

# Vergleich von Bodenbewegungen mit In-situ Messungen zur Überwachung von Deformationen an Staubauwerken in Thüringen

Jannik Jänichen<sup>1</sup>, Natascha Stumpf<sup>1</sup>, Christoph Liedel<sup>1</sup>, Jonas Ziemer<sup>1</sup>, Michael Sabrowski<sup>2</sup>, Christiane Schmuilius<sup>1</sup>, Clémence Dubois<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Fernerkundung, Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena, Deutschland

<sup>2</sup> Thüringer Fernwasserversorgung, Erfurt, Deutschland

*In dieser Studie wurden Satellitenbeobachtungen mittels Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) an der Talsperre Leibis/Lichte im Thüringer Schiefergebirge mit In-situ-Lotdaten verglichen, um Deformationen an Staubauwerken zu überwachen. Es zeigte sich eine starke Korrelation zwischen den Satellitendaten des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) und den In-situ-Messungen, insbesondere spiegelten die BBD-Daten den saisonalen Deformationsverlauf der Staumauer genau wider. Die Analyse ergab hohe  $R^2$ -Werte, was auf eine starke lineare Beziehung hinweist. 90% der  $p$ -Werte lagen unter 0,05, was hohe statistische Signifikanz anzeigt. Diese Ergebnisse bestätigen das Potenzial der PSI-Satellitentechnologie als ergänzendes Instrument zur Überwachung von Staubauwerken, wobei eine sorgfältige Datenanalyse entscheidend für die Genauigkeit ist.*

*In this study, satellite observations using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) at the Leibis/Lichte dam in the Thuringian Slate Mountains were compared with in-situ plumb data to monitor deformations on dams. A strong correlation was observed between the German Ground Motion Service (BBD) satellite data and the in-situ measurements, especially reflecting the seasonal deformation pattern of the dam accurately. The analysis revealed high  $R^2$  values, indicating a strong linear relationship. 90% of the  $p$ -values were below 0.05, demonstrating high statistical significance. These results confirm the potential of PSI satellite technology as a complementary tool for monitoring dams, with precise data analysis being crucial for accuracy.*

## 1. Einleitung

Die messtechnische Überwachung von Deformationen an Stauanlagen beruht auf unterschiedlichen absoluten und relativen, im Idealfall redundanten, Messverfahren. Weitere wesentliche Randbedingungen für die Ausstattung von Stauanlagen mit Messsystemen und Messverfahren ergeben sich aus dem zeitlichen Verlauf typischer Lastwechsel und der Messhäufigkeit, Automatisierung und Personalverfügbarkeit, geometrische und topografische Gegebenheiten sowie Zeit- und Kostenaufwand. Die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) [1] kann insbesondere auch bei älteren Stauanlagen mit weniger umfangreicher Ausstattung an Messsystemen und Messverfahren eine sinnvolle und kostengünstige Ergänzung darstellen, um Deformationen in verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung ohne Einfluss der vorab genannten komplexen Randbedingungen zu erfassen. Diese Technik der multitemporalen Radarinterferometrie kann Veränderungen auf der Erdoberfläche im Millimeterbereich aufnehmen.

Die PSI-Technik wird bereits von Bodenbewegungsdiensten, welche Sentinel-1-Daten des europäischen Copernicus-Programms nutzen, verwendet, um deutschlandweit bzw. europaweit Deformationen zu messen und kostenfrei online zur Verfügung zu stellen [2, 3, 4]. Informationen über Deformationen werden so alle sechs bis 12 Tage aufgenommen und dargestellt. Deformationszeitreihen in dieser zeitlichen Auflösung stehen

seit 2015 zur Verfügung und ermöglichen somit die Erkennung von Trends und Anomalien in Deformationsmustern, was zu einem besseren Verständnis des strukturellen Verhaltens im Zeitverlauf führt.

Diese Studie fokussiert sich auf die Daten des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) [2, 5]. Dabei wird die Anwendbarkeit der PSI-Technik bei der Überwachung einer Gewichtsstaumauer im Freistaat Thüringen untersucht. Zwar gibt es bereits zahlreiche Ansätze, die den Einsatz der PSI-Technik für die Überwachung von Dämmen analysieren [6, 7], doch beschränken sich diese Ansätze in der Regel auf Staudämme, die andere Verformungsmuster aufweisen als Schwergewichtsmauern. Das Fehlen von In-situ-Vergleichsdaten stellt oft ein großes Hindernis für eine Inbezugnahme dieser Technik dar. Darüber hinaus werden bestehende Bodenbewegungsdienste zwar für die Überwachung von Geoprozessen wie Senkungen in Bergbauregionen oder Hebungen in geothermischen Gebieten genutzt, doch die spezifische Nutzung bestehender Bodenbewegungsdienste für die Überwachung langfristiger Verformungstrends von Talsperren wurde noch nicht bewertet. Daher findet in dieser Studie ein statistischer Vergleich zwischen In-situ Messungen einer Staumauer in Thüringen mit den PSI-Ergebnissen des BBD statt, um die Frage zu klären, ob die PSI-Technik als Ergänzung zu traditionellen Messverfahren für Staubauwerke genutzt werden kann.

## 2. Untersuchungsgebiet

Die Trinkwassertalsperre Leibis/Lichte, angesiedelt im südlichen Bereich des Thüringer Schiefergebirges, spielt eine zentrale Rolle in der Region, indem sie die Lichte, einen Nebenfluss der Schwarza, staut. Mit einer Höhe von 102,5 Metern über der Gründungssohle, erstreckt sich die Staumauer, eine gerade, nicht gekrümmte Betonkonstruktion, über eine Länge von 369 Metern. Die Breite der Talsperre misst am Mauerfuß 80,60 Meter, während die Mauerkrone auf 8,9 Meter kommt. Das Reservoir südlich der Mauer umfasst ein Volumen von 33,3 Millionen Kubikmetern bei Betriebsstau und erreicht bei Vollstau 38,86 Millionen Kubikmeter. Die Errichtung der Talsperre, die als die zweithöchste Talsperre Deutschlands gilt, begann am 6. September 2002 und fand ihren Abschluss im Jahr 2010. Drei Jahre später, im Jahr 2013, erhielt das Bauwerk die behördliche Erlaubnis zur Inbetriebnahme. Seitdem erfüllt die Talsperre vielfältige Funktionen: Sie liefert täglich etwa 44.000 Kubikmeter aufbereitetes Trinkwasser für Ostthüringen, generiert Energie mittels zweier Turbinenanlagen und leistet einen wesentlichen Beitrag zum Hochwasserschutz und zur Niedrigwasseraufhöhung. Verantwortlich für den Betrieb und die Instandhaltung der Talsperre ist die Thüringer Fernwasserversorgung, welche die Messdaten für diese Untersuchung zur Verfügung gestellt hat (TFW) [8].

## 3. Daten

In diesem Kapitel werden die in dieser Studie verwendeten In-situ Messungen und BBD-Daten vorgestellt.

### 3.1. In-situ Messungen

Die Zuverlässigkeit der Talsperre Leibis/Lichte wird unter anderem durch fünf hochpräzise Lotanlagen überwacht, die in das Bauwerk integriert sind. Diese Messsysteme erfassen sowohl radiale (x-Richtung) als auch tangential (y-Richtung) Bewegungen des Bauwerks in Höhe der Aufhängung des Pendellotes gegenüber tiefer gelegenen Messhorizonten. Speziell platzierte Pendellote in den Mauerfeldern 7, 13, 18, 21 und 25 (vgl. Abbildung 1) ermöglichen eine detaillierte Überwachung der Mauerbewegungen in diesen Schlüsselbereichen.

Die gewonnenen Daten der Pendellote werden von der Thüringer Fernwasserversorgung bereitgestellt [8] und waren bis Juli 2018 Gegenstand eines regelmäßigen Rhythmus von zwei Messungen im Monat. Nach diesem Zeitpunkt wurde die Frequenz auf eine Messung monatlich reduziert. Eine Ausnahme bildete das Segment PL 13, für das zwischen August 2019 und Juni 2020 ein intensiviertes Sondermessprogramm mit bis zu 13 Messungen pro Monat stattfand. Ab Juli 2020 normalisierte sich die Messfrequenz für PL 13 wieder auf die standardmäßige monatliche Erhebung. Die Messdaten beziehen sich auf die Bewegung der Mauerkrone (MK) im Vergleich zum Hauptkontrollgang (HKG), folglich abgekürzt als MK zu HKG.

## 3.2. BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD)

Der BBD ist eine innovative WebGIS-Anwendung, entwickelt von der BGR [2]. Diese Plattform dient der Bereitstellung und Verarbeitung von Daten, die durch die Sentinel-1 Satelliten erfasst werden. Die Daten, welche Nutzern kostenfrei zugänglich gemacht werden, umfassen sowohl Informationen aus aufsteigenden (Ascending) als auch absteigenden (Descending) Orbits und werden in der Sichtlinie des Satelliten (engl., line of sight) dargestellt. Darüber hinaus bietet der BBD speziell aufbereitete Produkte, die Bewegungen in vertikaler Richtung sowie in Ost-West-Richtung (EastWest) abbilden. Für die Verarbeitung dieser Satellitendaten aus dem Copernicus-Programm greift der BBD auf die PSI-Methode zurück. Diese hochentwickelte Technik ermöglicht die Detektion von Deformationen in einem Bereich von etwa  $\pm 2\text{mm}$  bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr. Detaillierte Einblicke in die PSI-Technik sind im Kapitel 4.1 nachzulesen. Die Sentinel-1 Satelliten zeichnen sich durch ihre hohe zeitliche Auflösung aus, mit einer Wiederholrate von circa sechs Tagen, was eine kontinuierliche und genaue Beobachtung ermöglicht. Der BBD stellt Daten für den Zeitraum von Mai 2015 bis November 2021 zur Verfügung, wodurch eine umfassende und langfristige Analyse von Bodenbewegungen gewährleistet wird. Die zur Verfügung gestellten Daten des Dienstes werden jährlich um die Daten des vorangegangenen Jahres ergänzt.

## 4. Methodik

Im Folgenden wird die in dieser Studie angewendete Methodik vorgestellt. Zuvor wird die PSI-Technik kurz erläutert.

### 4.1. PSI

Die für diese Studie relevanten BBD-Daten stammen aus den Aufnahmen der C-Band Sentinel-1 (S-1) Satelliten. Das an Bord dieser Satelliten installierte Synthetic Aperture Radar (SAR) ist ein aktives Radarsystem. Es sendet Radarwellen aus, die von der Erdoberfläche zurückgestreut und vom Sensor wieder empfangen werden. Durch die Analyse der Intensität dieser zurückgestreuten Radarstrahlen sowie der Zeit, die das Radarsignal für die Strecke zum Ziel und zurück benötigt, lassen sich Radarbilder generieren. Diese Datenbasis ermöglicht es weiterhin, spezifische Produkte wie die PSI-Daten des BBD zu erstellen. Die PSI-Technik repräsentiert dabei eine fortschrittliche Methode der Radar-Fernerkundung, die speziell für die Messung von Oberflächenbewegungen konzipiert wurde. Sie basiert auf der Technik der differentiellen SAR-Interferometrie (DInSAR). Dieses Verfahren vergleicht die Phasendifferenzen von mehreren SAR-Aufnahmen desselben Beobachtungsgebiets, die zu verschiedenen Zeitpunkten erstellt wurden. Über die Auswertung dieser Phasenunterschiede ist es möglich, Verformungen der Erdoberfläche im Bereich von wenigen Millimetern zu erfassen und zu analysieren.

Eine PSI-Analyse liefert üblicherweise zwei Ergebnisse: Zum einen eine räumliche Verteilung von Punkten (PS-Punkte), die in der Analyse identifiziert werden konnten. Zum anderen ist in jedem PS-Punkt enthalten und setzt sich zusammen aus einem Bewegungsprofil über die gesamte Untersuchungsdauer. Jede einzelne verwendete Satellitenszene stellt somit einen Messpunkt innerhalb des Profils dar.

#### 4.2. Datenverarbeitung

Zur Erstellung der gewünschten Statistiken wurden hauptsächlich zwei Softwarepakete genutzt. Das geografische Informationssystem QGIS diente dazu, nachbarschaftliche Beziehungen zwischen den PSI-Punkten aus dem BBD (fortan als BBD-Punkte bezeichnet) und den Lotpunkten herzustellen. Dazu wurde das Verfahren „nearest neighbour“ für alle Bewegungsrichtungen (Ascending, Descending und EastWest) genutzt, sodass diese dem jeweilig nächstliegenden Lotpunkt zugeordnet werden konnten. Zur Erstellung der Statistiken der zuvor erzeugten Punktpaare wurde R genutzt.

Die BBD-Punkte wurden mit dem nächstliegenden Lotpunkt für jeweils alle Richtungen (Ascending, Descending und EastWest) mit jeweils der radialen (MK zu HKG (x)) und tangentialen (MK zu HKG (y)) Lotmessung validiert. Für jede der sechs BBD\_ID-Lotpunkt-Kombinationen wurde der monatliche Mittelwert berechnet. Dieser Schritt dient dazu, lineare Regressionen und statistische Kennzahlen zu ermitteln. Die Bildung des Mittelwerts ist besonders wichtig, um eine konsistente Vergleichsbasis für die verschiedenen Datensätze zu schaffen, da die Zeitpunkte der Datenerhebung variieren können. In der Analyse der Ergebnisse wurden insbesondere das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und der p-Wert als Kriterien zur Validierung herangezogen. Bei einem p-Wert unter der 0,05-Grenze kann von einer statistisch signifikanten Korrelation ausgegangen werden, während ein  $r^2$  über 0,5 auf eine starke lineare Beziehung zwischen den Datensätzen hindeutet.

### 5. Ergebnisse und Diskussion

In Tabelle 1 sind die aggregierten Ergebnisse bezüglich der p-Werte und der  $R^2$ -Werte für die sechs analysierten BBD-Punkt-Lotpunkt-Kombinationen ersichtlich. Generell sind die p-Werte durchweg niedrig, was auf einen signifikanten  $r^2$  hinweist. Insbesondere bei den Descending-Punkten liegen 90 bis 95% der Werte unterhalb der Schwelle von 0,05. Bei den Ascending-Punkten befinden sich 76 bis 81% unter diesem kritischen Wert, während bei den EastWest-Punkten 57 bis 71% der Werte darunterfallen. Bezüglich des  $r^2$  ist festzustellen, dass die Ascending-Richtung die geringsten Werte aufzeigt, mit maximal 5% der Punkte, die über 0,5 liegen. Im Gegensatz dazu präsentiert die Descending-Richtung die höchsten  $R^2$ -Werte, mit 42 bis 50% der Punkte, die über dem Wert von 0,5 liegen. EastWest zeigt ebenfalls eine beachtliche Anzahl an Punkten (29%) über dieser

Schwelle. Besonders hervorzuheben ist, dass die Kombination von Descending mit Lot (x) die höchsten  $R^2$ -Werte erreicht. Angesichts der durchweg niedrigen p-Werte wird in den folgenden Ausführungen ein besonderer Fokus auf die Ergebnisse für Descending mit MK zu HKG in x-Richtung (radial) gelegt.

Tabelle 1: Zusammenfassende Ergebnisse aller p-Werte und  $R^2$ -Werte für alle BBD-Punkte mit nächstliegendem Pendellot (nearest neighbour) für alle Richtungen (Ascending, Descending, EastWest) und Lot MK zu HKG (x) und (y)

Messung	Ascending		Descending		EastWest	
	Lot (x)	Lot (y)	Lot (x)	Lot (y)	Lot (x)	Lot (y)
p-Wert (<0,05)	76%	81%	90%	95%	71%	57%
$R^2$ (> 0,5)	0%	5%	50%	42%	29%	29%

Abbildung 1 veranschaulicht die räumliche Verteilung der  $R^2$ -Werte für die Kombination Descending mit MK zu HKG in der x-Richtung, wobei die Darstellung farblich nach dem Prinzip eines Ampelsystems gestaltet ist. Diese visuelle Aufbereitung macht die Zweiteilung der Ergebnisse deutlich, die auch in Tabelle 1 ersichtlich ist, mit jeweils 50% der Werte unter und über dem Schwellenwert von 0,5.

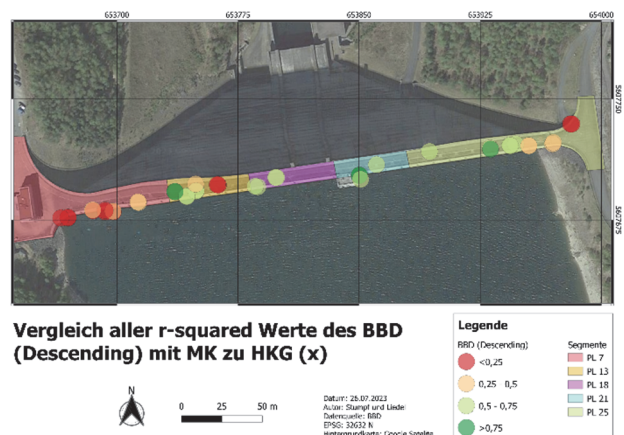


Abbildung 1: Vergleich aller  $R^2$ -Werte des BBD (Descending) mit MK zu HKG (x)

Ergänzend dazu liefert Tabelle 2 eine detaillierte Übersicht über die Verteilung der  $R^2$ -Werte in Bezug auf die spezifischen Lotpunkte. Besonders auffällig ist dabei der Lotpunkt PL 21, bei dem die  $R^2$ -Werte konsequent über 0,5 liegen. Im Gegensatz dazu befinden sich die validierten Werte für den Lotpunkt PL 7 durchgehend unterhalb dieser Schwelle. Aus der Kombination der Informationen aus Tabelle 2 und Abbildung 1 lässt sich zudem erkennen, dass das mittlere Segment der Staumauer tendenziell höhere  $R^2$ -Werte aufzeigt als die äußeren Bereiche.

Diese Beobachtungen liefern wertvolle Einsichten in die räumliche Verteilung der Deformationsmessungen und deren Zuverlässigkeit entlang der Staumauer.

Tabelle 2: Verteilung der R<sup>2</sup>-Werte (MK zu HKG (x) / Descending) der den Pendellotdaten zugeteilten BBD-Punkte

Pendellot	< 0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 0,75	> 0,75
PL 7	7	4	0	0
PL 13	2	1	4	2
PL 18	0	0	4	0
PL 21	0	0	2	2
PL 25	2	4	5	1
<b>Summe</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>15</b>	<b>5</b>

Gemäß den in Tabelle 1 präsentierten Daten, befinden sich 90% der p-Werte unterhalb der signifikanten Schwelle von 0,05. Diese statistische Signifikanz findet auch in der visuellen Darstellung der Ampelkarte in Abbildung 2 ihren Ausdruck.

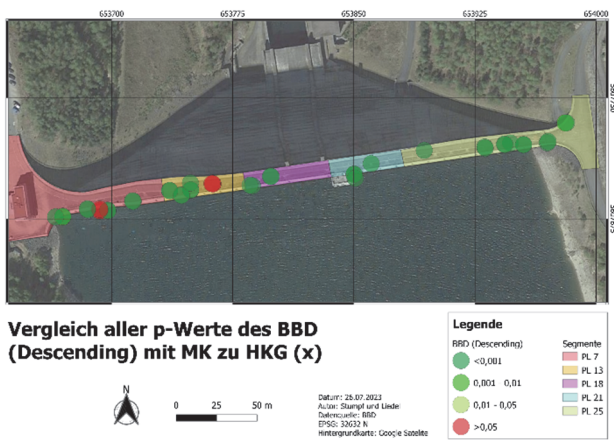


Abbildung 2: Vergleich aller p-Werte des BBD (Descending) mit MK zu HKG (x)

Ein weiterer Blick in Tabelle 3 zeigt, dass lediglich drei Punkte einen p-Wert über 0,05 aufweisen. Zwei dieser Punkte stehen in Verbindung mit Validierungen am Lotpunkt PL 13, während der dritte Punkt mit dem Lotpunkt PL 7 assoziiert ist. Insgesamt liegen somit 37 der insgesamt 40 untersuchten Punkte unter der signifikanten Marke von 0,05.

Tabelle 3: Verteilung der p-Werte (MK zu HKG (x) / Descending) der den Pendelloten zugeteilten BBD-Punkte

Pendellot	< 0,001	0,001 - 0,01	0,01 - 0,05	> 0,05
PL 7	8	1	1	1
PL 13	7	0	0	2
PL 18	4	0	0	0
PL 21	4	0	0	0
PL 25	11	1	0	0
<b>Summe</b>	<b>34</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>3</b>

In der Validierung der drei Richtungen der BBD-Daten zeigte sich, dass die Descending-Richtung die höchsten R<sup>2</sup>-Werte liefert, während die Ascending-Richtung die niedrigsten aufweist und die Werte für EastWest eine

mittlere Position einnehmen. Die rechtsblickenden Sentinel-1 Satelliten bewegen sich im Descending-Orbit in einer Nord-Süd-Bewegung und erfassen die Staumauer aus östlicher Perspektive. Im Gegensatz dazu nehmen sie im Ascending-Orbit eine Süd-Nord-Route ein und blicken von Westen auf die Talsperre.

Es bedarf weiterführender Untersuchungen, um die Gründe für die auffällig stärkeren linearen Beziehungen in den Descending-Daten im Vergleich zu den Ascending-Daten zu klären. Eine mögliche Erklärung könnte in der spezifischen Ausrichtung der Talsperre Leibis/Lichte liegen, die sich hauptsächlich in Ost-West-Richtung erstreckt, mit einer leichten Neigung in Nord-Süd-Richtung, wie in den Abbildungen 1 und 2 illustriert.

Insgesamt weisen die R<sup>2</sup>-Werte mehrheitlich niedrige Ausprägungen auf, was auf eine eher schwache lineare Korrelation zwischen den Lot- und BBD-Daten hindeutet. Ein konkretes Muster, das aufzeigt, ob die radialen Lotdaten (MK zu HKG in x-Richtung) oder die tangentialen Lotdaten (MK zu HKG in y-Richtung) konsistent höhere R<sup>2</sup>-Werte oder niedrigere p-Werte aufweisen, konnte nicht identifiziert werden. Die p-Werte waren über alle Richtungen hinweg relativ niedrig (unter 0,05), was auf eine hohe Wahrscheinlichkeit für einen statistischen Zusammenhang zwischen den Lot- und BBD-Daten schließen lässt. Trotz dieser Indikation für eine Korrelation deuten die Ergebnisse der statistischen Auswertung darauf hin, dass die meisten BBD-Punkte für eine präzise Deformationsmessung der Talsperre Leibis/Lichte nicht geeignet sind. Mögliche Ursache hierfür könnten in der Darstellung der BBD-Webanwendung liegen, jedoch auch an der PSI-Technik selbst, die keine genaue Positionierung innerhalb eines Pixels ermöglicht. So könnten auch Punkte in die Analyse einbezogen worden sein, die nicht unmittelbar auf der Mauerkrone lokalisiert sind. Eine vertiefende Betrachtung der p-Werte der Descending-Daten in Verbindung mit MK zu HKG in der x-Richtung unterstreicht die hohe Wahrscheinlichkeit einer Korrelation zwischen den BBD- und Lotdaten. Zudem deuten 50% der R<sup>2</sup>-Werte auf eine ausgeprägte lineare Beziehung hin. Besonders bemerkenswert ist, dass die mittleren Abschnitte der Staumauer in Tabelle 3 höhere R<sup>2</sup>-Werte verzeichnen als die Randbereiche. Diese Beobachtung wird durch eine vergleichbare Studie gestützt, die feststellt, dass PSI-Punkte an den Flügeln der Mauer Deformationen tendenziell weniger genau erfassen als jene in mittleren Bereichen, was jedoch auch mit den geringeren Bewegungsamplituden zusammenhängt [9]. Eine plausible Erklärung für dieses Phänomen könnte in der spezifischen Ausrichtung und Wölbung der Staumauer liegen, die eine optimierte Erfassung der mittleren Segmente durch den S-1 Satelliten begünstigt. Darüber hinaus ist es möglich, dass dichte Vegetation an den Randbereichen der Staumauer eine Durchdringung der Radarstrahlen erschwert, was zu niedrigeren R<sup>2</sup>-Werten in diesen Segmenten führen könnte. Dieser Umstand könnte auch die niedrigen R<sup>2</sup>-Werte erklären, die bei der Validierung mit dem Lotpunkt PL 7 festgestellt

wurden (siehe Tabelle 2). Jedoch zeigt eine Vergleichsstudie, dass die DInSAR-Technik erfolgreich Deformationen an linearen Strukturen selbst in dicht bewachsenen Gebieten überwachen kann [10]. Daher lässt sich der Einfluss der Vegetation auf die Messergebnisse nicht endgültig bestimmen.

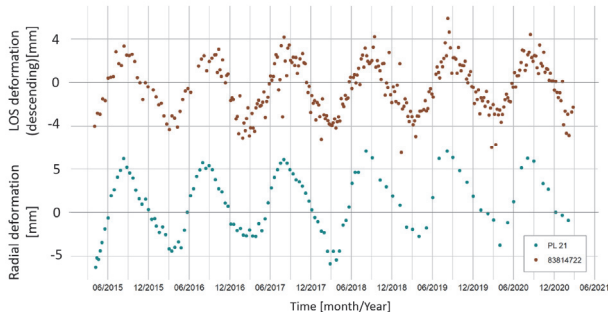


Abbildung 3: Saisonaler Verlauf: Pendellot „PL 21“ MK zu HKG (x) und BBD-Punkt 82814722 aus dem Descending-Orbit

Die Analyse des saisonalen Deformationsverlaufs demonstriert eindrucksvoll, wie präzise die BBD-Daten die zyklischen Bewegungen der Staumauer Leibis/Lichte über die Zeit abbilden können, besonders nach einer sorgfältigen statistischen Vorauswahl der BBD-Punkte. Dies wird sowohl in Abbildung 3 als auch durch die Ergebnisse der linearen Regression in Abbildung 4 deutlich, welche eine starke Korrelation zwischen den Datenreihen aufzeigt. Zusätzliche Studien stützen diese Ergebnisse und untermauern das hohe Potenzial der PSI-Technik in Verbindung mit S-1 Satellitendaten für die Überwachung von Stauwerken [10, 11]. Zum einen wird berichtet, dass die PSI-Technik den jahreszeitlichen Verlauf der Möhnetalsperre präzise und in Einklang mit den Lotdaten wiedergibt [10]. In einer weiteren Studie wird hingegen von einem mit dem Wasserstand korrespondierenden, zyklischen Bewegungsverlauf der untersuchten Staudämme berichtet [11]. Aufbauend auf diesen Forschungserkenntnissen bestätigt die vorliegende Arbeit die Eignung der PSI-Technik als valide Methode zur Deformationsmessung und betont das Potential dieser Technik für die präzise Überwachung von Stauwerken.

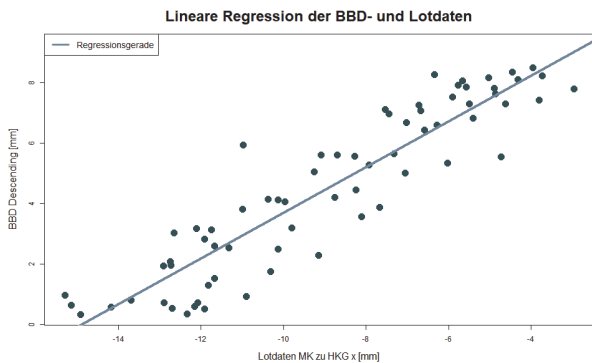


Abbildung 4: Lineare Regression des Pendellots „PL 21“ MK zu HKG (x) mit dem BBD PS-Punkt 83814722 aus dem Descending-Orbit

In dieser Studie lag der Fokus auf der Untersuchung von Lotmessungen von MK zu HKG. Es besteht jedoch die

Möglichkeit, diese Messungen durch Daten aus dem Mittelkontrollgang, trigonometrische In-situ Daten und Wasserstandsdaten zu ergänzen, um ein umfassenderes Bild der Staumauerdeformationen zu erhalten. Eine vertiefende Untersuchung weiterer Richtungen neben der Descending-Richtung mit MK zu HKG (x) könnte ebenfalls wertvolle Einblicke liefern. Die methodische Entscheidung, den Mittelwert pro Monat für eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu berechnen, modifiziert die Rohdaten und könnte die Ergebnisse der Studie beeinflussen. Alternativ hätten die Rohdaten direkt validiert werden können, indem die BBD-Daten den zeitlich am nächsten liegenden Lot-Daten zugeordnet worden wären, eventuell mit einer maximalen Zeitspanne von beispielsweise drei Tagen. Ein Nachteil dieser Methode ist die Tatsache, dass nicht alle verfügbaren Daten in die Analyse hätten einfließen können.

In Bezug auf die Wahl des Frequenzbands für die PSI-Deformationsmessungen wird in [12] darauf hingewiesen, dass Aufnahmen im X-Band gegenüber denen im C-Band deutliche Vorteile zeigen. Eine Analyse der Talsperre Leibis/Lichte mit X-Band-Daten, etwa vom TerraSAR-X Satelliten, könnte daher eine sinnvolle Fortführung dieser Studie darstellen. Allerdings sind TerraSAR-X Daten nicht frei verfügbar und werden vom BBD nicht als standardmäßiges PSI-Produkt angeboten. Es ist jedoch auch festzuhalten, dass S-1 Daten den besten Kompromiss zwischen räumlicher Auflösung und Kohärenzeigenschaften bieten, insbesondere im Hinblick auf Datenverfügbarkeit und zeitliche Wiederholbarkeit [13].

In dieser Arbeit wurden mehrere statistische Metriken berechnet, jedoch nur  $R^2$  und p-Wert als Validierungskriterien herangezogen. In vergleichbaren Studien wurde der Root Mean Squared Error zur Analyse von Deformationsmustern eingesetzt [14], während andere neben  $R^2$  auch die Explained Sum of Squares, die Residual Sum of Squares und der Mean Squared Error als statistische Metriken für die Klassifizierung von Bodenbewegungen mit PSI-Zeitreihen der S-1 Satelliten verwendeten [15]. Eine Erweiterung der vorliegenden Arbeit könnte darin bestehen, diese und weitere statistische Metriken zur detaillierteren Analyse und Validierung der Daten einzubeziehen.

## 6. Fazit

In dieser Studie wurden die mittels PSI erzeugten BBD-Daten der Sentinel-1 (S-1) Satelliten, speziell für die Richtungen Ascending, Descending und EastWest, gründlich analysiert. Diese Satellitendaten wurden mit den präzisen In-situ Pendellot-Daten der Talsperre Leibis/Lichte korreliert. Die vorliegenden Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung und Nützlichkeit von Diensten wie dem BBD, der auf der PSI-Technik basiert, für die Überwachung kritischer Infrastrukturen wie Staumauern. Trotz der nicht optimalen Ausrichtung der Talsperre Leibis/Lichte für die PSI-Technik zeigen die BBD-Daten eine gute Übereinstimmung mit den In-situ-Messungen. Dies wird durch einen  $r^2$  verdeutlicht, der bei bestimmten PS-

Punkten über 0,8 liegt. Dadurch wird die praktische Anwendbarkeit von Bodenbewegungsdiensten basierend auf PSI, selbst unter herausfordernden geodätischen Bedingungen, betont. Die Fähigkeit der PSI-Technik, konsistente und verlässliche Daten zu liefern, zusammen mit dem Potenzial für häufige Überwachungen, etabliert sie als wertvolles Werkzeug für die Sicherung und Stabilität von kritischen Strukturen. Da die Bodenbewegungsdienste jährlich aktualisiert werden, können langfristige Deformationen effektiv überwacht werden.

Zukünftige Arbeiten werden weitere Ergebnisse dieser PS-Analyse präsentieren und die Ergebnisse für jedes Segment genauer interpretieren, unter Berücksichtigung weiterer In-situ-Daten und der Struktur der Talsperre. Insbesondere werden Pendellotmessungen

durch Messungen im Hauptkontrollgang, trigonometrische In-situ-Daten und Wasserstandsdaten ergänzt.

### Kontaktdaten

Friedrich-Schiller-Universität Jena  
Institut für Geographie  
Lehrstuhl für Fernerkundung  
Leutragraben 1  
07743 Jena

Jannik Jänichen

Email: [jannik.jaenichen@uni-jena.de](mailto:jannik.jaenichen@uni-jena.de)

### Literaturverzeichnis

- [1] Ferretti, Alessandro; Prati, Claudio; Rocca, Fabio (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8 -20.
- [2] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2023): BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD), <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/mapapps/resources/apps/bbd/index.html?lang=de> [22.01.2024].
- [3] EGMS (2023): European Ground Motion Service (EGMS), <https://egms.land.copernicus.eu> [22.01.2024].
- [4] Bezirksregierung Köln (2024): Bodenbewegungskataster NRW, <https://www.bezreg-koeln.nrw.de/geobasis-nrw/produkte-und-dienste/bodenbewegungen/bodenbewegungskataster-nrw> [06.02.2024]
- [5] Kalia, André; Frei, Michaela; Lege, Thomas (2021): Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform, in: ZfV-Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Lagemanagement, zfv 4/2021.
- [6] Lazecky, Milan; Perissin, Daniele; Wang, Zhiying; Lei, Lila; Qin, Yuxiao (2014): Observing Dam's Movements with Spaceborn SAR Interferometry, in: Engineering Geology for Society and Territory, 5, 131 – 136.
- [7] Ruiz-Armenteros, A.M.; Lazecky, Milan; Hlavacova, Ivana; Bakon, Matus; Delgado Blaseo, Jose Manuel; Sousa, Joaquim; Lamas, Francisco, Marchamalo, Miguel, Cuenca, Miguel Caro; Papco, Juraj; Perissin, Daniele (2018): Deformation monitoring for dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain), in: Procedia Computer Science 2018, 138, 346 – 353.
- [8] Thüringer Fernwasserversorgung (TFW) (2023): Talsperre Leibis/Lichte. Unveröffentlichte Messdaten.
- [9] Jänichen, Jannik; Schnullius, Christiane; Baade, Jussi; Last, Katja; Bettzieche, Volker; Dubois, Clémence (2022): Monitoring of Radial Deformations of a Gravity Dam Using Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry, in: Remote Sensing, 14(5), 1-19.
- [10] Jänichen, Jannik; Dubois, Clémence; Baade, Jussi; Schnullius, Christiane; Bettzieche, Volker; Last, Katja (2022): Satellitenüberwachung der Bewegungen der Möhnestaumauer, in: Wasserwirtschaft, 11/2022, 15-22.
- [11] Mazzanti, Paolo; Perissin, Daniele; Rocca, Alfredo (2015): Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry: Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives, in: Conference: Proceedings of SHMII 2015, Torino, Italy.
- [12] Crosetto, Michele; Monserrat; Oriol, Cuevas-González, María; Devanthery, Núria; Crippa, Bruno (2016): Persistent Scatterer Interferometry: A review, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78-89.
- [13] Fárová, Kateřina; Jelének, Jan; Kopačková-Strnadová, Veronika; Kycl, Petr (2019): Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel-1 Data to Monitor Highway Stability: A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide, Czech Republic, in: Remote Sensing, 11(22), Artikel 2670.
- [14] Schlögl, Matthias; Widhalm, Barbara; Avian, Michael (2021): Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 172, 132-146.
- [15] Mirmazloumi, Mohammad; Wassie, Yismaw; Navarro, José Antonio; Palamà, Riccardo; Crosetto, Michele; Monserrat, Oriol (2022): Ground Movement Classification Using Statistical Tests Over Persistent Scatterer Interferometry Time Series, in: Procedia Computer Science, 196, 21-26.