

Flächenhafte Analyse von PSI-Daten für die qualitätsgesicherte Modellierung von Bodenbewegungen in Niedersachsen

Areal Analysis of PSI Data for Quality-assured Modelling of Ground Motions in Lower Saxony

Marco Brockmeyer, Vanessa Koppmann, Christian Schnack, Cord-Hinrich Jahn, Hamza Alkhatib, Ingo Neumann

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde bereits die Fragestellung diskutiert, ob die deutsche Nordseeküste systematischen Senkungserscheinungen unterliegt. Zur Beantwortung wurden von der Landesvermessung großräumige Feinnivellements und Zeitreihen der Höhen- und Lagefestpunkte aus dem amtlichen Festpunktinformationssystem (AFIS) hinsichtlich Veränderungen der Erdoberfläche analysiert. Mit den Untersuchungen konnten geogen und anthropogen verursachte Deformationsprozesse beobachtet werden, die große Auswirkungen auf Umwelt und Infrastruktur zur Folge haben können. Zur Abgrenzung der Einflussbereiche von Bodenbewegungen wird zunehmend die Persistent Scatterer Interferometry (PSI) aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung eingesetzt. Basierend auf dieser Technik wurde vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) eine Prozesskette zur Datenanalyse und flächenhaften Geschwindigkeitsmodellierung entwickelt. Zur Erprobung wurde das Verfahren auf PSI-Datensätze der Sentinel-1-Mission im Bereich Wilhelmshaven angewandt und anhand unabhängiger Daten validiert. Die resultierenden Bewegungsmodelle in vertikaler und horizontaler Richtung bieten einen erheblichen Informationsgewinn zur Detektion und Bewertung von Bodenbewegungsgebieten.

Schlüsselwörter: Bodenbewegungen, Radarinterferometrie, Persistent Scatterer Interferometry (PSI), Zeitreihenanalyse, Bodenbewegungsmodellierung

At the beginning of the 20th century, the question of whether the German North Sea coast is subject to systematic subsidence was already in discussion. To answer the question, the federal surveying agency analysed large-scale precise levelling and time series of control fixed points stored in the official control point information system (AFIS), from which changes on the earth's surface could be derived. The investigation allowed observing geogenic and anthropogenic deformation processes, which could have significant effects on the infrastructure and the environment. To delimitate the areas influenced by ground movement, persistent scatter interferometry (PSI) is increasingly used due to its high temporal and spatial resolution. Based on this remote sensing method, the federal surveying agency of lower Saxony (LGLN) developed a process chain for data analysis and large-scale velocity modelling. For testing, the procedure was applied on PSI-data sets of the Sentinel-1 mission in the area of Wilhelmshaven and validated with independent data respectively. The resulting models of movement in the vertical and horizontal direction provide a substantial increase in information for detecting and evaluating areas of ground movement.

Keywords: Ground movement, radar interferometry, Persistent Scatterer Interferometry (PSI), time series analysis, ground motion modelling

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Niedersachsen bietet vom Bergland bis zur Küstenlandschaft ein breites Spektrum an unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten, wie beispielsweise Geestrücken, Marschböden, Moore oder Flussniederungen. Neben natürlichen Deformationsprozessen hat insbesondere der anthropogene Einfluss große Auswirkungen auf die Tagesoberfläche. Grundwasserentnahmen, Erdöl- und Erdgasförderung sowie Kavernenspeicherbetrieb sorgen für vertikale und horizontale Bewegungen der Erdoberfläche.

Durch anthropogene Massenentnahmen im Erdinneren wird sich das über dieser Entnahmefläche liegende Deckgebirge niedersinken und der entstandene Hohlraum unter dem Druck der oberen und seitlichen Gebirgsschichten wieder schließen. Inwiefern sich das Absinken auf die Tagesoberfläche auswirkt, wird maßgeblich durch die oberen Schichten bestimmt. Über einer großen und tiefer gelegenen Abbaufläche bildet sich ein über den Abbaugrundriss hinausgehender Senkungstrog. Die oberen Gebirgsschichten gleiten jedoch nicht nur lotrecht ab, sondern verhalten sich wie eine sich durchbiegende Platte. Insgesamt gehen mit der muldenförmigen Absenkung der Erdoberfläche dreidimensionale Verschiebungen der Bodenpunkte zum Muldenzentrum einher. Werden alle Punkte unter Vernachlässigung ihrer horizontalen Verschiebung lotrecht um ihre vertikale Bewegung abgetragen, so entsteht eine Profilkurve des Senkungstrogs mit einem Maximum über dem Abbauzentrum (Abb. 1). Die größten Horizontalbewegungen betragen etwa 40 % der Maximalsenkung und treten dort auf, wo der Senkungsbetrag ungefähr die Hälfte der größten Senkung entspricht /Kratzsch 2013/. In Kavernenbetrieben konnten Horizontalbewegungen über den Senkungsnullrand hinaus festgestellt werden /Pollmann 1990/. Auch wenn der Ursprung der verursachten Bewegungen in tieferen Gesteinsschichten liegt, so beschränkt sich der Begriff „Bodenbewegung“ in diesem Artikel ausschließlich auf die messbaren Auswirkungen auf die Tagesoberfläche.

Starke Deformationen stellen eine Gefahr für die Bevölkerung und infrastrukturelle Einrichtungen dar. Ebenso ist der einheitliche integrierte geodätische Raumbezug betroffen /AdV 2017/. Dieser dient der Georeferenzierung raumbezogener Fachdaten in Bereichen wie z.B. Umwelt, Verkehr, Hydrografie, Wasserwirtschaft, Küstenschutz oder Energieversorgung und Anwendungen in der

Ortung und Navigation, dem Hochwasserschutz und der Notfallvorsorge. Das Landesbezugssystem Niedersachsens wird durch die Vermarkungen der Festpunktfelder realisiert /MI 2019/. Liegen die Festpunkte in einem von Bodenbewegungen beeinflussten Gebiet, so hat dies zwangsläufig zur Folge, dass sich diese bewegen und Lagekoordinaten, Höhen und Schwerewerte von ihrem nachgewiesenen Wert abweichen. Dieser Qualitätsverlust begrenzt z.B. die Einsatzfähigkeit des SAPOS – Hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) in Bodenbewegungsgebieten. Liegenschaftsvermessungen erfordern gemäß LiegVermErlass die Einhaltung des Grenzwerts von 20 mm durch SAPOS-Kontrollpunktmessungen /MI 2020/. Kann dieser Grenzwert durch zu starke Bewegungen nicht mehr eingehalten werden, müssen wesentlich kostenintensivere nachbarschaftliche Anpassungen durchgeführt werden. Sofern Messungen in Bodenbewegungsgebieten erfolgen, kann dies zu einer Vermischung von neuen, unkontrollierten mit bestehenden, amtlichen Koordinaten führen.

Dementsprechend ist es für das LGLN unerlässlich, Gebiete mit Bodenbewegungen zu detektieren, abzugrenzen, zu quantifizieren und sich diese Informationen zur Qualitätssicherung des amtlichen Raumbezugs zunutze zu machen. Das Aktualitätsgebot erfordert, Festpunkte mit qualitativ hochwertigen und aktuellen Koordinaten, Höhen und Schwerewerten zu führen, und bedingt die Durchführung großräumiger Messungen in Bodenbewegungsgebieten. Diese sehr zeit- und kostenintensiven Kampagnen können in Bodenbewegungsgebieten durch die Nutzung radarinterferometrischer Daten wesentlich effizienter flankiert werden und bieten somit ein hohes wirtschaftliches Potenzial.

Aktuelle Deformationen können unter Verwendung der Sentinel-1-Daten für die gesamte niedersächsische Landesfläche mit einer sehr hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung überwacht werden. Die niedersächsische Landesvermessung beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit dem satellitengestützten Radarverfahren und begleitet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bei der Entwicklung des Boden-Bewegungsdienstes Deutschland (BBD) /Kalia et al. 2017/, /Lege et al. 2019/. Die Europäische Umweltbehörde (EEA) beabsichtigt, mit dem European Ground Motion Service (EGMS) einen kontinentalen Dienst mit vereinheitlichten Daten der nationalen Lösungen aufzusetzen /EGMS 2017/.

Innerhalb Deutschlands werden derzeit länderspezifische Dienste von den Landesvermessungen Saarland und Nordrhein-Westfalen /Gefeller et al. 2020/ entwickelt. Letzterer soll das Leitnivellement durch Nutzung des Fernerkundungsverfahrens zeitlich ausdünnen und somit eine Kostenersparnis von 10 % erreichen /Riecken et al. 2019/. Beide Länder verfolgen den Ansatz, radarinterferometrische Informationen in einem Raster von 250 m × 250 m zu aggregieren und dem Nutzer diese Rasterinformationen bereitzustellen. Die Landesvermessung Niedersachsens beabsichtigt ebenfalls, einen Bodenbewegungsdienst aufzubauen /Brockmeyer 2019/, der im Folgenden erläutert wird.

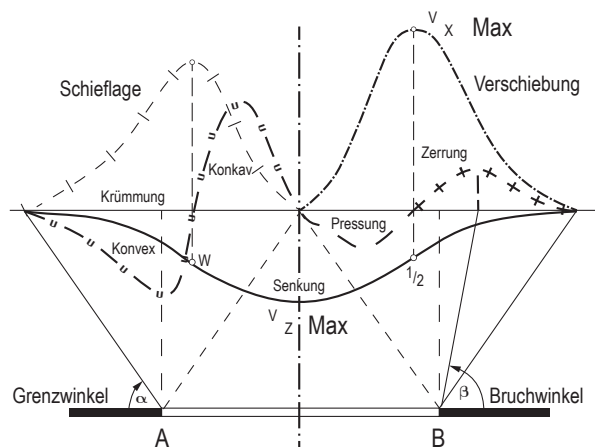


Abb. 1 | Bodenbewegungselemente /Kratzsch 2013/

2 AUFBAU DES BODENBEWEGUNGSDIENSTES NIEDERSACHSEN

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde bereits die These aufgestellt, dass die deutsche Nordseeküste großräumigen Senkungserscheinungen unterliegt /Schütte 1908/. Zur wissenschaftlichen Beantwortung dieser Fragestellung initiierte das Reichsamt für Landesaufnahme und die Landesanstalt für Gewässerkunde von 1928 bis 1937 Feinnivellements /Torge 2007/. Das entstandene Sondernetz des Nordseeküstennivellements (NKN) umfasst dabei bestehende Nivellementlinien 1. Ordnung sowie Verdichtungslinien im Küstenbereich und zu den Nordseeinseln. Auf Basis der Wiederholungsmessungen des NKN in den 1950er-Jahren ließen sich erstmals großräumige Bodenbewegungen geodätisch bestimmen, wodurch /Leonhard 1988/ mittels einer kinematischen Höhenausgleichung lokale Absenkungen an den Flussmündungen nachweisen konnte. Zudem ergaben Untersuchungen unterschiedlicher Datenquellen in 2007, dass ca. 30 % der niedersächsischen Landesfläche von anthropogen und geogen verursachten Bodenbewegungen beeinflusst werden /Jahn et al. 2011/. Zur Erfassung der Bewegungsraten im Küstenbereich wurden in weiterführenden Studien im Verbundprojekt zum Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS) die Beobachtungen des NKN und Koordinatenzeitreihen der SAPOS-Referenzstationen analysiert /Wanninger et al. 2009/. Die flächenhafte Geschwindigkeitsmodellierung, unter Verwendung radialer Basisfunktionen, ergab systematische Senkungen bis zu 3 mm/Jahr im Nordseeküstenbereich /Tengen 2010/. Aufgrund der geringen Anzahl an Basiszentren und der weitmaschigen Nivellementschleifen sowie den weiten Abständen zwischen den SAPOS-Referenzstationen konnten jedoch keine feinen bzw. lokalen Bewegungsstrukturen approximiert werden.

Zur Überwindung dieser Limitierung wird seit 2011 vom LGLN die Persistent-Scatterer Interferometry (PSI-)Methode als ergänzendes Erfassungsverfahren eingesetzt, um in lokal begrenzten Bodenbewegungsgebieten auch außerhalb der linien- und punktförmigen geodätischen Netze Bewegungsraten erfassen zu können /Jahn, 2013/. Mithilfe von Radarsatelliten wird die Beschreibung feiner Bewegungsstrukturen und deren zeitliche Entwicklung an der Erdoberfläche mit einer hohen Auflösung ermöglicht, wodurch die PSI-Technik zum Aufbau eines Bodenbewegungsdienstes prädestiniert ist. Seit dem Start der Sentinel-1A- und Sentinel-1B-Satelliten des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus der Europäischen Union im April 2014 bzw. 2016 liegen flächendeckend Radaraufnahmen im C-Band vor, wodurch länderübergreifende bis hin zu kontinentalen Bewegungsprozesse beobachtet werden können /European Space Agency 2021/. Aufgrund dieser Eigenschaft basiert der BBD der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) auf Radaraufnahmen der Sentinel-1-Satelliten, die mittels PSI-Methode ausgewertet werden /Kalia et al. 2017/.

Im Rahmen einer Kooperation erhielt das LGLN die ungefilterten PSI-Datensätze des BBD für die gesamte niedersächsische Landesfläche, die aufgrund ihrer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösungen ebenfalls ein Kernelement des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen bilden /Brockmeyer et al. 2020/. In Abgrenzung zu den in Abschnitt 1 aufgeführten Bodenbewegungsdiensten wer-

den vom LGLN die PSI-Informationen einer Qualitätssicherung durch die im Abschnitt 3 beschriebenen Analysen unterzogen und mittels Kriging zu einem flächenhaften Bodenbewegungsmodell approximiert. Neben den Radardaten werden in die Modellierung und Validierung zusätzlich Zeitreihen der Höhen- und Lagefestpunkte aus dem amtlichen Festpunktinformationssystem (AFIS) sowie des SAPOS-Koordinatenmonitorings einbezogen. Darüber hinaus werden zur weiteren Validierung in einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) die berechneten Bewegungsmodelle durch Abgleich mit geologischen Daten von unabhängigen Fachexperten begutachtet und ggf. Hinweise zum Auslöser der ablaufenden Deformationsprozesse gegeben. Damit die flächenhafte Approximation der Geschwindigkeitsinformation den wissenschaftlichen Standards gerecht wird, begleitet zudem das Geodätische Institut der Leibniz Universität Hannover den Aufbau des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsens. In dieser Kooperation werden beispielsweise verschiedene Modellierungsansätze gegenübergestellt, bewertet und die Approximationsqualität sowie Performance kontinuierlich gesteigert /Mohammadivojdan et al. 2020/. Durch diese qualitätssichernden Maßnahmen erlaubt das resultierende Geschwindigkeitsmodell die zuverlässige Klassifikation und Abgrenzung von Bodenbewegungsgebieten, wie in /Brockmeyer 2019/ beschrieben. Des Weiteren wird perspektivisch angestrebt, die Informationen des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen über ein Webportal zugänglich zu machen und durch weitere Beobachtungen, wie z. B. auf Basis von wiederholten Schwerefeldmessungen oder des Airborne Laserscannings, die Zuverlässigkeit zu steigern.

3 DATENANALYSE UND FLÄCHENHAFTE MODELLIERUNG VON PSI-DATEN

Die PSI-Methode der Fernerkundung ermöglicht ein Monitoring der Deformationsprozesse der Erdoberfläche mit einer hohen Informationsdichte, die mit etablierten Messverfahren, wie z. B. Nivellement und GNSS, nicht erreicht werden kann. Die Ergebnisse von radarinterferometrischen Auswertungen sind zunächst massenhafte Zeitreihen, die die Verläufe der Entfernungsänderungen zwischen Radarsatellit und konstanten Rückstreuern in den analysierten Synthetic-Aperture-Radar-(SAR-)Daten zeigen. Darauf basierend lassen sich relative Bewegungsraten der unregelmäßig verteilten Persistent Scatterer (PS) in Line-Of-Sight (LOS) des Sensors ableiten. Jedoch unterliegen PSI-Informationen einem hohen Messrauschen mit zahlreichen Ausreißern im Datenmaterial, die beispielsweise durch lokale Deformationen ohne flächenhaftes Bewegungsverhalten verursacht werden. Dies macht eine automatisierte Ausreißerfilterung vor der weiteren Verarbeitung und Interpretation von PS-Geschwindigkeiten zur Qualitätssicherung unerlässlich.

In /Brockmeyer et al. 2020/ wurde daher ein Prozess entwickelt, in dem zeitliche und räumliche Anomalien in den Sentinel-1-Daten separat detektiert werden können. Darauf aufbauend wurde das in Abb. 2 dargestellte flächenhafte Bodenbewegungsmodell der Vertikalkomponente unter Vernachlässigung von horizontalen Verschiebungen berechnet.

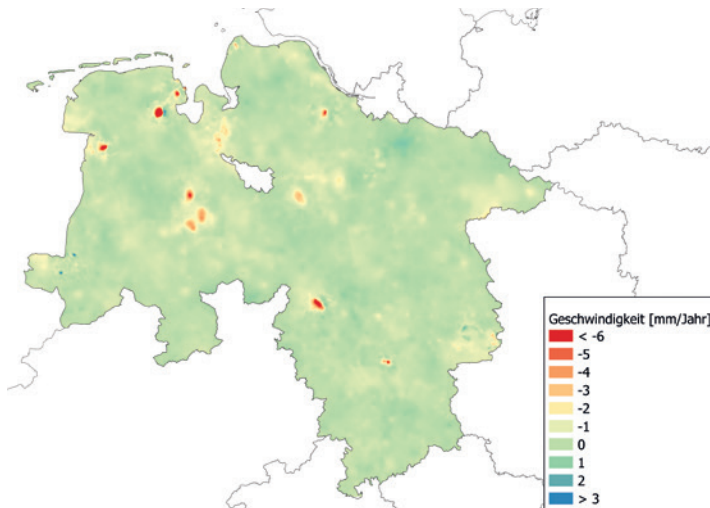


Abb. 2 | Flächenhaftes Bodenbewegungsmodell der Vertikalkomponente unter Verwendung von PSI-Daten der Sentinel-1-Radarsatelliten /Brockmeyer et al. 2020/

Die Annahme nicht vorhandener Lageverschiebungen ist besonders in lokalen Bodenbewegungsgebieten unzutreffend und führt durch Projektion der ursprünglichen LOS-Bewegung in die Vertikalrichtung zu systematischen Verfälschungen. Zudem beruht die entwickelte zeitliche Ausreißerfilterung auf einem linearen Geschwindigkeitsmodell, das besonders in anthropogen verursachten Bodenbewegungsgebieten eher unrealistisch ist.

Um den aufgezeigten Modellschwächen entgegenzuwirken, wurde die bestehende Prozesskette um eine erweiterte Zeitreihenanalyse und eine zusätzliche Modellkombination zur Trennung in vertikale und horizontale Bodenbewegungskomponenten erweitert. Das Analyseschema von punktuellen PSI-Informationen (Rohdaten) hin zu einem flächenhaften Bodenbewegungsmodell (Produkt) wird im Folgenden vorgestellt. Im Abschnitt 3.2 und 3.3 werden die

erweiterten Teilprozesse zur zeitlichen Ausreißerfilterung und Trennung der Bodenbewegungskomponenten beschrieben. Die neuen Ansätze werden mit realen PS-Zeitreihen von Sentinel-1-Radaraufnahmen auf- und absteigender Orbits über den Beobachtungszeiträumen von 2015 bis 2019 aus dem Gebiet Wilhelmshaven erprobt.

3.1 Prozesskette zur Bodenbewegungsmodellierung

PSI-Daten unterliegen grundsätzlich einem hohen Messrauschen und liefern – bedingt durch das Aufnahmesystem – nur Bewegungsinformationen des PS in Richtung des Satelliten. Die unregelmäßige räumliche Verteilung der Rückstreuer mit Clusterbildung in urbanen Bereichen stellte für die flächenhafte Approximation eine besondere Herausforderung zur Bodenbewegungsmodellierung dar. Um dennoch zuverlässige Geschwindigkeitsmodelle auf Basis von PSI-Informationen zu berechnen, wurde die Prozesskette in Abb. 3 entwickelt.

Wie anhand der Darstellung ersichtlich, werden zunächst die Eingangsdatensätze in ascending bzw. descending Orbits aufgeteilt und die konstanten Rückstreuer separat für jeden SAR-Stack analysiert. Durch iterative Ausgleichung der Koeffizienten einer polynomialen Trendfunktion mit ggf. überlagerter Schwingung wird der optimale Bewegungsverlauf der PS und die zugehörige Standardabweichung geschätzt. Dies ermöglicht eine effektive Detektion mit anschließender Elimination von Rückstreuern stark verrauschter Zeitreihen. Eine detaillierte Beschreibung des angewandten Verfahrens ist in Abschnitt 3.2 zu finden. Die abgeleiteten, geprüften Geschwindigkeiten weisen jedoch auch nach der zeitlichen Aus-

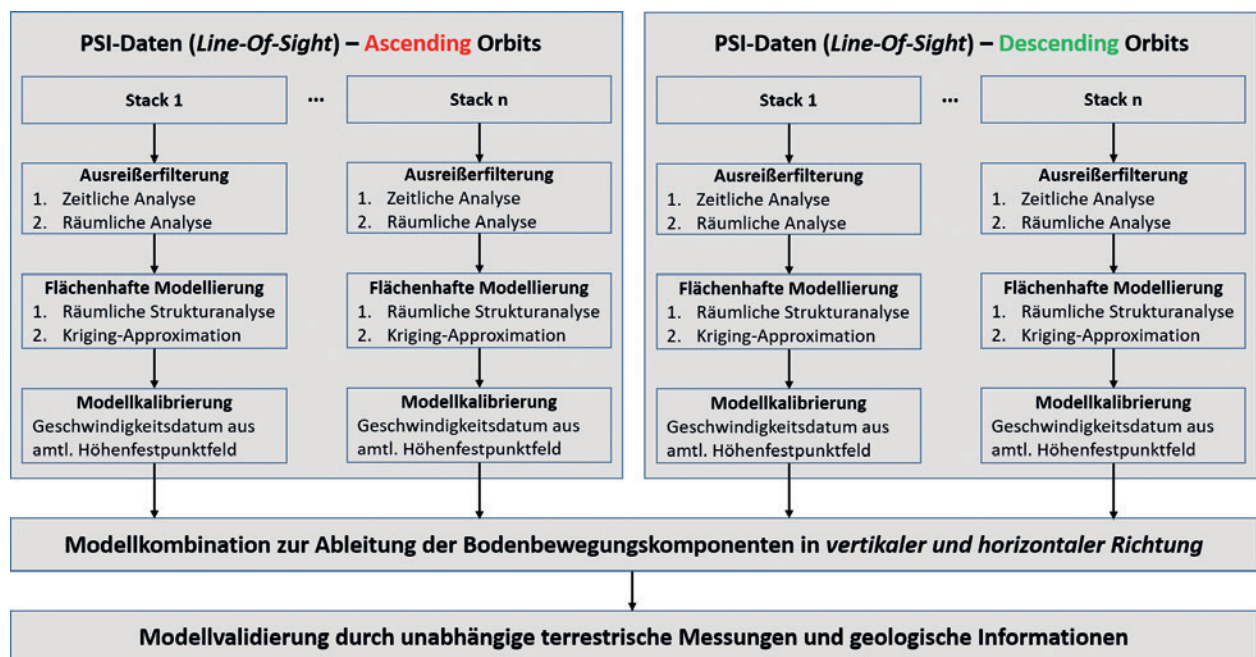


Abb. 3 | Prozesskette zur Analyse punktueller PSI-Daten hin zu einem flächenhaften Bodenbewegungsmodell

reißerfilterung eine hohe räumliche Variabilität durch unterschiedliches Bewegungsverhalten benachbarter Rückstreuer auf. Um die hochfrequenten räumlichen Anomalien aus dem Datenmaterial zu entfernen, wird eine Nachbarschaftsanalyse nach /Brockmeyer et al. 2020/ durchgeführt, die auf dem Grundsatz „Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things“ beruht /Tobler 1970/.

Der folgende Teilprozess umfasst die flächenhafte Modellierung mit dem Ziel einer Approximation der punktuellen PS-Geschwindigkeiten auf ein regelmäßiges Raster und die Koordinaten des amtlichen Festpunktfelds. Dazu wird zunächst eine räumliche Strukturanalyse mit resultierendem Variogramm durchgeführt, das die Grundlage für eine anschließende Ordinary-Kriging-Approximation bildet, die ebenfalls dem Grundsatz von /Tobler 1970/ folgt. Dieses Verfahren berücksichtigt die individuellen Bewegungsstrukturen und ist aufgrund des „Screening Effekts“ prädestiniert zur Modellierung unregelmäßig verteilter Stützstellen /Wackernagel 1998/. Insbesondere bei großen Datenmengen ist jedoch zur flächenhaften Abbildung der Geschwindigkeiten ein hoher Rechenaufwand erforderlich. Damit die erstellten Bewegungsmodelle der jeweiligen Stacks landesweit vergleichbar sind, wird im Rahmen einer Modellkalibrierung ein einheitliches Geschwindigkeitsdatum aus den Daten ausgewählter Höhenfestpunkte übertragen /Brockmeyer et al. 2020/.

Im weiteren Verlauf werden alle erstellten Bewegungsmodelle unter Nutzung der Aufnahmekonstellation der Radarsatelliten zusammengeführt, sodass sich die LOS-Bewegungen in interpretierbare Geschwindigkeiten in vertikaler und horizontaler Richtung zerlegen lassen. Die Modellkombination wird im Abschnitt 3.3 behandelt und ermöglicht eine Validierung durch unabhängige terrestrische Messungen und geologische Informationen.

3.2 Zeitreihenanalyse und Ausreißerfilterung

Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wird jeder persistente Rückstreuer eines Stacks separat betrachtet. Ziel ist es, für jede PS-Zeitreihe einen Satz Modellparameter zu schätzen, aus dem die Geschwindigkeit abgeleitet werden kann. Die Herausforderung besteht vor allem darin, den richtigen funktionalen Zusammenhang zu ermitteln. Je nach Position des PS kann die Zeitreihe statisch sein, einen linearen oder beschleunigten Trend beziehungsweise ein periodisches Signal aufweisen. Aufgrund der Vielzahl an Rückstreuern ist es notwendig, die mathematischen Modelle sowie die entsprechenden Parameter mittels performanter Methoden und Algorithmen automatisiert zu bestimmen. Zeitreihen, die aufgrund ihrer geringen Präzision als nicht vertrauenswürdig gelten, werden als Ausreißer identifiziert und aus der weiteren Prozessierung ausgeschlossen.

3.2.1 Bestimmung des Trends

Mit dem Ziel der Festlegung des Modells einer PS-Zeitreihe wird zunächst der Trend ermittelt. Dieser lässt sich in Abhängigkeit des Deformationsverhaltens der Erdoberfläche durch Polynome verschiedener Grade abbilden. Der theoretische funktionale Zusammenhang lautet:

$$l_i = a_0 + a_1 t_i + a_2 t_i^2 + \dots + a_g t_i^g = \sum_{j=0}^g a_j t_i^j. \quad (1)$$

Dabei entspricht l_i der relativen Bodenbewegung zum Zeitpunkt t_i und a_j dem j -ten Polynomparameter, wobei g den maximalen Polynomgrad angibt. /Busch & Linke 2014/ entwickelten für diese Fragestellung eine Methode basierend auf der Ausgleichung orthogonaler Polynome. In Schreibweise des Gauß-Markov-Modells (GMM) /Niemeier 2008/ ergibt sich Gl. (1) zu:

Funktionales Modell:

$$E(I) = A x \text{ mit } x = [a_0 \ a_1 \ \dots \ a_g]^T \text{ und } A_i = [1 \ t_i \ \dots \ t_i^g], \quad (2)$$

Stochastisches Modell:

$$\Sigma_{II} = \sigma_0^2 \cdot Q_{II} = \sigma_0^2 \cdot P^{-1} \text{ mit } \sigma_0^2 = 1 \text{ und } Q_{II} = I. \quad (3)$$

Das funktionale Modell besagt, dass der Erwartungswert $E(I)$ der Beobachtungen I durch die Designmatrix A multipliziert mit dem Parametervektor x ausgedrückt werden kann. Das stochastische Modell ergibt sich aus dem A-priori-Varianzfaktor σ_0^2 multipliziert mit der Kofaktormatrix der Beobachtungen Q_{II} . Wird der Erwartungswert der Beobachtungen durch die tatsächlichen Beobachtungen ersetzt, so werden die Inkonsistenzen im Gleichungssystem durch Einführung der Verbesserungen v beseitigt:

$$I + v = A x. \quad (4)$$

In der Prozesskette des Bodenbewegungsdienstes Niedersachsen erfolgt die Festlegung des signifikanten Polynomgrads individuell für jede Zeitreihe mittels stufenweiser Modellerweiterung mit Hypothesentest nach /Caspary & Wichmann 2007/. Ausgehend vom Polynomgrad 0 werden mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate die Polynomparameter geschätzt. Der Polynomgrad wird iterativ erhöht mit Überprüfung der Signifikanz des hinzugefügten Parameters durch einen statistischen Hypothesentest. Jede Iteration besteht aus den folgenden Berechnungsschritten:

1. Ausgangsmodell

Die Nullhypothese $H_0: E(I) = A x$ entspricht dem klassischen GMM gemäß Gl. (2). In der ersten Iteration beinhaltet x ausschließlich den zum Grad 0 gehörenden Polynomparameter. Nach Ausgleichung mittels Methode der kleinsten Quadrate ergeben sich u.a. die geschätzten Parameter $\hat{x} = (A^T P A)^{-1} A^T P I$ und die Quadratsumme der Residuen $\hat{\Omega} = \hat{v}^T P \hat{v}$ des Ausgangsmodells. Die Gewichtsmatrix P entspricht in der praktischen Umsetzung einer Einheitsmatrix und die geschätzten Residuen $\hat{v} = A \hat{x} - I$ ergeben sich durch Vergleich der ausgeglichenen mit den ursprünglichen Beobachtungen. Die daraus resultierende Kofaktormatrix ist wie folgt definiert: $Q_{\hat{v}\hat{v}} = Q_{II} - A(A^T P A)^{-1} A^T$.

2. Erweitertes Modell

In der Alternativhypothese $H_A: E(I) = A x + B y$ wird der funktionale Zusammenhang des Ausgangsmodells um den zum nächsthöheren Polynomgrad gehörenden Zusatzparameter y und die dazugehörige Designmatrix B erweitert. Die Schätzung liefert alternative Werte für die ausgeglichenen Parameter $\hat{x}_A = (A^T P A)^{-1} A^T P (I - B \hat{y}) \neq \hat{x}$ sowie Ergebnisse für den Zusatzparameter $\hat{y} = Q_{\hat{y}\hat{y}} B^T P (-\hat{v})$ und die quadratisch gewichtete Norm des Ergänzungsterms $\hat{\Omega}_R = \hat{y}^T Q_{\hat{y}\hat{y}}^{-1} \hat{y}$. Daraus

lässt sich die Residuenquadratsumme des erweiterten Modells $\hat{\Omega}_A = \hat{\Omega} - \hat{\Omega}_R$ ableiten. Die benötigte Kofaktormatrix der Zusatzparameter ergibt sich zu $\hat{Q}_{\hat{y}\hat{y}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{Q}_{\hat{w}} \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}$.

3. Hypothesentest

Anhand eines statistischen Tests wird geprüft, ob die Einführung des Zusatzparameters $\mathbf{y}$ zu einer signifikanten Verbesserung des Modells führt oder ob die Annahme von H_0 den Verlauf der Beobachtungen bereits gut abbildet. Die F-verteilte Testgröße fungiert als Vergleich der Residuenquadratsummen beider Hypothesen und bildet die Basis der Entscheidung:

$$T = \frac{\hat{\Omega}_R/p}{\hat{\Omega}_A/(r-p)} \sim F_{p,r-p} | H_0. \quad (5)$$

Sie ist neben der Redundanz des Ausgangsmodells auch abhängig von der Anzahl der Zusatzparameter, die im vorliegenden Anwendungsfall gleich 1 ist. Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % wird der Annahme- und Verwerfungsbereich definiert, sodass eine Signifikanzentscheidung getroffen werden kann. Für den Fall, dass H_0 angenommen wird, definieren die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}$ des Ausgangsmodells den Trend des Rückstreuers. Andernfalls erfolgt eine weitere Iteration beginnend bei Schritt 1, in der $\mathbf{y}$ in den Parametervektor $\mathbf{x}$ aufgenommen wird und Platz für einen neuen Zusatzparameter ist. Dieses Vorgehen wird pro Zeitreihe solange wiederholt, bis H_0 angenommen und der signifikante Polynomgrad festgelegt ist.

Abb. 4 stellt auf Grundlage der farblich abgestuften Up-Geschwindigkeiten die räumliche Verteilung der ermittelten Polynomgrade der PS-Zeitreihen dar. Es wird ersichtlich, dass sich wie

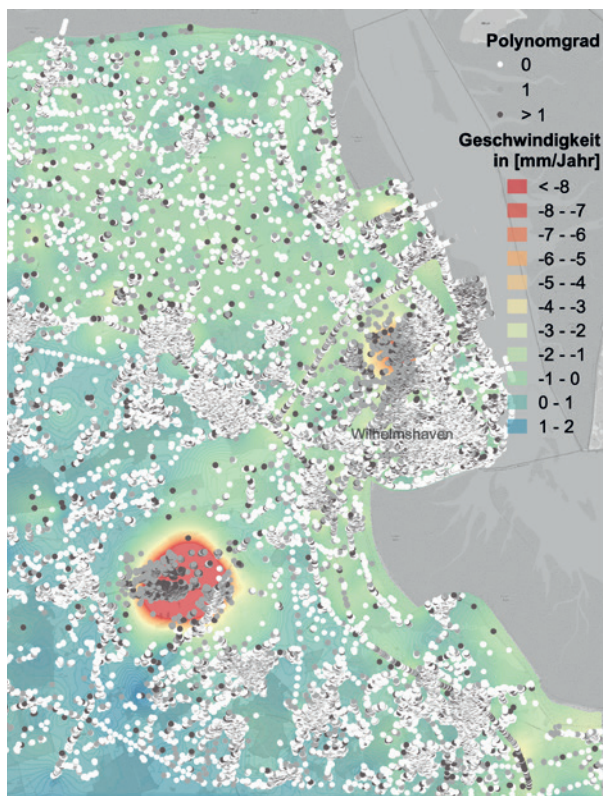


Abb. 4 | Polynomgrade der PS-Zeitreihen im Bereich Wilhelmshaven

erwartet Cluster höherer Grade in den Bodenbewegungsgebieten Wilhelmshaven und Etzel bilden. Auch in vermeintlich stabilen Gebieten treten ungleichmäßige Deformationsverhalten auf, was auf individuelle Bewegungen einzelner Rückstreuer zurückzuführen ist.

3.2.2 Bestimmung periodischer Signale

Mittels Lomb-Scargle-Periodogramm nach /VanderPlas 2018/ lassen sich periodische Signale in Zeitreihen mit nicht äquidistanten Stützstellen analysieren. Dieses stellt die spektrale Leistungsdichte und Frequenz gegenüber. Die Normierung der Leistung ermöglicht es, auf Basis eines Grenzwerts zu entscheiden, ob in der Zeitreihe eine signifikante Schwingung enthalten ist oder nicht. Für den Fall, dass ein periodisches Signal vorliegt, wird das theoretische funktionale Modell des ermittelten Trends um eine harmonische Schwingung erweitert:

$$I_i = A \cdot \sin(2\pi \cdot f t_i + \varphi_0) + \sum_{j=0}^g a_j \cdot t_i^j. \quad (6)$$

Da es sich um einen nicht linearen Zusammenhang handelt, erfolgt die Ausgleichung im GMM iterativ. Initiale Werte für die Polynomparameter a_j liegen bereits vor und Näherungswerte für die Amplitude A und die Frequenz f lassen sich aus dem Periodogramm entnehmen. Da für die Phase φ_0 kein Anfangswert bekannt ist und ein beliebiger Wert dazu führen kann, dass die Ausgleichung nicht konvergiert, erfolgt die Schätzung für zwei um π verschobene Näherungswerte für φ_0 . Schlussendlich wird auf Basis des a-posteriori Varianzfaktors $\hat{\sigma}_0^2 = \hat{\Omega}/r$ entschieden, welche der beiden Berechnungen als finales Ergebnis behandelt wird.

Abb. 5 zeigt beispielhaft eine im Bodenbewegungsgebiet Etzel bei Wilhelmshaven liegende PS-Zeitreihe mit linearem Trend und saisonalem Effekt inklusive geschätztem Modell. In Abb. 6 wird auf Basis der farblich abgestuften Up-Geschwindigkeiten die räumliche Verteilung periodischer Effekte deutlich, die vorwiegend im Senkungsgebiet Etzel sowie vereinzelt in bebauten Gebieten auftreten.

3.2.3 Bestimmung der Geschwindigkeit

Nachdem das funktionale Modell einer Zeitreihe festgelegt und die entsprechenden Parameter geschätzt wurden, wird daraus die Geschwindigkeit v_{LOS} in der Einheit mm/Jahr abgeleitet. Diese bezieht sich auf die Blickrichtung des Sensors und soll die Bodenbewegung des gesamten Beobachtungszeitraums widerspiegeln. Saisonale oder kurzzeitige Bewegungsänderungen werden vorerst

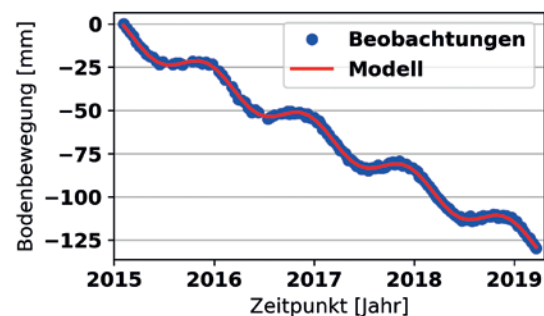


Abb. 5 | PS-Zeitreihe mit linearem Trend und periodischem Signal im Bodenbewegungsgebiet Etzel

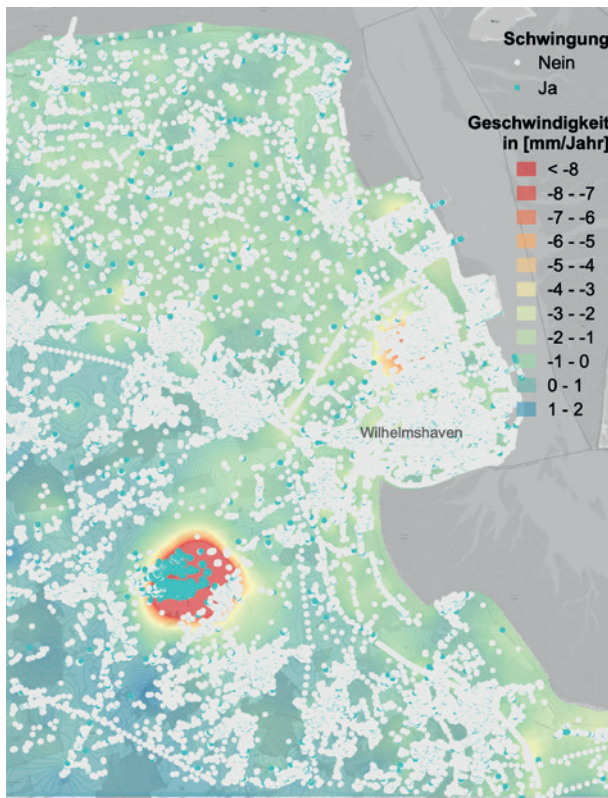


Abb. 6 | Periodische Signale der PS-Zeitserien im Bereich Wilhelmshaven

nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wird zur Ableitung der Geschwindigkeit ausschließlich das Trendmodell verwendet. Die Deformationsspanne Δt wird ins Verhältnis zum Beobachtungszeitraum Δt gesetzt:

$$v_{\text{LOS}} = \frac{l_{t_{\text{Ende}}} - l_{t_1}}{t_{\text{Ende}} - t_1} = \frac{\Delta l}{\Delta t}. \quad (7)$$

Für die flächenhafte Modellierung der Bewegungsraten ist zudem die Varianz der Geschwindigkeit $\hat{\sigma}_v^2$ relevant. Diese ergibt sich nach Varianzfortpflanzung und zusätzlicher Berücksichtigung einer Punkunruhe, die nach /Brockmeyer et al. 2020/ mit $\sigma_{\text{Punkunruhe}} = 2 \text{ mm/Jahr}$ angenommen wird und eine individuelle Punktbewegung beschreibt, zu:

$$\hat{\sigma}_v^2 = \frac{2}{\Delta t^2} \cdot \hat{\sigma}_0^2 + \sigma_{\text{Punkunruhe}}^2. \quad (8)$$

Obwohl die Geschwindigkeit ausschließlich auf Basis des linearen Trends berechnet wird, ist es erforderlich, für jeden PS auch den signifikanten Grad festzulegen sowie die Zeitreihe auf periodische Signale zu untersuchen. Dadurch wird ermöglicht, Bodenbewegungen künftig nicht nur für ein ganzes Intervall, sondern für jeden Zeitpunkt einzeln abzuleiten, wobei saisonale und kurzzeitige Geschwindigkeitsänderungen von großer Bedeutung sind. Darüber hinaus liefern die Modelle, wie in Abb. 5 und Abb. 6 gezeigt, wertvolle Zusatzinformationen für geologische Interpretationen.

3.2.4 Detektion von Ausreißern

Zum Abschluss der zeitlichen Analyse werden Zeitreihen mit einem zu hohem Messrauschen als Ausreißer detektiert und aus der

weiteren Prozesskette ausgeschlossen. Weisen die Beobachtungen eine zu starke Streuung auf, liefert die daraus abgeleitete Geschwindigkeit keine vertrauenswürdige Information über das Bewegungsverhalten des Bodens. Als Qualitätsmaß dafür wird die A-posteriori-Standardabweichung der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0$ verwendet. Da diese bei realistischen Werten nicht nur die Präzision der Beobachtungen darstellt, sondern auch ein Indiz für ein korrekt gewähltes funktionales Modell ist, wird auch hier die Relevanz der sorgfältigen Bestimmung des funktionalen Zusammenhangs deutlich. In Anlehnung an /Brockmeyer et al. 2020/ werden Zeitreihen, bei denen $\hat{\sigma}_0$ den Grenzwert 6 überschreitet, als Ausreißer aus der weiteren Prozessierung eliminiert. Die Ansetzung eines Grenzwerts ermöglicht es, über mehrere SAR-Stacks hinweg eine vergleichbare Qualität zu erreichen.

3.3 Trennung der Bodenbewegungskomponenten

Nach Durchführung der flächenhaften Modellierung und Modellkalibrierung (Abb. 3) folgt die Trennung der Bodenbewegungskomponenten in vertikaler und horizontaler Richtung. Die in Abschnitt 3.2 abgeleiteten und anschließend modellierten Geschwindigkeiten beziehen sich aufgrund der Beobachtungskonstellation der Sentinel-1-Satelliten auf die Blickrichtung des Sensors, was eine Interpretation der Daten erschwert.

Die Projektion der LOS-Bewegungen auf die North-, East- und Up-Komponente erfordert Kenntnisse über die Satelliten- und Aufnahmegeometrie. Abb. 7 stellt die Blickrichtung des Sensors eines aufsteigenden sowie eines absteigenden Satelliten mit rechts blickendem Sensor dar. Während der Einfallswinkel θ den Abstand der LOS- von der Zenit-Richtung an der Position des Rückstreuers beschreibt, liefert das Azimut α Informationen über den Winkel zwischen dem geographischen Nordpol und der auf die Horizontalebene projizierten Blickrichtung.

Mithilfe dieser Winkel lässt sich die Geschwindigkeit v_{LOS} durch Gl. (9) in Abhängigkeit der drei unbekannten Zielgrößen ausdrücken. Dabei setzt sich v_{LOS} nach /Yin 2020/ aus der Summe der auf die Blickrichtung projizierten Komponenten des Bewegungsvektors zusammen:

$$v_{\text{LOS}} = v_{\text{Up}} \cdot \cos(\theta) - (v_{\text{East}} \cdot \sin(\alpha) + v_{\text{North}} \cdot \cos(\alpha)) \cdot \sin(\theta). \quad (9)$$

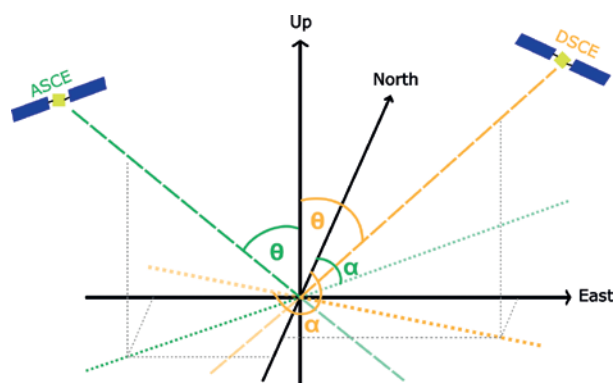


Abb. 7 | Aufnahmegeometrie eines ascending (ASCE) und descending (DSCE) Orbits

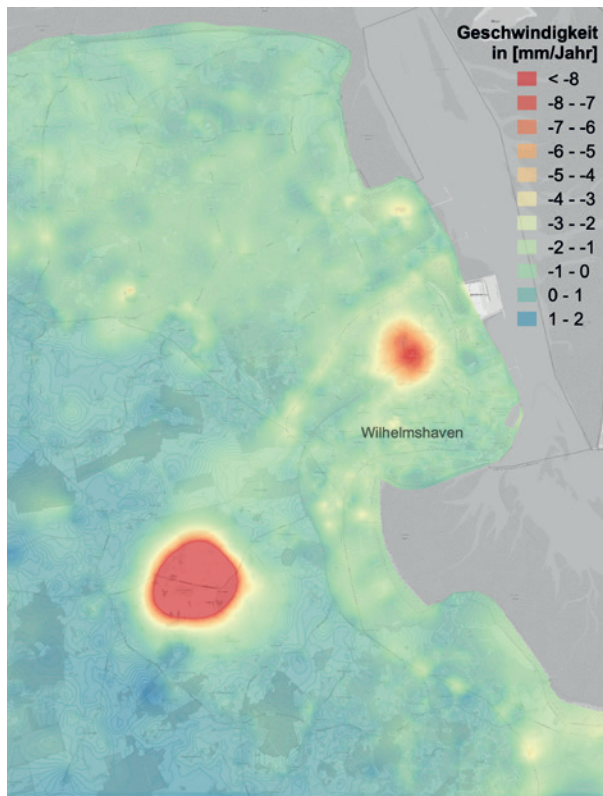


Abb. 8 | Up-Geschwindigkeiten nach Kombination von ascending- und descending-Aufnahmen

Aus diesem mathematischen Zusammenhang ergibt sich ein Gleichungssystem mit den Unbekannten ν_{North} , ν_{East} und ν_{Up} . Zur Lösung des Systems sind mindestens drei linear unabhängige SAR-Stacks notwendig, die den gleichen Ausschnitt der Erdoberfläche sowie nahezu denselben Zeitraum abdecken. Aufgrund der aktuell vorherrschenden Satellitenkonstellation der Sentinel-1-Mission liegen mit den Aufnahmen des ascending und descending Orbits Datensätze aus nur zwei verschiedenen Richtungen vor. Durch Kombination dieser Informationen ist es möglich, zwei der drei Bodenbewegungskomponenten zu bestimmen. Da die LOS-Beobachtung aufgrund der Aufnahmekonfiguration am wenigsten sensitiv für die North-Komponente ist, werden lediglich die East- und Up-Geschwindigkeiten ermittelt. Das resultierende Gleichungssystem lautet:

$$\begin{bmatrix} \nu_{\text{asce}} \\ \nu_{\text{desc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_{\text{asce}}) \cdot \sin(\alpha_{\text{asce}}) \cos(\theta_{\text{asce}}) \\ -\sin(\theta_{\text{desc}}) \cdot \sin(\alpha_{\text{desc}}) \cos(\theta_{\text{desc}}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \nu_{\text{East}} \\ \nu_{\text{Up}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Dafür muss die Annahme $\nu_{\text{North}} = 0$ getroffen werden. Dies führt an Orten mit Bewegungen in eben diese Richtung zu systematischen Abweichungen, deren Ausmaß abhängig von der wahren North-Deformation ist. Ungeachtet dessen führt die Trennung der East- und Up-Komponente zu einer enormen Qualitätssteigerung gegenüber der Ableitung der Up-Geschwindigkeiten aus nur einem SAR-Stack.

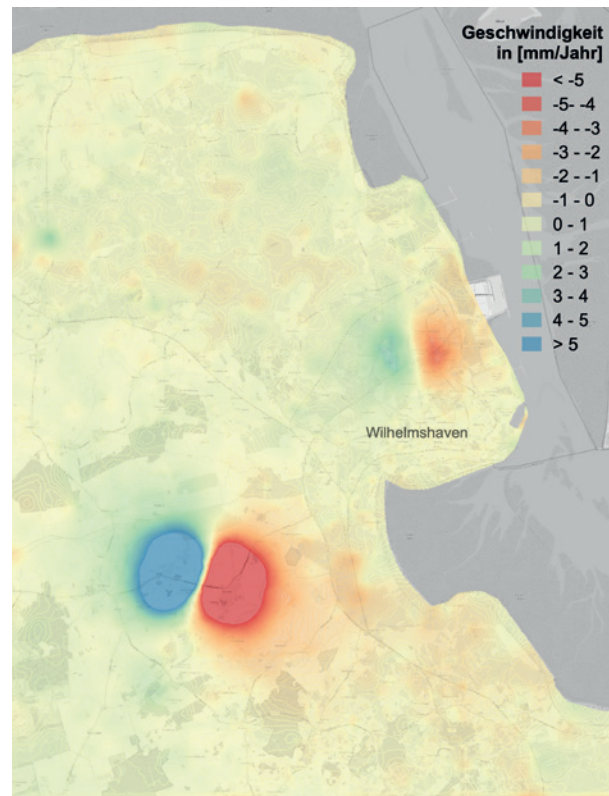


Abb. 9 | East-Geschwindigkeiten nach Kombination von ascending- und descending-Aufnahmen

4 VALIDIERUNG DER ERGEBNISSE IM BEREICH WILHELMSHAVEN

Die Ergebnisse der modellierten Up- und East-Deformationsraten für den Bereich Wilhelmshaven sind in *Abb. 8* und *Abb. 9* farblich abgestuft dargestellt. Die bekannten Bodenbewegungsgebiete in Wilhelmshaven und Etzel resultieren aus der Speicherung und Entnahme von Erdöl und -gas in mehrere hundert Meter tiefen Kavernenanlagen und stechen aus der stabilen Umgebung deutlich hervor. Wie in Abschnitt 1 beschrieben und in *Abb. 1* veranschaulicht, gehen Vertikalbewegungen der Erdoberfläche i.d.R. auch immer mit Lageverschiebungen einher. Die radarinterferometrisch abgeleiteten Ost-West-Geschwindigkeiten zeigen wie erwartet in Richtung des Senkungsmittelpunkts, was die Plausibilität der Modelle belegt.

Um eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Modellierung treffen zu können, erfolgt in *Abb. 10* ein Vergleich der SAR-Ergebnisse mit unterschiedlichen, aus terrestrischen Messungen und des amtlichen Nachweises abgeleiteten Geschwindigkeiten. Lageverschiebungen werden dabei als Vektoren gekennzeichnet und punktuelle, aus Nivellement-Messungen abgeleitete Vertikaldeformationen werden entsprechend den modellierten Bewegungsraten farblich abgestuft dargestellt. Was die Erkennung der grundlegenden Bewegungsstrukturen zwischen stabilen Umgebungen und Senkungsgebieten betrifft, stimmen die geodätisch etablierten Messmethoden, unabhängig von den verfahrensbasierten Genauigkeiten und Informationsdichten, mit den Ergebnissen der radarinterferometrischen Auswertung überein. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden,

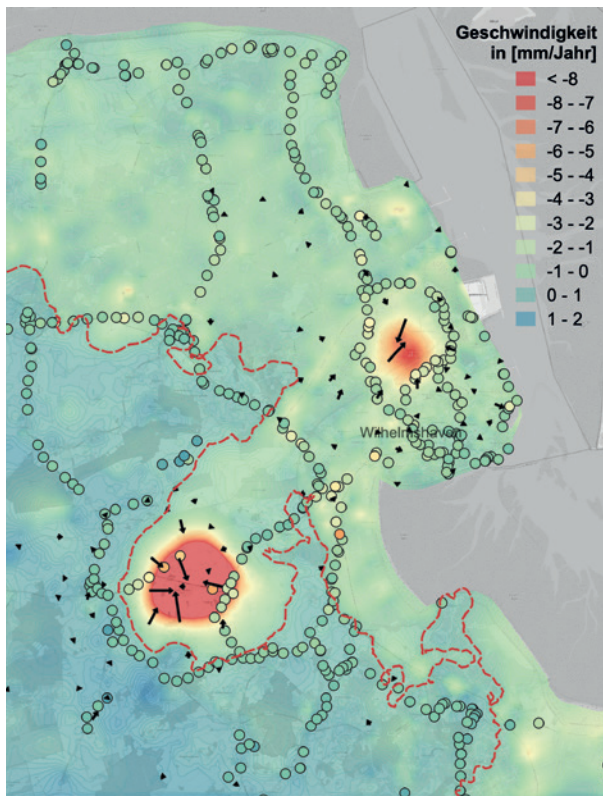


Abb. 10 | Vergleich der SAR-Ergebnisse mit aus terrestrischen Messungen des amtlichen Nachweises abgeleiteten Geschwindigkeiten

dass die Zeiträume der Datenerfassung nicht identisch sind, was für eine durchgreifende Kontrolle zwingend notwendig wäre.

Dieser Abschnitt belegt, dass die bereits heute verfügbaren geodätischen Daten zu einer grundsätzlichen Validierung geeignet sind. Für eine durchgreifende Prüfung sind aber weitergehende Anstrengungen hinsichtlich höherer Daten- und damit Flächendichte und epochengleicher Erhebungen erforderlich, um die Zuverlässigkeit und Aussagekraft zu präzisieren. Daneben sind auch wirtschaftliche Überlegungen zu berücksichtigen, um einen Ausgleich zwischen Aufwand und Nutzen zu gewährleisten.

Auch für weitere Disziplinen bergen die PSI-Daten großes Potenzial. Die gestrichelte rote Linie in Abb. 10 hebt die Grenze zwischen negativen und positiven Vertikalbewegungen hervor. Eine Gegenüberstellung dieser mit den vom LBEG bereitgestellten Informationen über die räumliche Verteilung von Bodenarten zeigt eine deutliche Korrelation mit dem Übergang von Marsch- zu Sandboden.

FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde eine ganzheitliche Prozesskette zur Datenanalyse und flächenhaften Modellierung von PSI-Informationen als Kernelement zum Aufbau des niedersächsischen Bodenbewegungsdienstes vorgestellt. Der Schwerpunkt in den Ausführungen wurde dabei auf die Zeitreihenanalyse zur optimalen Modellierung des Bewegungsverhaltens und Ausreißerdetektion der PS als qualitätssichernde Maßnahme gelegt. Darüber hinaus können die modellierten Bewegungsverläufe in weiterführenden Untersuchun-

gen vertiefende Einblicke in zeitabhängige Geschwindigkeitsänderungen der Erdoberfläche geben. Zudem wurde der Teilprozess zur Aufspaltung der ursprünglichen LOS-Bewegungen zwischen Radarsatellit und Scatterer in die Bodenbewegungskomponenten vertikaler und horizontaler Richtung erläutert, wodurch eine Validierung mit unabhängigen Vergleichsdaten ermöglicht wird. Zur Erprobung wurde das Verfahren auf PSI-Datensätze der Sentinel-1-Mission im Bereich Wilhelmshaven angewandt und anhand unabhängiger terrestrischer und geologischer Vergleichsdaten validiert. Die durchgeführten Vergleiche unterstreichen das Potenzial der entwickelten Prozesskette zur qualitätsgesicherten Modellierung von Bodenbewegungen. Daher wird vom LGLN angestrebt, diese Methode auf die PSI-Informationen des BBD der BGR für die gesamte niedersächsische Landesfläche anzuwenden und hinsichtlich einer Performancesteigerung zu optimieren. Künftig könnten dazu beispielsweise Multilevel-B-Splines als deterministisches Verfahren die räumliche Ausreißerfilterung und flächenhafte Approximation ergänzen /Lee et al. 1997/, /Mohammadivojdan et al. 2020/.

Ein darauf basierendes Bodenbewegungsmodell kann integriert in einem Informationssystem maßgeblich zur Aufrechterhaltung der Aktualität des Raumbezugs beitragen, indem bedarfsorientiert Wiederholungsmessungen in den amtlichen Festpunktfeldern durchgeführt werden können. Gleichzeitig bietet der Bodenbewegungsdienst die Möglichkeit, Deformationsprozesse der Erdoberfläche, ausgelöst durch veränderte Umwelteinflüsse und anthropogene Maßnahmen, in einem interdisziplinären Kontext beurteilen zu können.

LITERATUR

AdV – Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (2017): Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. Version 3.0, Stand 16.05.2017.

Brockmeyer, M. (2019): Daten der Landesvermessung zur räumlichen Interpolation von Bodenbewegungen. In: Tagungsband GeoMonitoring 2019, 151–163.

Brockmeyer, M.; Schnack, C.; Jahn, C.H. (2020): Datenanalyse und flächenhafte Modellierung der PSI-Informationen des Bodenbewegungsdienst Deutschlands für die Landesfläche Niedersachsens. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 145(2020)3, 154–167.

Busch, W.; Linke, J. (2014): Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels Orthogonaler Polynome. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 121(2014)8-9, 298–310.

Caspary, W.; Wichmann, K. (2007): Auswertung von Messdaten. Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften. De Gruyter Oldenbourg, München.

EGMS (2017): European Ground Motion Service (EU-GMS) – A proposed Copernicus service element. White Paper.

European Space Agency (2021): Sentinel-1. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (09.04.2021).

Gefeller, V.; Krickel, B.; Riecken, J. (2020): Anwendung der Radarinterferometrie in der Landesvermessung NRW. In: Tagungsband GeoMonitoring 2020, 21–27.

Jahn, C.-H.; Feldmann-Westendorff, U.; Grüner, D.; Kulle, U.; Lembrecht, P. (2011): Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen. In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung (NaVKV) (2011)4, 3–25.

Jahn, C.-H. (2013): Beiträge der Landesvermessung zum Geomonitoring. In: Tagungsband GeoMonitoring 2013, 9–20.

Kalia, A.; Lege, T.; Frei, M. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. In: Remote Sensing of Environment 202 (2017), 234–249.

Kratzsch, H. (2013): Bergschadenkunde. 6. Auflage. Deutscher Markscheider-Verein e.V., Peine.

Lee, S.; Wolberg, G.; Shin, S. Y. (1997): Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines. In: IEEE Transactions on visualization and computer graphics (1997)3, 228–244.

Lege, T.; Kalia, A.; Frei, M. (2019): Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands. In: Tagungsband GeoMonitoring 2019, 37–47.

Leonhard, T. (1988): Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland – Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse. Dissertation, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, 152, Hannover.

MI – Niedersächsisches Innenministerium (2020): Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErläss). RdErl. D. MI v. 10.11.2020 – 44-23410/100 –.

MI – Niedersächsisches Innenministerium (2019): Realisierung, Führung und Bereitstellung des Landesbezugssystems in Niedersachsen (Raumbezugs-erlass). RdErl. d. MI v. 15.10.2014 – 43-23100-100 –.

Mohammadivojdan, B.; Alkhatib, H.; Brockmeyer, M.; Jahn, C.-H.; Neumann, I. (2020): Surface Based Modelling of Ground Motion Areas in Lower Saxony. In: Tagungsband GeoMonitoring 2020, 107–123.

Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung: statistische Auswertemethoden. 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin/New York.

Pollmann, H. (1990): Horizontale Punktbewegungen aus Messungen über Salzkavernen. In: Das Markscheidewesen 97(1990) Nr. 1.

Riecken, J.; Krickel, B.; Gefeller, V.; Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv) 144(2019)6, 354–361.

Schütte, H. (1908): Neuzeitliche Senkungserscheinungen an unserer Nordseeküste. In: Jahrbuch für die Geschichte des Herzogtums Oldenburg 16 (1908), 397–441.

Tengen, D. (2010): Höhenänderungen im Bereich der niedersächsischen Nordseeküste bestimmt aus Nivellement- und GPS-Messungen. Dissertation, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig 26, Braunschweig.

Tobler, W. R. (1970): A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. In: Economic Geography 46(1270), 234–240.

Torge, W. (2007): Geschichte der Geodäsie in Deutschland. Walter de Gruyter, Berlin/New York.

Wackernagel, H. (1998): Multivariate Geostatistics. 2. Auflage. Springer, Berlin/Heidelberg.

Wanninger, L.; Rost, C.; Sudau, A.; Weiss, R.; Niemeier, W.; Tengen, D.; Heinert, M.; Jahn, C.-H.; Horst, S.; Schenk, A. (2009): Bestimmung von Höhenänderungen im Küstenbereich durch Kombination geodätischer Messtechniken. In: Die Küste (2009)76, 121–180.

VanderPlas, J. T. (2018): Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. In: The Astrophysical Journal Supplement Series 236, 1.

Yin, X. (2020): Einflüsse geometrischer Radar-Aufnahmekonstellationen auf die Qualität der kombinativ berechneten Bodenbewegungskomponenten. Dissertation, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal.

M.Sc. Marco Brockmeyer

LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND
LANDESVERMESSUNG NIEDERSACHSEN
(LGLN) – LANDESVERMESSUNG UND
GEOBASISINFORMATION

Podbielskistraße 331 | 30659 Hannover
marco.brockmeyer@lgl.niedersachsen.de



M.Sc. Vanessa Koppmann

LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND
LANDESVERMESSUNG NIEDERSACHSEN
(LGLN) – LANDESVERMESSUNG UND
GEOBASISINFORMATION

Podbielskistraße 331 | 30659 Hannover
vanessa.koppmann@lgl.niedersachsen.de



M.Sc. Christian Schnack

LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND
LANDESVERMESSUNG NIEDERSACHSEN
(LGLN) – LANDESVERMESSUNG UND
GEOBASISINFORMATION

Podbielskistraße 331 | 30659 Hannover
christian.schnack@lgl.niedersachsen.de



Dr.-Ing. Cord-Hinrich Jahn

LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND
LANDESVERMESSUNG NIEDERSACHSEN
(LGLN) – LANDESVERMESSUNG UND
GEOBASISINFORMATION

Podbielskistraße 331 | 30659 Hannover
cord-hinrich.jahn@lgl.niedersachsen.de



PD Dr.-Ing. Hamza Alkhatib

LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER,
GEODÄTISCHES INSTITUT

Nienburger Straße 1–4 | 30167 Hannover
alkhatib@gih.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Ingo Neumann

LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER,
GEODÄTISCHES INSTITUT

Nienburger Straße 1–4 | 30167 Hannover
neumann@gih.uni-hannover.de



Manuskript eingereicht: 07.05.2021 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet