufe der radialen Verschiebungen an der Möhnestaumauer mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Hier zeigten sich hohe Korrelationen und niedrige RMSE-Werte zwischen den PSI- und den geodätischen In-situ-Messungen. Die Genauigkeiten liegen dabei zwischen 1 und 2 mm. Zudem wird durch die Vielzahl der PS-Punkte die Staumauer in ihrer Ausdehnung gut erfasst. Hiermit können die Anforderungen der DIN 19 700-11 eingehalten werden.

Jannik Jänichen, Clémence Dubois, Jussi Baade, Christiane Schmullius, Volker Bettzieche and Katja Last

Monitoring of the movements of the Möhne dam by satellites

In the field of infrastructure monitoring, methods of radar remote sensing using satellite data are gaining importance. In particular, the technique of persistent scatterer interferometry (PSI) has established itself in various studies as a cost-effective and accurate supplement to traditional surveying techniques. It calculates deformations for rather stable objects on the Earth's surface over a chosen time period. The Sentinel-1 satellite data of the European Copernicus program, which have been freely available since 2014, are particularly suitable for this purpose. Since gravity dams have not been an essential part of previous research in this field, this study examines the applicability of the PSI technique using the Möhne dam (Germany) as an example. Furthermore, statements about the accuracy are made by comparison with geodetic in-situ measurements. By applying the PSI technique, deformations that show high accuracies compared to the in-situ data could be calculated, demonstrating that the technique is applicable to gravity dams.

Auf der Grundlage des in der Studie aufgezeigten Potenzials sind weitere Untersuchungen geplant. In dem Verbundprojekt „KI4KI: künstliche Intelligenz für klimaresilientes Infrastrukturmonitoring“ zwischen der Universität Jena und dem Ruhrverband soll das Potenzial der Technik weiter untersucht werden. Hierbei sollen Geräte, sogenannte „Compact Active Transponders“ (CAT) genutzt werden, die die Sichtbarkeit der Anlagen für die Satelliten durch Aussenden eines eigenen Radarsignals weiter erhöhen. Mit Methoden der künstlichen Intelligenz sollen Deformationen auch bei extremen Wetterereignissen vorhergesagt werden.

Autoren

Jannik Jänichen

Dr. Clémence Dubois

Prof. Dr. Christiane Schmullius

Lehrstuhl für Fernerkundung

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Löbdergraben 32

07743 Jena

jannik.jaenichen@uni-jena.de

clemence.dubois@uni-jena.de

c.schmullius@uni-jena.de

PD Dr. Jussi Baade

Lehrstuhl für Physische Geographie

Friedrich-Schiller-Universität Jena

Löbdergraben 32

07743 Jena

jussi.baade@uni-jena.de

Prof. Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Katja Last

Ruhrverband

Kronprinzenstr. 37

45128 Essen

kla@ruhrverband.de

Literatur

- [1] ESA (Hrsg.): Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>; Abruf 01.09.2022).
- [2] Gebler, T.: Statistische Auswertung von simulierten Talsperrenüberwachungsdaten zur Identifikation von Schadensprozessen an Gewichtstaumauern. In: Mitteilungen des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart (2018), Nr. 262. (doi.org/10.18419/opus-10196).
- [3] Bettzieche, V.: Mathematisch-statistische Analyse von Messwerten der Talsperrenüberwachung. In: WasserWirtschaft Nr. 94 (2004), Heft 1-2.
- [4] Bettzieche, V.: Satellitenüberwachung der Verformungen von Staumauern und Staudämmen. In: WasserWirtschaft 110 (2020), Heft 9, S. 48-51.
- [5] Lazecký, M.; Perissin, D.; Zhiying, W.; Ling, L.; Yuxiao, Q.: Observing Dam's Movements with Spaceborne SAR Interferometry. In: Engineering Geology for Society and Territory (2015).
- [6] Norm DIN 19 700: Stauanlagen - Teil 11: Talsperren - Gemeinsame Festlegungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH (2004).
- [7] Jänichen, J.; Schmullius, C.; Baade, J.; Last, K.; Bettzieche, V.; Dubois, C.: Monitoring of Radial Deformations of a Gravity Dam Using Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. In: Remote Sensing 5 (2022) Nr. 14, S. 1 112.
- [8] Ruhrverband(Hrsg.): Möhnetalsperre: Vertiefte Überprüfung, Analyse Messdaten. Unveröffentlichter Sicherheitsbericht (2018).