

Datenanalyse und flächenhafte Modellierung der PSI-Informationen des BodenBewegungsdienst Deutschlands für die Landesfläche Niedersachsens

Marco Brockmeyer, Christian Schnack und Cord-Hinrich Jahn

Zusammenfassung

Zur Bereitstellung eines einheitlichen integrierten Raumbezugs ist das Aktualitätsgebot der Festpunktfelder ein wesentliches Qualitätsmerkmal. Bewegungen der Erdoberfläche bewirken eine stetige Verringerung der Aktualität des Raumbezugs, da sich aktuell gemessene und berechnete Koordinaten vom amtlichen Nachweis zunehmend unterscheiden. Zur Abgrenzung der Einflussbereiche von Bodenbewegungen liefert die Radarinterferometrie aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung wertvolle Daten. Im Rahmen einer Pilotstudie des BodenBewegungsdienst Deutschlands (BBD) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erhielt das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) einen Persistent Scatterer Interferometry (PSI)-Datensatz der Sentinel-1 Mission über den Beobachtungszeitraum 2014 bis 2018. Nach zeitlicher und räumlicher Ausreißerfilterung wurden die relativen Bewegungsraten der Persistent Scatterer (PS) durch Geschwindigkeitsinformationen der amtlichen Höhenfestpunkte mit einem absoluten geodätischen Datum versehen. Die resultierenden Daten wurden mittels Kriging-Approximation unter Berücksichtigung räumlicher Strukturen durch Variographie für die gesamte Landesfläche Niedersachsens modelliert. Das berechnete Bodenbewegungsmodell bietet einen erheblichen Informationsgewinn zur Detektion und Bewertung von Bodenbewegungsgebieten.

Summary

In order to provide the integrated geodetic spatial reference in Germany, the timeliness requirement of the reference framework is an essential quality feature. Movements of the earth's surface cause a constant reduction of this feature when the currently measured or calculated coordinates increasingly differ from official coordinates that were determined in the past. The remote sensing method of radar interferometry enables the detection of ground motion areas due to its high temporal and spatial resolution. As part of a pilot study of the Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), the Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung (LGLN) has received a PSI dataset of the Sentinel-1 mission for the period 2014 to 2018. After temporal and spatial outlier filtering, the relative data was given an absolute datum by the velocity information of official leveling benchmarks. These modified PSI data were modeled using Kriging approximation considering spatial structures by variography for the entire federal state of Lower Saxony. The produced dataset provides a huge amount of additional information for the detection and evaluation of ground moving areas.

Schlüsselwörter: Bodenbewegungen, Radarinterferometrie, Nivellement, Geostatistik, Variographie, Kriging, geodätischer Raumbezug

1 Einleitung

Das LGLN stellt das Landesbezugssystem Niedersachsens als Realisierung des einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezugs bereit (MI 2016). Zur Einhaltung der Aktualität (Qualitätssicherungsgebot) sind regelmäßige Überprüfungen bis hin zu epochengleichen, bundesweiten Wiederholungsmessungen durchzuführen (AdV 2017). Die Ergebnisse sind als Zeitreihen im amtlichen Festpunktinformationssystem (AFIS) zu sichern und können zu Untersuchungen von rezenten Bewegungen der Erdkruste verwendet werden.

Systematische Untersuchungen unterschiedlicher Datenquellen ergaben bereits 2007, dass ca. 30 % der niedersächsischen Landesfläche von Bodenbewegungen aufgrund von Rohstoffabbau etc. beeinflusst werden (Jahn et al. 2011). Analysen im Verbundprojekt zum Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS) ergaben systematische Senkungen bis zu 3 mm/Jahr im Nordseeküstenbereich, die geologische Ursachen vermuten lassen (Wanninger et al. 2009). Mit der Bewegung der Erdoberfläche gehen auch Bewegungen der Festpunkte einher. Je nach Größenordnung der Punktbewegung und zunehmendem Zeitabstand zum Bestimmungszeitpunkt einer amtlichen Koordinate bzw. eines Höhenwertes, entsteht eine Abweichung zum tatsächlichen Wert. Diese Inhomogenität kann bei Folgearbeiten im Landesbezugssystem zu Spannungen führen, was bedarfsorientierte Aktualisierungen zur Folge hat. Damit diese Arbeiten bedarfsgerecht durchgeführt werden können, sind Kenntnisse über die Lage der Bodenbewegungsgebiete und deren Geschwindigkeitsbeträge erforderlich.

Die Weiterentwicklung der Erfassungsmethodik führt beispielsweise in stark durch Bergbau geprägten Bundesländern zu neuen Strategien zum Monitoring von Bewegungen der Erdoberfläche. Geobasis NRW und die saarländische Landesvermessung entwickeln Bodenbewegungskataster, die neben klassischen Daten der Landesvermessung auch auf Basis radarinterferometrischer Auswertungen Aussagen zu vertikalen Bodenbewegungen

liefern. Die mit der Methode der Persistent Scatterer Interferometry (PSI) ausgewerteten Daten der Sentinel-1 Mission werden in regelmäßigen Kacheln aggregiert und sollen in Web-Präsentationen veröffentlicht werden (Krickel 2018, Engel und Busch 2018, Riecken et al. 2019).

Unter Verwendung von kommerzieller und Open-Source-Software können die kostenlos verfügbaren Daten des Copernicus-Programms der Europäischen Union inzwischen von unterschiedlichsten Stellen genutzt werden, um Deformationsdarstellungen der Erdoberfläche zu generieren und zu verbreiten. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) hat im November 2019 mit dem nationalen BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD) erstmals unabhängige Bodenbewegungsinformationen auf Basis von PSI-Auswertungen für die gesamte Bundesrepublik veröffentlicht (BGR 2020).

Das LGLN erhielt im Rahmen einer Pilotstudie dieses Projektes einen PSI-Datensatz der Sentinel-1 Mission für die gesamte niedersächsische Landesfläche und führte eine flächenhafte Modellierung des Bewegungsverhaltens mittels Kriging-Approximation durch (Wackernagel 1998). Dadurch wird ermöglicht, die Bodenbewegungsgebiete mit einem aktuellen Datensatz zu erfassen, die betroffenen Flächen abzugrenzen und die Planung von Maßnahmen zur Aktualisierung des geodätischen Raumbezugs zu optimieren.

2 Datengrundlage

Deformationen der Erdoberfläche können durch vielfältige geologische Prozesse oder anthropogene Maßnahmen verursacht werden. Durch den steigenden Bedarf an Daten, die zur Dokumentation des Bewegungsverhaltens

beitragen, gibt es mittlerweile vermehrt Stellen, die radarinterferometrische Auswertungen anbieten und diese in nationalem Umfang in grober Detailstufe frei zugänglich in Web-Anwendungen präsentieren (GVL 2019, Bodemdalingskaart 2019). Daraus erwächst die Notwendigkeit, unabhängige, qualitätsgesicherte Bodenbewegungsinformationen seitens des Staates bereitzustellen (siehe Abschnitt 1).

Diese Informationen basieren auf Synthetic Aperture Radar (SAR)-Daten der Sentinel-1 Mission, die Teil des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus der European Space Agency (ESA) ist (Lege et al. 2019). Die baugleichen Radarsatelliten Sentinel-1A und Sentinel-1B wurden im April 2014 und April 2016 gestartet und erfassen die gesamte Erdoberfläche in einem Zyklus von sechs Tagen. Die im C-Band arbeitenden Radarsatelliten verfügen im Interferometric Swath mode (IW) über eine räumliche Auflösung von 5 m × 20 m und tasten die Erdoberfläche über eine Breite von ca. 250 km ab. Durch die vollständige Abdeckung der Bundesrepublik Deutschland mit hoher zeitlicher Auflösung kann die für eine PSI-Auswertung notwendige Anzahl an Radaraufnahmen der SAR-Stack schnell aufgebaut werden. Der für diese Arbeit von der BGR bereitgestellte Datensatz wurde mittels PSI-WAP (Wide-Area-Product) Prozessierung erzeugt (Kalia et al. 2017) und enthält 7.106.962 Bewegungsinformationen. Das Datenmaterial stammt aus acht verschiedenen Sentinel-1 SAR-Stacks der aufsteigenden (ascending) Orbits, die einen Aufnahmezeitraum vom 13.10.2014 bis zum 30.04.2018 abdecken. Damit die berechneten Veränderungsraten aus den unterschiedlichen SAR-Stacks untereinander vergleichbar sind, wurden die PS-Geschwindigkeiten im Rahmen der PSI-WAP Prozessierung mit den bekannten Bewegungen des

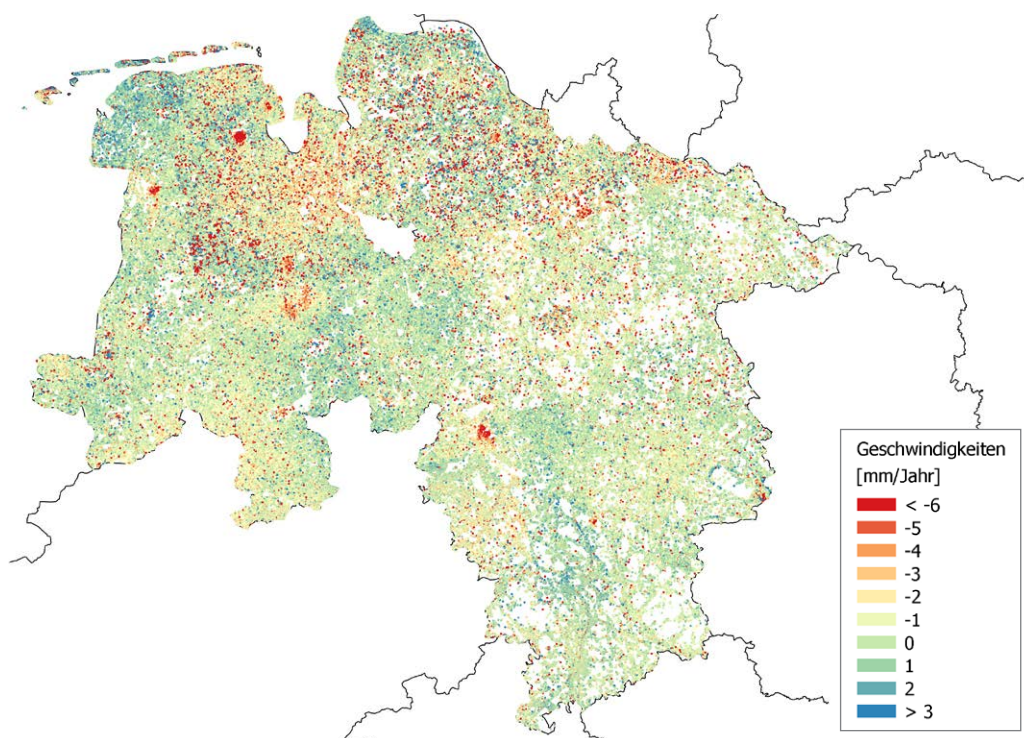


Abb. 1:
Bereitgestellte
Geschwindigkeits-
informationen der
PSI-Auswertung

SAPOS®-Koordinatenmonitorings »kalibriert« (Kalia et al. 2017, SAPOS 2017). Die Bewegungen werden in Blickrichtung des Satelliten »line of sight« (LOS) bestimmt und unter der Annahme, dass keine horizontalen Bewegungen auftreten, in die Vertikale projiziert.

Im Rahmen von Machbarkeitsstudien zur Umsetzung des BBD wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) prozessierte Radardaten für diverse Anwendungsfälle erprobt. Kalia et al. (2017) beschreiben die großflächige PSI-WAP Prozessierung von Daten der European Remote Sensing (ERS)-Satelliten für große Teile Niedersachsens. Eine Abschätzung der Absenkung der Sohle des Emsästuars basierend auf prozessierten Sentinel-1-Daten treffen Lege et al. (2018). Hangrutschungen im Moseltal werden in Kalia (2018) erfolgreich untersucht.

Abb. 1 zeigt den gesamten bereitgestellten Datenbestand der berechneten PS-Geschwindigkeiten für Niedersachsen farblich codiert. Deutlich zu erkennen ist neben einem regionalen Bewegungsverhalten, beispielsweise in Bereichen mit Rohstoffentnahme, auch ein hohes räumliches Rauschen in den Geschwindigkeitsinformationen. Dieses wird durch zahlreiche Ausreißer verursacht, die ein sehr lokal begrenztes Bewegungsverhalten repräsentieren und daher aus dem Datenbestand zu entfernen sind.

3 Qualitätsanalyse von PSI-Informationen

Wie in Abb. 1 ersichtlich, unterliegen die bereitgestellten PSI-Informationen einem hohen Messrauschen, welches sich in eine zeitliche und räumliche Komponente gliedern lässt. Die vorhandenen Ausreißer in den Zeitreihen der Rückstreuer können durch vielfältige Einflussfaktoren, wie beispielsweise eine unzureichende Zustandsmodellierung der Unbekannten im PSI-Auswerteprozess, verursacht werden. Daneben können auch lokal auftretende Bodenbewegungen ohne flächenhaftes Bewegungsverhalten zu räumlichen Anomalien führen.

Zur Reduzierung des Rauschens und im Sinne einer Qualitätssicherung sind vor der weiteren Verarbeitung und Interpretation der PS-Geschwindigkeiten die enthaltenen Ausreißer aus dem Datenmaterial zu entfernen. Dazu werden zunächst die Zeitreihen der Höhenänderungen und anschließend das räumliche Verhalten der konstanten Rückstreuer separat für jeden SAR-Stack analysiert. Aufgrund der hohen Anzahl an zu prüfenden Scatterern wurde in der Entwicklung der Ausreißerdetektion besonderer Wert auf performante Prüfalgorithmen gelegt, die auch eine parallele Prozessierung ermöglichen.

3.1 Zeitliche Ausreißerfilterung

Die Zeitreihen der Höhenänderungen von PSI-Punkten weisen unterschiedliche Qualitäten auf. So liefern Punkte mit einem stark streuenden Höhenänderungsverhalten

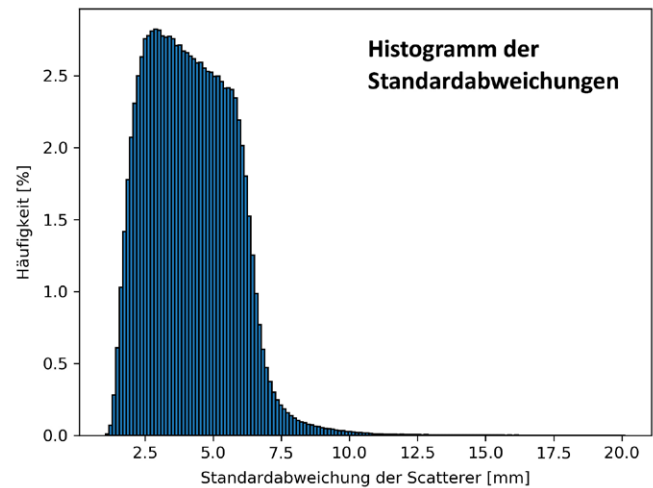


Abb. 2: Berechnetes Histogramm der Standardabweichungen für den Stack »ASCE_015_01«

keine vertrauenswürdigen Informationen, während andere Punkte den Bewegungsverlauf sehr präzise beschreiben. Ziel der zeitlichen Ausreißerdetektion mit anschließender Elimination ist daher die Identifikation der Zeitreihen mit einem hohen Messrauschen.

Dazu wurden zunächst die Polynome 1. Grades (Regressionsgerade) mit den zugehörigen Standardabweichungen der Gewichtseinheit für jede PS-Zeitreihe geschätzt. Im verwendeten Ausgleichungsmodell werden alle eingehenden Höhenänderungsbeobachtungen ohne individuelle Gewichtung als gleichgenau und unkorreliert angenommen. Die berechneten Standardabweichungen werden als Maß für die Streuung der Zeitreihen in Histogrammen zur inneren Genauigkeitsabschätzung der SAR-Stacks aufgetragen. Abb. 2 zeigt exemplarisch das inhomogen verteilte Histogramm für den Stack »ASCE_015_01«.

Im Verfahren der zeitlichen Ausreißerdetektion (Qualitätssicherung) werden die PS, deren Standardabweichungen den Grenzwert von 6 mm überschreiten, als potenzielle Ausreißer klassifiziert. Dieser Schwellwert wurde für alle SAR-Stacks identisch angesetzt, sodass die geprüften PS-Zeitreihen einem einheitlichen Genauigkeitsniveau entsprechen. Unter ausschließlicher Betrachtung der Standardabweichung würden ggf. Rückstreuer hoher Qualität aufgrund nicht-linearer, zeitlicher Änderungen als Ausreißer behandelt. Abb. 3 zeigt beispielhaft eine PS-Zeitreihe, die begründet durch eine erhöhte Standardabweichung von 6,1 mm in der zeitlichen Ausreißerfilterung detektiert wurde.

Abschließend wird die Kohärenz der detektierten Punkte mit hoher Streuung im Höhenänderungsverlauf geprüft. Diese ist ein Qualitätsmaß für die interferometrische Phase in der SAR-Prozessierung und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen (Walter 2012). Niedrige Kohärenzwerte zeigen ein erhöhtes Phasenrauschen, verursacht z.B. durch nicht konstante Rückstreueigenschaften der PSI-Punkte. Um Scatterer mit einer hohen Phasenstabilität in den weiteren Analysen beizubehalten,

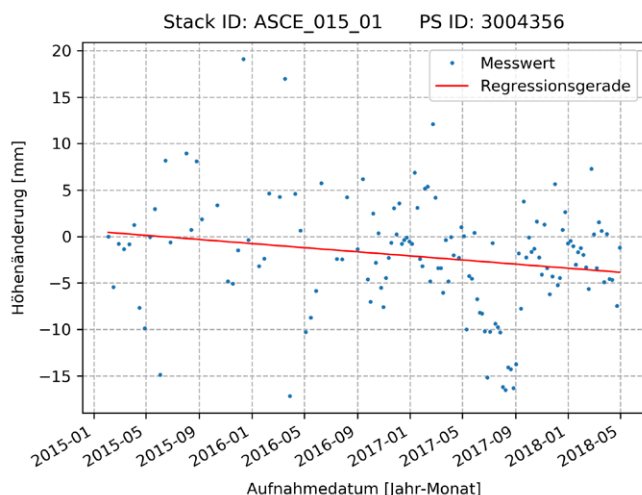


Abb. 3: Beispielhafte PS-Zeitreihe, die in der zeitlichen Ausreißerfilterung detektiert wurde.

wurden Messpunkte mit einer Kohärenz im Wertebereich über 0,9 nicht aus dem Datenmaterial entfernt. Mit diesem Verfahren konnten insgesamt 599.176 PSI-Informationen als zeitliche Ausreißer aufgedeckt und aus dem vorliegenden Datensatz entfernt werden.

3.2 Räumliche Ausreißerfilterung

Auch nach der zeitlichen Filterung weisen die PS-Geschwindigkeiten eine hohe räumliche Variabilität durch unterschiedliches Bewegungsverhalten benachbarter Rückstreuer auf. Um diese hochfrequenten Störungen, die ggf. individuelle Objektbewegungen repräsentieren, aus dem Datenmaterial zu entfernen, erfolgte eine räumliche Ausreißerfilterung.

Ein verbreitetes Verfahren zur Detektion von Clusterbildung und Anomalien in räumlichen Zufallsvariablen ist der von Anselin (1995) entwickelte Local-Moran's-Index, der die Existenz einer räumlichen Autokorrelation im Untersuchungsgebiet voraussetzt. In Untersuchungen von Xi (2017) hat sich jedoch gezeigt, dass nicht alle räumlichen Ausreißer in einem PSI-Datensatz mit diesem Clusterverfahren detektiert werden. Auch eine Modifikation des Indexes, indem Korrelationskoeffizienten auf Basis benachbarter PS-Zeitreihen als weitere Gewichtung eingeführt wurden, führte nicht zu dem gewünschten Ergebnis, sodass eine zusätzliche kleinräumige Clusteranalyse erforderlich war. Diese mangelhafte Sensibilität gegenüber räumlichen Anomalien wird auf die Verwendung eines globalen Mittelwertes zur Berechnung des Indexes zurückgeführt.

Daher wurde zur räumlichen Ausreißerdetektion in den PSI-Informationen ein Algorithmus in Anlehnung an Lu et al. (2003) und Chen et al. (2008) entwickelt, der ebenfalls auf dem Grundsatz »Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things« beruht (Tobler 1970). Dabei werden die n zu prüfenden Geschwindigkeiten $Z = \{z_1 \dots z_n\}$ an den

zugehörigen Positionen $X = \{x_1 \dots x_n\}$ mit der ortsabhängigen Nachbarschaftsfunktion $g(x_i)$ verglichen. Diese basiert auf den k nächstgelegenen Beobachtungen zur Geschwindigkeit z_i am Ort x_i , die die Menge $N(x_i)$ mit der Ausnahme $z_i \notin N(x_i)$ bilden. Zur Detektion von räumlichen Ausreißern wird die Vergleichsfunktion

$$h(x_i) = z_i - g(x_i) = y_i \quad (1)$$

aufgestellt, die den als normalverteilt angenommenen Datensatz $\{y_1 \dots y_n\}$ definiert. Anhand dieser Funktion kann eine Geschwindigkeit z_i als Ausreißer detektiert werden, wenn y_i in der Menge $\{y_1 \dots y_n\}$ einen Extremwert annimmt.

Dieses Verfahren der Ausreißerdetektion wird maßgeblich von der gewählten Nachbarschaftsfunktion und einbezogener Nachbarschaft bestimmt. Des Weiteren sind die Funktionen $g(x_i)$ und somit auch $h(x_i)$ selbst von vorhandenen Ausreißern beeinflusst. Zur Lösung nimmt die Nachbarschaftsfunktion als robusten Schätzwert an der Stelle x_i den Median

$$g(x_i) = \begin{cases} z_{(k+1)/2}^g & \text{wenn } k \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2} (z_{(k/2)}^g + z_{(k+2)/2}^g) & \text{wenn } k \text{ gerade} \end{cases} \quad (2)$$

der Größe nach geordneten Werten von $N(x_i)$ mit $z_1^g \leq z_2^g \leq \dots \leq z_k^g$ an. Als räumliche Ausreißer werden PSI-Informationen selektiert, deren y -Werte außerhalb der Grenzwerte eines vorzugebenden Vertrauensintervalls liegen.

Unter Verwendung des lokalen Medians als Nachbarschaftsfunktion wird die Annahme konstanter Geschwindigkeiten innerhalb eines definierten Radius getroffen. Dies gilt allerdings nicht für lokal begrenzte Bodenbewegungsgebiete, da in deren Einflussbereichen systematische Geschwindigkeitsänderungen vorhanden sind und somit eine Stationarität nicht gegeben ist. Aufgrund unregelmäßiger Verteilungen der Rückstreuer mit räumlichen Geschwindigkeitsänderungen wird der Medianwert an Positionen im Bereich von Bodenbewegungen verfälscht. Dies führt aufgrund unzureichender Vergleichsfunktionen zu Detektionen von Ausreißern, obwohl diese das lokale Bewegungsverhalten korrekt repräsentieren.

Zur Stärkung des Verfahrens und für eine zuverlässige Ausreißerdetektion in Bodenbewegungsgebieten wird die Nachbarschaftsfunktion $g(x_i)$ um eine lokale Drift und Fluktuationen in den Geschwindigkeiten erweitert. Auf Grundlage der Beobachtungen der Menge $N(x_i)$ werden zunächst die Parameter einer Ebene sowie die entstehenden Residuen $v_{j=1 \dots k}$ nach

$$z_j + v_j = b_0 + b_1 \cdot (x_j - x_i) + b_2 \cdot (y_j - y_i) \quad \forall z_j \in N(x_i) \quad (3)$$

ausgeglichen. In dieser Formel kennzeichnen $(x_j - x_i)$ und $(y_j - y_i)$ die Koordinatendifferenzen zwischen den Positionen der zu prüfenden Geschwindigkeit z_i und den

benachbarten Beobachtungen $z_{j=1 \dots k}$. Zur Berücksichtigung möglicher lokaler Fluktuation im Nahbereich der zu prüfenden Beobachtung z_i werden anschließend die Residuen mittels inverser Distanzgewichtung auf die Stelle x_i interpoliert. Die normierten Gewichte $\omega_{j=1 \dots k}^*$ der Verbesserungen ergeben sich nach den Gleichungen

$$\omega_j = \frac{1}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \quad (4)$$

und

$$\omega_j^* = \frac{\omega_j}{\sum_{j=1}^k \omega_j}. \quad (5)$$

Dadurch lässt sich die Nachbarschaftsfunktion zu

$$g(x_i) = b_{0_i} + \sum_{j=1}^k \omega_j^* \cdot v_j \quad (6)$$

erweitern, die ähnlich, wie von Kou et al. (2006) beschrieben, die direkte Nachbarschaft verstärkt in die räumliche Ausreißerdetektion einfließen lässt. Zur statistischen Detektion von Extremwerten wird der aus der Vergleichsfunktion $h(x_i)$ resultierende Datensatz $\{y_1 \dots y_n\}$ hinsichtlich der zugehörigen Parameter einer Normalverteilung untersucht, indem der arithmetische Mittelwert \bar{y} und die Standardabweichung s empirisch ermittelt werden. Diese gehen in die Bestimmung der Ober- und Untergrenze eines Konfidenzbereichs ein, innerhalb dessen der wahre Wert μ von y mit einer gegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit α liegt. Das Konfidenzintervall errechnet sich unter Verwendung des Grenzwertes $t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}}$ der symmetrischen t -Verteilung mit dem Freiheitsgrad f zu (Niemeier 2008):

$$P\left\{\bar{y} - s * t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}} \leq \mu \leq \bar{y} + s * t_{f, 1-\frac{\alpha}{2}}\right\} = 1 - \alpha. \quad (7)$$

Außerhalb dieses Vertrauensintervalls liegende y -Werte können mit einer zugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeit als Extremwerte detektiert werden, wodurch die entsprechenden Geschwindigkeitsbeobachtungen aus dem PSI-Datensatz als räumliche Anomalien auszuschließen sind.

Da die Funktionen $g(x_i)$ und $h(x_i)$ selbst von Ausreißern beeinflusst sind, was sich auf die Verteilungsfunktion des Datensatzes $\{y_1 \dots y_n\}$ auswirkt, empfiehlt sich ein iterativer Ablauf, der zur ersten Iteration bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % die m groben Ausreißer aus dem Datensatz entfernt. In folgenden Durchläufen sind die Vergleichsfunktionen ohne die zuvor detektierten Ausreißer neu aufzustellen, mit Entfernung der Extremwerte aus dem aktualisierten Datensatz $\{y_1 \dots y_{n-m}\}$. Zur Bereinigung des vorliegenden PSI-Datensatzes wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % angesetzt. Die erforderlichen Iterationen können abgebrochen werden, wenn der berechnete Konfidenzbereich der Ver-

gleichsfunktionen kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

Die beschriebene Ausreißerfilterung erfordert benachbarte Geschwindigkeitsinformationen innerhalb eines festgelegten Radius um den zu prüfenden PS. Besonders in ländlich geprägten Regionen ist diese Bedingung nicht immer erfüllt. Daher erfolgte die Plausibilisierung der verbliebenen Einzelpunkte ohne ausreichende Nachbarschaftsinformationen in einer manuellen Sichtung unter Verwendung eines GIS.

3.3 Anwendung der räumlichen Ausreißerfilterung auf die PSI-Daten

Ein Großteil Niedersachsens wird nicht von lokalen Bodenbewegungen beeinflusst. Somit kann die Annahme einer Stationarität im Untersuchungsgebiet getroffen werden, wodurch sich der Median als zu verwendende Nachbarschaftsfunktion $g(x_i)$ anbietet (siehe Gleichung (2)). Als Nachbarschaftsinformationen in der Menge $N(x_i)$ werden alle Beobachtungen innerhalb eines Radius von 750 m einbezogen. Dieser betrachtete Nachbarschaftsbereich wurde aufgrund der vorhandenen Dichte der Scatterer gewählt und kann für andere Anwendungen entsprechend angepasst werden. Bewegungsraten, deren y -Werte außerhalb des Vertrauensintervalls von ± 2 mm/Jahr liegen, wurden als räumliche Anomalien klassifiziert.

Mit dem beschriebenen Verfahren wurden insgesamt 1.793.888 räumliche Ausreißer aus dem Datenmaterial ausgeschlossen. Abb. 4 stellt alle bereinigten PS-Geschwindigkeiten für die Landesfläche Niedersachsens farblich kodiert dar. Die Grafik zeigt deutlich, dass im Vergleich zum Eingangsdatensatz (siehe Abb. 1) mit Hilfe der verwendeten Filterungsverfahren (zeitlich und räumlich) das räumliche Rauschen reduziert werden konnte und sich die Bodenbewegungsgebiete als rötliche Cluster von den stabilen Bereichen abgrenzen.

Zur zuverlässigeren räumlichen Ausreißerdetektion in Einflussbereichen von lokalen Bodenbewegungsgebieten wurde statt des Medians die Vergleichsfunktion $g(x_i)$ der Gleichung (6) eingesetzt. Auch hier wurde ein lokaler Einflussbereich um die zu prüfenden Scatterer mit einem Radius von 750 m festgelegt. Die erforderlichen Iterationen wurden bei einem Konfidenzintervall kleiner als 4 mm/Jahr abgebrochen.

4 Geostatistik zur flächenhaften Approximation von Geschwindigkeitsinformationen

Vor der Approximation der Bewegungsraten von Bodenbewegungsgebieten erfolgt eine räumliche Strukturanalyse (Variographie) der Beobachtungen im Untersuchungsgebiet D . Wie auch zur räumlichen Ausreißerdetektion wird dabei die geostatistische Grundannahme der

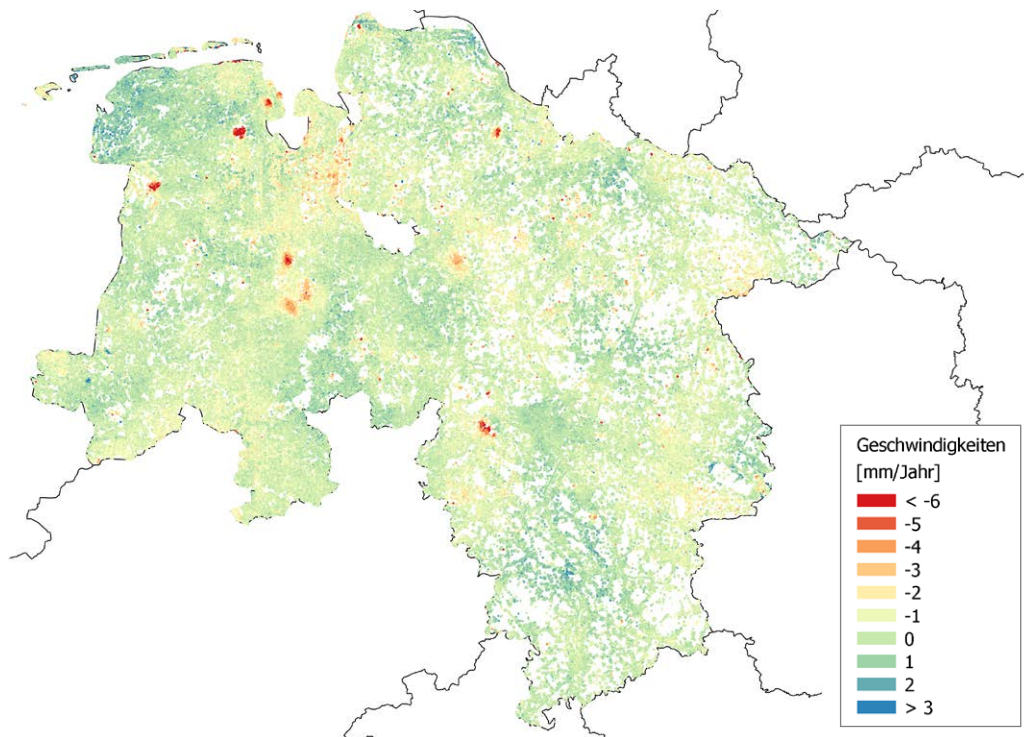


Abb. 4:
Von Ausreißern be-
reinigte Geschwindig-
keitsinformationen der
PSI-Auswertung

Homogenität der Beobachtungen getroffen (räumliche Korrelation). So sollten z.B. benachbarte Punkte ähnliche Geschwindigkeiten aufweisen, wohingegen sich weiter auseinanderliegende Zufallsvariablen unterscheiden können.

Anschließend wird das resultierende Variogramm aus der räumlichen Strukturanalyse zur Berechnung eines regelmäßigen Interpolationsrasters mittels Kriging verwendet. Das Interpolationsverfahren bietet somit die Möglichkeit, die individuellen räumlichen Strukturen des Untersuchungsgebietes einzubeziehen. Neben einem Schätzwert liefert das Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit auch die zugehörige Varianz.

4.1 Räumliche Strukturanalyse mittels Variographie

Zu Beginn einer räumlichen Strukturanalyse wird das experimentelle Variogramm aus den Beobachtungen, in diesem Fall Geschwindigkeiten, abgeleitet. Es gibt Auskunft über die räumliche Variabilität der Messwerte $z_{i=1,\dots,n}$ an den Punkten $x_{i=1,\dots,n}$ im Untersuchungsgebiet D (Schafmeister 1999). Dabei wird der Grundsatz der Stationarität vorausgesetzt, die in der Geostatistik auch als intrinsische Hypothese bezeichnet wird. Das bedeutet, dass der Erwartungswert der Inkremente $[z(x) - z(x+h)]$ im gesamten Untersuchungsgebiet Null ergibt und ortsunabhängig ist. Zur Bestimmung der Inkremente kennzeichnet h (siehe Abb. 5) den Vektor zwischen zwei Stützstellen im Untersuchungsgebiet D . Zur Vereinfachung wird nachfolgend nur der Betrag des Abstandsvektors h betrachtet und die zugehörige Richtung vernachlässigt, womit eine isotrope Charakteristik in Untersuchungsgebieten vorausgesetzt wird. Da die Annahme der Statio-

narität in der Realität nicht zutrifft, kann die Varianz der Inkremente in Abhängigkeit des Abstandes h zwischen den Zufallsvariablen berechnet werden, die wie folgt, die Semivarianz $\gamma(h)$ beschreibt (Niemeier 2008):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} * (z(x) - z(x+h))^2. \quad (8)$$

Die Semivarianz wird für alle Punktkombinationen der zu untersuchenden Stützstellen berechnet und in Abhängigkeit des Betrags des Abstandsvektors h in einem Diagramm aufgetragen, sodass eine »Variogramm Cloud« entsteht. Anschließend werden k Abstandsklassen (lags) gebildet, in deren äquidistanten Intervallen die zugehörigen Semivarianzen gemittelt werden. Die mittlere Semivarianz

$$\gamma(h_k) = \frac{1}{2 * N(h_k)} \sum_{i=1}^{N(h_k)} (z(x_i + h) - z(x_i))^2 \quad (9)$$

repräsentiert die jeweilige Abstandsklasse h_k mit $N(h_k)$ als Anzahl der Punktkombinationen im jeweiligen Abstandsklassenintervall. Typischerweise steigt die Semivarianz mit zunehmendem Abstand h bis zu einem Grenzwert (sill) an. Der Abstand (Range), an dem der Sill erreicht

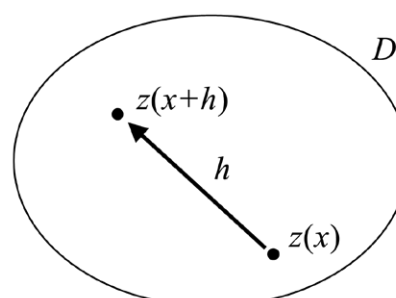


Abb. 5:
Untersuchungs-
gebiet D mit
den Messpunkten
 $z(x)$ und $z(x+h)$
mit dem Diffe-
renzvektor h

wird, gibt die maximale Reichweite der räumlichen Korrelation der Zufallsvariablen an. Das beschriebene Verhalten der steigenden Semivarianz deutet auf vorhandene räumliche Strukturen im Datenmaterial hin, wobei der Sill mit der Varianz aller Messwerte ($z_{i=1,\dots,n}$) übereinstimmen kann (Wackernagel 1998). Sollte jedoch ein globaler Trend die Stichprobe der Beobachtungen systematisch beeinflussen, so steigt die Semivarianz mit dem Abstand kontinuierlich (zum Teil quadratisch) an und beschreibt die Variabilität im Untersuchungsgebiet nicht realistisch (Oliver und Webster 2014). Um dennoch Zufallsvariablen, die als deterministische Funktion des Ortes angenommen werden können, auf räumliche Strukturen zu analysieren, ist eine Trendabsplattung erforderlich, wodurch die verbleibenden Residuen in die Variogrammberechnung eingehen.

Das zuvor erläuterte experimentelle Variogramm liefert nur für abgetastete Abstandsklassen Semivarianzen, die die räumliche Variabilität und Struktur des Datensatzes beschreiben. Zur Interpolation unter Verwendung des Kriging-Verfahrens werden jedoch Informationen für beliebige Distanzen benötigt. Daher wird das experimentelle Variogramm durch eine theoretische Variogrammfunktion approximiert, wobei diese mathematische Funktion nur positive Varianzen liefern darf (Heinrich 1992). Die Parameter des theoretischen Variogramms werden mittels Ausgleichung eines geeigneten funktionalen Modells durch die empirischen Semivarianzen optimal bestimmt. Zur Beschreibung von realen PSI-Datensätzen hat sich dabei in mehreren durchgeführten Untersuchungen die Exponentialfunktion

$$\gamma(h) = C_0 + C * (1 - e^{-h/\alpha}) \quad (10)$$

als geeignet erwiesen. Hierin kennzeichnet C_0 den Nugget-Effekt, C den Sill- und α den Range-Parameter. In dieser Funktion wird der Schwellwert C nur angenähert. Zur praktischen Berechnung der maximalen Korrelationsreichweite ist der ausgeglichene Range α mit 3 zu multiplizieren, damit 95 % des Sill-Parameters erreicht werden.

4.2 Ordinary Kriging als geostatistisches Approximationsverfahren

In einer allgemeinen Modellvorstellung können orts-/zeitabhängige Zufallsvariablen ($z_{i=1,\dots,n}$) aus einem globalen Trend, einer lokalen Fluktuation und einem zufälligen Rauschen bestehen. Zur flächenhaften Modellierung der Zufallsvariablen steht eine Vielzahl an räumlichen Kriging-Schätzverfahren zur Verfügung, wobei zur Approximation der PSI-Daten Ordinary Kriging eingesetzt wurde. Hiermit wird jedoch zunächst nur die lokale Fluktuation betrachtet, wohingegen der globale Trend einer Zufallsvariable mit Hilfe geeigneter deterministischer Verfahren entfernt wird. Hierzu bietet sich im einfachsten

Falle eine ausgleichende Ebene an, die von den Beobachtungen (Realisierungen der Zufallsvariable) als systematische Komponente abgezogen wird.

Der Interpolationswert (Kriging-Schätzer) $Z^*(x_0)$ zwischen den stationären Stützstellen wird durch die Linearkombination

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i) \quad (11)$$

ausgedrückt, wobei die Gewichte λ_i der Beobachtungen $Z(x_i)$ als Unbekannte zu schätzen sind. Die Gewichte der Beobachtungen sind so zu bestimmen, dass der Interpolationswert erwartungstreu geschätzt wird. Unter Annahme einer Stationarität im Untersuchungsgebiet ergibt sich die Bedingung, dass die Summe der Gewichte Eins ergibt. Anhand dieser Restriktion wird deutlich, dass es sich bei dem Interpolationswert auf Basis des Kriging-Verfahrens grundsätzlich um einen gewichteten Mittelwert aus den räumlichen Zufallsvariablen handelt.

Durch Minimierung der Varianz des Kriging-Schätzers, Einhaltung der Nebenbedingung $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ und Annahme einer Stationarität der Zufallsvariablen kann das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) & 1 \\ 1 & & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

in Matrizenschreibweise aufgestellt werden (Montero et al. 2015). Da für dieses Kriging-System die Kenntnis der Kovarianzen C zwischen den Stützstellen $x_{i=1,\dots,n}$ untereinander und zu der Interpolationsstelle x_0 erforderlich sind, wird zum Aufstellen der Gleichungen das zuvor bestimmte theoretische Variogramm benötigt. Unter Verwendung des Zusammenhangs

$$C(x_i - x_j) = C(0) - \gamma(x_i - x_j) \quad (13)$$

zwischen Semivarianz γ und Kovarianz, lassen sich aus dem Variogramm für beliebige Abstände die zugehörigen Kovarianzen berechnen (Montero et al. 2015). In dieser Formel kennzeichnet die Variable $C(0)$ die Summe aus dem Sill- und Nugget-Parameter des theoretischen Variogramms, welche die räumliche Varianz der Zufallsvariablen ausdrückt.

Neben einer räumlichen Streuung unterliegen Messwerte, wie z.B. Geschwindigkeiten aus PSI-Analysen, auch zufälligen Fehlereinflüssen sowie Unsicherheiten aufgrund des Auswerteverfahrens. Es ist also unrealistisch, dass die zu modellierende »Interpolationsoberfläche« exakt die eingehenden Stützpunkte widerspiegelt ohne Verbesserungen zuzulassen. Daher wird die Varianz-Kovarianz-Matrix aus der Formel (12) für Bodenbewegungsmodellierungen um die individuellen Varianzen

der zu interpolierenden Messwerte $\delta_{i=1..n}^2$ zur Berücksichtigung der zusätzlichen Genauigkeitsinformationen ergänzt. Das erweiterte Kriging-System lässt sich nach

$$\begin{bmatrix} C(x_1 - x_1) + \delta_1^2 & \cdots & C(x_1 - x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ C(x_n - x_1) & \cdots & C(x_n - x_n) + \delta_n^2 & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ C(x_n - x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

aufstellen, wodurch es sich nicht mehr um ein exaktes Interpolations-, sondern Approximationsverfahren handelt (Wackernagel 1998). Außerdem wird dadurch die Möglichkeit eröffnet, Beobachtungen unterschiedlicher Genauigkeit zu einem Gesamtmodell zu kombinieren.

Zur Genauigkeitsabschätzung der Geschwindigkeiten aus einer PSI-Auswertung wurden in dem vorgestellten Projekt die Standardabweichungen der Gewichtseinheit δ_{PS_i} aus den Regressionsausgleichungen der PS-Zeitreihen übernommen und der Aufnahmezeitraum dt_i berücksichtigt. Zur stochastischen Modellierung eines PS wurde zusätzlich noch eine »Punktunruhe« $\delta_{Punktunruhe}$ von 2 mm/Jahr als zufälliger Anteil eingeführt, die eine individuelle Punktbeziehung beschreibt und nicht die weitere Umgebung repräsentiert (Brockmeyer 2019). Daraus ergibt sich

$$\delta_{v_i}^2 = 2 * \frac{1}{dt_i^2} * \delta_{PS_i}^2 + \delta_{Punktunruhe}^2 \quad (15)$$

auf Grundlage des Varianz-Fortpflanzungsgesetzes zur Genauigkeitsabschätzung der PS-Bewegungsraten.

Neben dem Approximationswert lässt sich unter Verwendung der Formel

$$\delta_{x_0}^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) + \mu \quad (16)$$

ebenfalls die zugehörige Varianz berechnen, die auch als Kriging-Varianz bezeichnet wird (Montero et al. 2015). Diese sinkt mit abnehmendem Abstand zu den nächstgelegenen Beobachtungen und deren Anzahl, wodurch Approximationen in Gebieten, in denen keine oder nur sehr wenige Daten vorliegen, hohe Unsicherheiten erhalten.

In der Literatur wird häufig die Nutzung der Semivarianzen $\gamma(h)$ zur Definition des Kriginggleichungssystems vorgestellt, wodurch dessen Hauptdiagonale immer mit Nullen besetzt wird. Unter Verwendung der Kovarianzfunktion $C(h)$ nimmt im Vergleich dazu die Hauptdiagonale der Varianz-Kovarianz-Matrix jedoch die größten Werte an, was zu einem numerisch stabileren System führt (Schafmeister 1999). Im Hinblick auf ggf. große zu lösende Gleichungssysteme mit mehreren tausend Unbekannten, wird daher die Kovarianzfunktion zur Aufstellung des Kriginggleichungssystems bevorzugt.

5 Berechnung eines flächenhaften Bewegungsmodells für die niedersächsische Landesfläche

Die von räumlichen und zeitlichen Ausreißern bereinigten PS-Geschwindigkeiten bilden nun die Datengrundlage für die Modellierung von Bodenbewegungen. Im Modellierungsprozess wurden Bewegungsraten separat nach SAR-Stacks approximiert, da Systematiken zwischen den SAR-Aufnahmen als Offsets vorhanden sind. Diese sind vermutlich auf verbleibende »Restfehler« der Mosaikierung der PSI-Ergebnisse zurückzuführen (Rodrigues Gonzales et al. 2018). Um diese Systematiken zwischen den Stacks zu reduzieren, wurden Geschwindigkeiten von Höhenfestpunkten 1. und 2. Ordnung aus dem amtlichen Festpunktinformationssystem (AFIS) als Beobachtungen eingeführt. Diese zusätzlichen Geschwindigkeitsinformationen realisieren ein einheitliches Geschwindigkeitsdatum, mit Hilfe dessen die PSI-Informationen unterschiedlicher Stacks kombiniert werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika der lokalen Bodenbewegungsgebiete und der regionalen Bewegungsraten wurde keine gemeinsame Modellierung durchgeführt, sondern kleinräumige Gebiete wurden individuell betrachtet, regionale Bewegungsstrukturen eigenständig analysiert und in einem verfeinerten Gesamtmodell zusammengeführt. Zur flächenhaften Approximation der PS-Geschwindigkeiten kam sowohl für die Gebietsmodellierung als auch für die großräumige Analyse das in Abschnitt 4 beschriebene geostatistische Kriging-Verfahren zum Einsatz.

5.1 Modellierung des regionalen Bewegungsverhaltens

Ziel der Modellierung ist die Erfassung von langwelligen Signalen vermeintlich stabiler Gebiete, die sich von lokalen Bodenbewegungsgebieten unterscheiden. Die PSI-Beobachtungen wurden mittels Medianfilterung von räumlichen Ausreißern bereinigt (siehe Abschnitt 3.2) und nach dem Verfahren des Abschnitts 4.1 auf räumliche Strukturen analysiert.

Aufgrund der hohen Anzahl an Scatterern innerhalb eines Stacks konnten aus rechentechnischen Gründen nicht alle Punktkombinationen zur Ableitung der zugehörigen Semivarianzen betrachtet werden. Um dennoch eine Strukturanalyse durchführen zu können, wurden insgesamt acht Teilgebiete, in denen keine lokalen Bodenbewegungsgebiete vorhanden sind, auf räumliche Variabilität untersucht. Diese begrenzten Untersuchungsgebiete mit Größen zwischen 400 km² und 3300 km² werden zum Teil von verschiedenen Stacks abgedeckt, sodass sich insgesamt 17 experimentelle Variogramme ergaben. Die daraus bestimmten theoretischen Variogramme (siehe Abschnitt 4.1) werden mittels Exponentialfunktionen

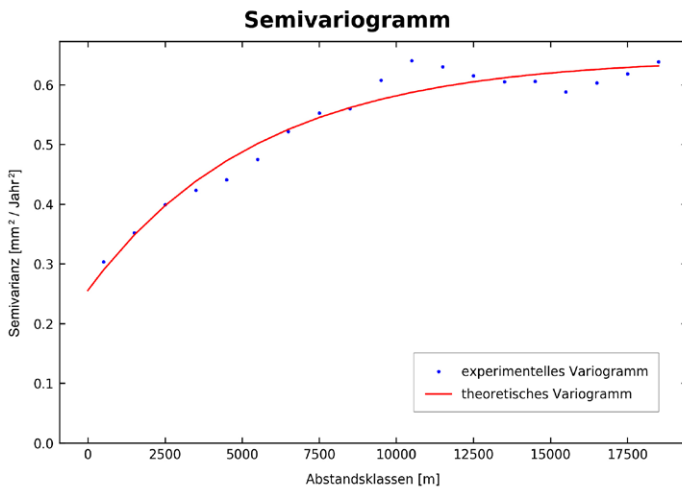


Abb. 6: Experimentelles und theoretisches Variogramm auf Basis von PS-Geschwindigkeiten des Stacks ASCE_117_01 für ein Teilgebiet in der Nähe von Bremerhaven

beschrieben. Abb. 6 zeigt eine Variogrammauswertung des Stacks ASCE_117_01 für ein Teilgebiet in der Nähe von Bremerhaven. Der erkennbare Anstieg der Semivarianzen bei zunehmenden Abstandsklassen deutet auf vorhandene räumliche Strukturen im Datenmaterial hin, wobei die kleinen Beträge der Varianzen auf eine geringe Variabilität im Untersuchungsgebiet zurückzuführen sind.

Nach Mittelbildung der Variogrammparameter (siehe Tab. 1) der einzelnen Teilgebiete wurde das resultierende Variogramm zur Beschreibung des regionalen Bewegungsverhaltens bestimmt.

Dieses bildete die Grundlage der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Kriging-Approximation der SAR-Stacks zur Modellierung eines regelmäßigen Stützstellenrasters mit einer Gitterweite von 500 m. Zusätzlich wurden Geschwindigkeitsschätzungen an Positionen der Höhenfestpunkte durchgeführt, um eine spätere Verknüpfung zwischen den Höhenfestpunkt- und PSI-Informationen zu ermöglichen. Aus rechentechnischen Gründen wurden die Approximationswerte lediglich auf Grundlage der Beobachtungen im Umkreis von 7000 m geschätzt. Weil das zugrunde liegende Variogramm jedoch nur die Struktur der langwelligen Bewegungen repräsentiert, werden die Geschwindigkeitsbeträge der lokal begrenzten Bodenbewegungsgebiete als zu gering geschätzt und erfordern somit eine individuelle Modellierung (siehe Abschnitt 5.3).

Tab. 1: Gemittelte, exponentielle Variogrammparameter zur Beschreibung des regionalen Bewegungsverhaltens

Nugget (C_0) [mm ² /Jahr ²]	Sill (C) [mm ² /Jahr ²]	Range (α) [m]
0,235	0,226	5952,2

5.2 Einführung eines einheitlichen Geschwindigkeitsdatums und Kombination der regionalen Bewegungsmodelle

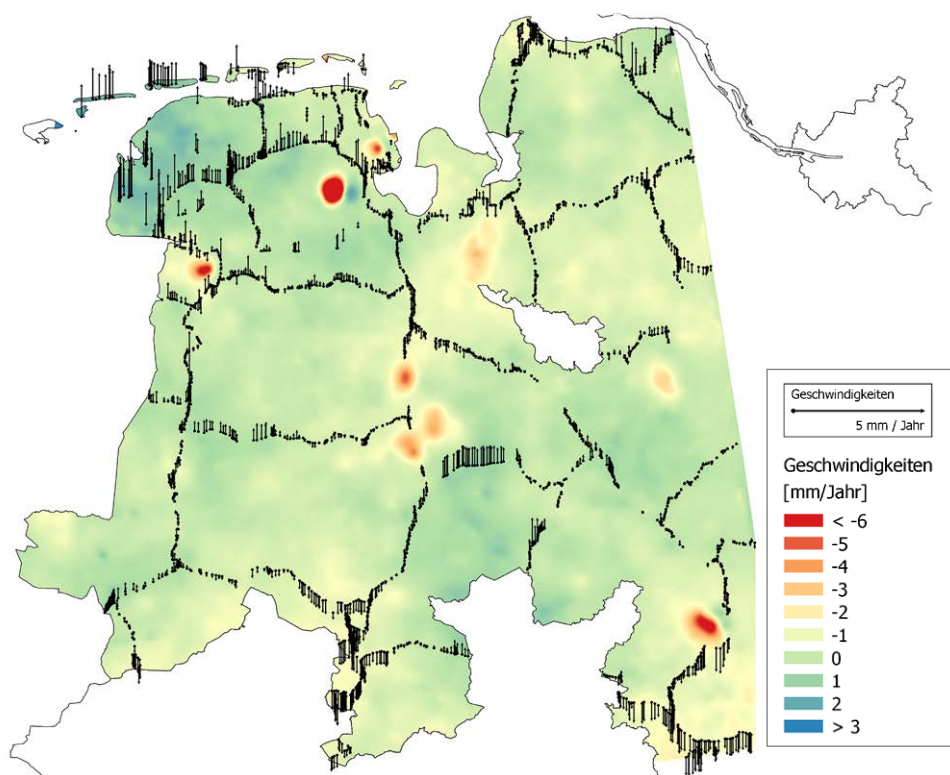
Damit die PS-Bewegungsraten landesweit vergleichbar sind, wird ein einheitliches Geschwindigkeitsdatum zur Berechnung des Kombinationsmodells aus den Daten der Höhenfestpunkte der 1. und 2. Ordnung abgeleitet.

Zur Übertragung des Geschwindigkeitsdatums der Höhenfestpunkte auf die Bewegungsmodelle der PSI-Auswertungen werden zunächst die Differenzen zwischen modellierten und bekannten Höhengeschwindigkeiten gebildet. Dabei werden ausschließlich Bereiche ohne lokale Bodenbewegungen betrachtet, da hier keine Lageverschiebungen zu erwarten sind und nur geringe vertikale Bewegungsraten vorliegen. Weiterhin wird angenommen, dass sich stabile Bereiche bzw. regionale Bewegungsmuster sowohl in den Höhenfestpunkten als auch in den PSI-Informationen abbilden. Da die Höhenfestpunkte häufig nur in zwei Epochen bestimmt worden sind, wurde ein lineares Bewegungsmodell verwendet. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 7 die modellierten Bewegungen aus den PSI-Informationen des Stacks ASCE_015_01, während die Vektoren die Differenzen zwischen Modell und bekannten Höhenänderungsraten zeigen.

Die dargestellten Differenzvektoren weisen ein räumlich korreliertes Muster auf, sodass benachbarte Höhenfestpunkte ähnliche Differenzen zum Bewegungsmodell zeigen. Besonders deutlich wird dieses Verhalten im Bereich Ostfrieslands, da hier im Gegensatz zu den Daten der Höhenfestpunkte systematische Hebungen aus PSI-Analysen modelliert wurden. Für diese Region sind allerdings großflächige positive Höhenänderungen äußerst unwahrscheinlich, da das angrenzende Groninger Gasfeld sowie die vorhandenen Marschböden und künstliche Landgewinnungen eher Senkungen verursachen (Brockmeyer 2013). Bei dem Vergleich aller SAR-Stacks mit den Daten der Höhenfestpunkte ergeben sich Differenzen im Bereich von ± 3 mm/Jahr, deren normalverteilte Differenzbeträge in Abb. 8 dargestellt sind.

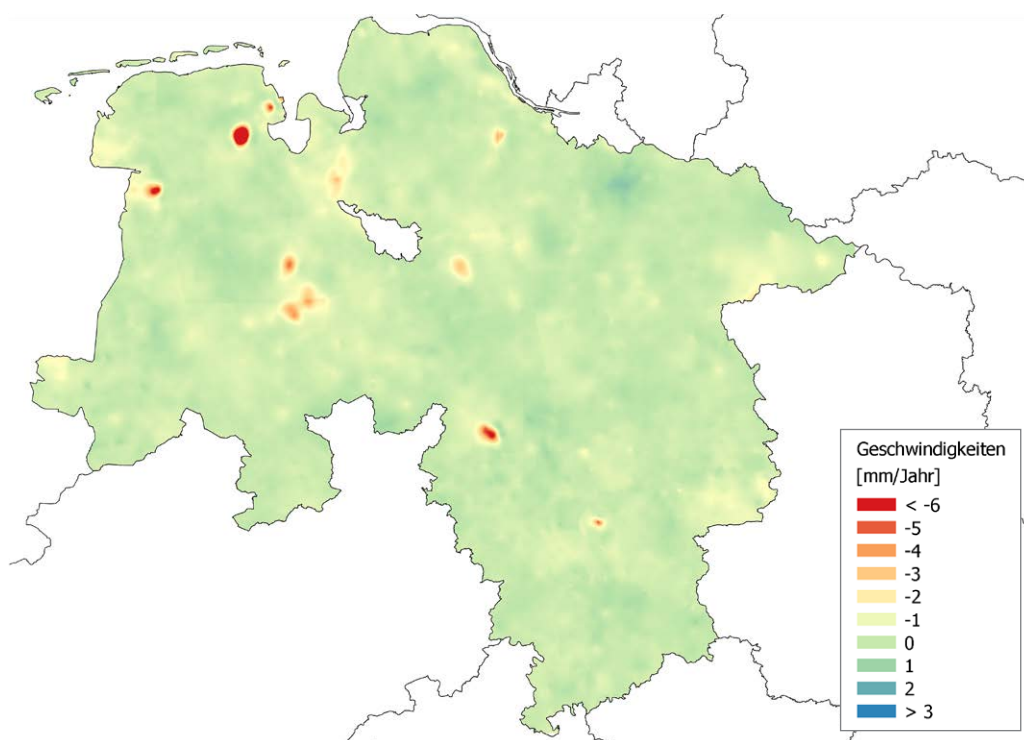
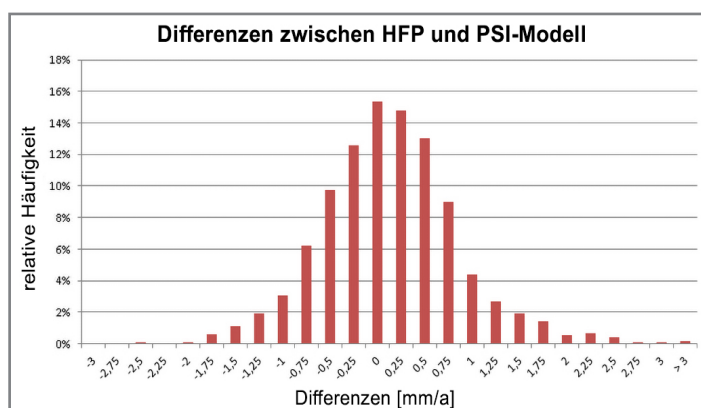
Um das Geschwindigkeitsdatum aus den Höhenfestpunkten auf die approximierten Bewegungsmodelle zu übertragen, wurden die berechneten Differenzen mittels Ordinary Kriging flächenhaft interpoliert und als Verbesserungen an die Ausgangsmodelle angebracht. Dadurch konnten die Geschwindigkeitsmodelle der jeweiligen SAR-Stacks auf das Geschwindigkeitsniveau der Höhenfestpunkte angepasst und verglichen werden. Aufgrund der weitmaschigen Nivellementsleifen wurden engmaschige Systematiken in den PSI-Daten nicht erfasst. Tatsächliche Bewegungen, die in den PSI-Daten erkannt werden, würden durch Korrektur auf Basis stabiler Höhenfestpunktinformationen eliminiert.

Die abschließende Kombination der einzelnen Stack-Modellierungen zu einem Gesamtmodell für die Landesfläche Niedersachsens erfolgte durch gewichtete Mittelbildung mehrfach vorhandener Approximations-



← Abb. 7:
Flächenhaft modellierte Geschwindigkeiten auf Basis von PSI-Informationen des Stacks ASCE_015_01 und Differenzvektoren zu bekannten Höhenänderungsraten

→ Abb. 8:
Histogramm der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Höhenfestpunkten und den PSI-Modellen



← Abb. 9:
Kombiniertes Geschwindigkeitsmodell für die regionalen Bewegungsstrukturen

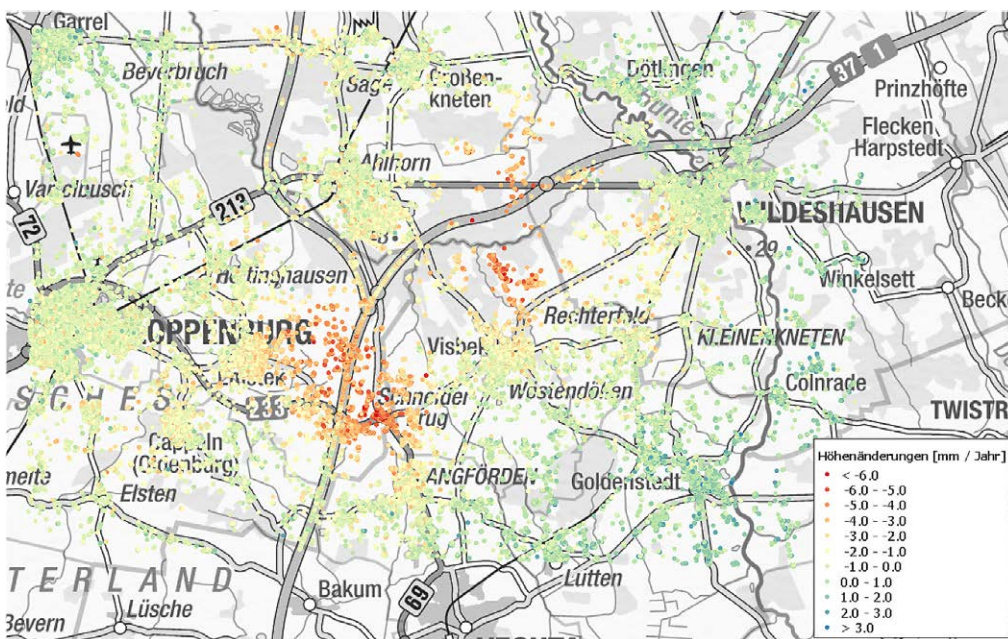
werte der Interpolationsstellen unterschiedlicher Stacks. Zur Gewichtung wurden die berechneten Kriging-Varianzen der Interpolationsstellen herangezogen. Aufgrund der räumlichen PS-Verteilung und der davon abhängigen Approximationsgenauigkeiten konnten, besonders in Übergangsbereichen verschiedener Stack-Modelle, Diskontinuitäten im Gesamtmodell reduziert werden. Abb. 9 zeigt das resultierende Gesamtmodell farblich kodiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Systematiken innerhalb der SAR-Stacks durch die Anpassung an die bekannten Geschwindigkeiten der Nivellementpunkte fast vollständig eliminiert wurden. Der Einfluss des Geschwindigkeitsdatums auf das Gesamtergebn wird am Beispiel Ostfrieslands besonders deutlich. Das Modell in Abb. 7 zeigt nicht vorhandene Hebungen aus PSI-Daten, die im Kombinationsmodell durch Einführung bekannter Höhenänderungen eliminiert wurden.

5.3 Modellierung von lokalen Bodenbewegungsgebieten

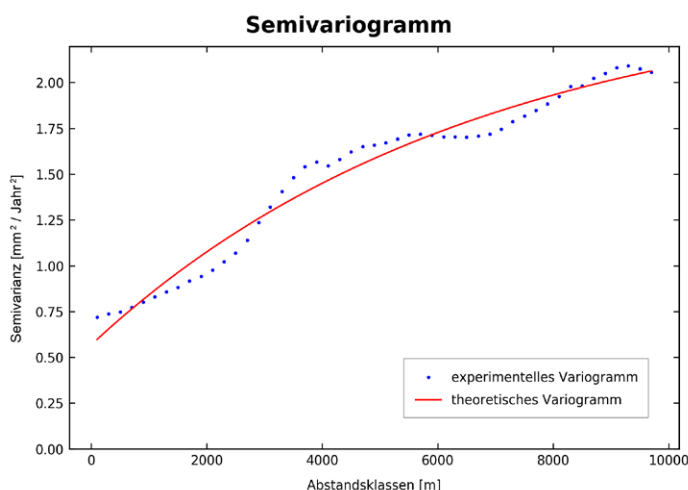
Um ein möglichst realitätsgetreues Modell lokaler Bodenbewegungsgebiete zu erhalten, wurden diese separat analysiert. Dadurch ließen sich individuelle Gebietsstrukturen beispielsweise durch Korrelationslängen bestmöglich beschreiben. Die Datengrundlage bildeten die von räumlichen Ausreißern bereinigten PSI-Daten innerhalb abgegrenzter Bereiche. Dazu wurde das in Abschnitt 3.2 beschriebene Verfahren mit der Nachbarschaftsfunktion der Gleichung (6) angewandt. Eine erste Gebietsabgrenzung der Einflussbereiche erfolgte visuell unter Verwendung einer GIS-Software.

Die gebietsweise zusammengestellten PSI-Daten wurden im ersten Modellierungsschritt einer räumlichen Strukturanalyse zur Berechnung der experimentellen und theoretischen Variogramme zugeführt. Wie auch bei der Untersuchung des regionalen Bewegungsverhaltens wurde hier zwischen den verschiedenen Stack-Auswertungen unterschieden, um die vorhandenen Systematiken

zu berücksichtigen. Die erstellten Variogramme bilden die individuellen Strukturen der Bodenbewegungsgebiete ab und definieren die stochastischen Modelle in den anschließenden Kriging-Approximationen. Zur Verdeutlichung zeigen die Abb. 10 und 11 die PS-Geschwindigkeiten des Stacks ASCE_015_01 für den Untersuchungsbereich Visbek bzw. das daraus resultierende experimentelle sowie das abgeleitete theoretische Variogramm. Anhand der Übersichtskarte ist deutlich zu erkennen, dass sich in dem dargestellten Untersuchungsbereich zwei lokale Bodenbewegungsgebiete aufgrund von Gasentnahme befinden. Dies spiegelt sich auch in dem zugehörigen Variogramm wieder. Im Vergleich zu vermeintlich stabilen Bereichen treten wesentlich größere Semivarianzen auf (vergleiche mit Abb. 6).



↑ Abb. 10:
Von Ausreißern bereinigte
PS-Geschwindigkeiten des
SAR-Stacks ASCE_015_01
im Untersuchungsgebiet
Visbek



← Abb. 11:
Variogramme zur Be-
schreibung der räumlichen
Struktur der Bodenbewe-
gungsgebiete im Untersu-
chungsbereich Visbek

Neben den Variogrammparametern einer Exponentialfunktion werden zur Definition des Kriging-Systems auch die jeweiligen Genauigkeitsabschätzungen der PS-Zeitreihen zur stochastischen Modellierung der Beobachtungen berücksichtigt. Das Ergebnis der flächenhaften Geschwindigkeitsmodellierung ist ein regelmäßiges Raster mit einer Gitterweite von $500\text{ m} \times 500\text{ m}$, das die Schätzwerte und zugehörigen Kriging-Varianzen enthält. Die gewählte Auflösung orientiert sich zur späteren Kombination an der Rasterweite des regionalen Bewegungsmodells. Abb. 12 zeigt exemplarisch, zusammen mit den PS-Beobachtungen (schwarz) des Stacks ASCE_015_01, das berechnete Bodenbewegungsmodell für den zuvor dargestellten Bereich Visbek mit beiden Senkungsbereichen. Die räumliche Ausreißererkennung entfernte Rückstreuer außerhalb des Vertrauensbereichs von $\pm 2\text{ mm/Jahr}$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Der gewählte Konfidenzbereich spiegelt sich in der erkennbare Streuung der dargestellten PSI-Daten wider.

Der Einfluss der geschätzten Varianzen der eingehenden Geschwindigkeiten führt zu Verbesserungen in den Beobachtungen und lässt das Modell nicht exakt durch die Stützpunkte verlaufen. Außerdem läuft das generalisierte Bewegungsmodell in den Zentren der Senkungstrichter »kegelförmig« zusammen, was dem tatsächlichen Bewegungsverhalten vermutlich nicht entspricht. Realistischer wäre eine Glockenkurve als Modellform, da nicht zu erwarten ist, dass die vorhandenen Senkungen punktuell zusammenlaufen. Eine mögliche Ursache für die berechnete Modellform kann in dem verwendeten exponentiellen Variogramm liegen.

Zur Kombination der lokalen Bodenbewegungsmodelle unterschiedlicher Stacks wurden zuvor die Verbesserungen auf Basis der bekannten Geschwindigkeiten von Höhenfestpunkten aus dem Abschnitt 5.2 an die einzelnen Modelle angebracht. Mit diesen Modellverbesserungen wird eine Vergleichbarkeit des modellierten regionalen Bewegungsverhaltens sichergestellt. In der Kombination der einzelnen lokalen Bodenbewegungsmodelle wurden die Kriging-Varianzen zur gewichteten Mittelbildung von doppelten Approximationswerten verwendet.

5.4 Integration der lokalen Bodenbewegungsmodellierungen in die regionale Geschwindigkeitsapproximation

Die Geschwindigkeiten von lokalen Bodenbewegungsgebieten werden in der Modellierung des regionalen Bewegungsverhaltens durch die getroffenen statistischen Annahmen zu gering geschätzt (vgl. Abschnitt 5.1). Die betroffenen Gebiete zeigen zudem glatte räumliche Strukturen, die nur wenige Details abbilden.

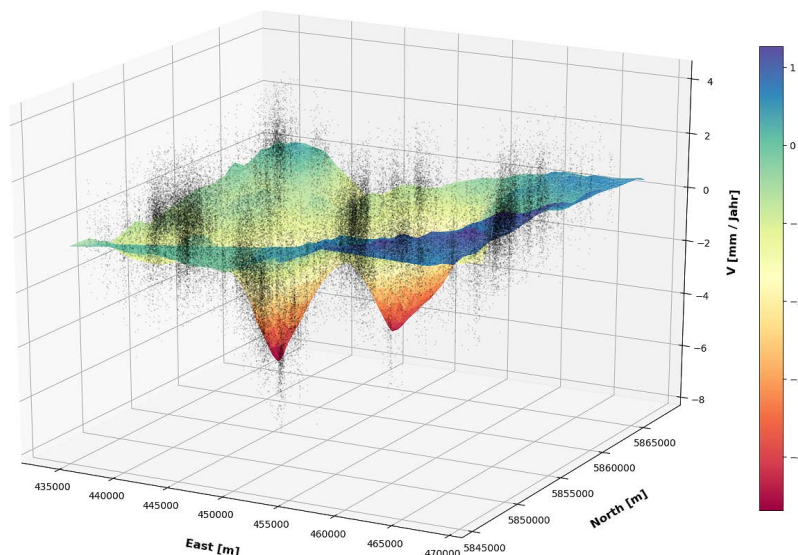


Abb. 12: Bodenbewegungsmodell (farblich abgestuft) für den Bereich Visbek mit den eingegangenen PS-Geschwindigkeiten des Stacks ASCE_015_01 (schwarz)

Um diese Schwächen der Modellvereinheitlichung zu überwinden, werden die individuellen Gebietsmodellierungen in das regionale Approximationsmodell eingefügt, wodurch eine bedarfsorientierte »Detailschärfe« im Gesamtmodell für die niedersächsische Landesfläche geschaffen wird. Dazu werden zunächst die Stützstellen des regionalen Modells in Bereichen mit vorhandenen Einzelmodellierungen ausgeschnitten, wobei Überlappungszonen von 1500 m zwischen den jeweiligen Modellen verbleiben. In diesen Zonen liegen doppelte Approximationswerte vor, die zur Realisierung eines fließenden Übergangs zwischen regionalen und lokalen Modellen in Abhängigkeit der Nachbarschaft gemittelt werden. Die ausgeschnittenen Bereiche werden mit den geschätzten Änderungsraten der detaillierten Einzelmodelle aufgefüllt. Abb. 13 zeigt das so erstellte finale Kombinationsmodell der regionalen und lokalen Änderungsraten für Niedersachsen, bei dem sich die Einzelmodellierungen fast ohne entstehende Diskontinuität in das regionale Modell einfügen. Das berechnete Bewegungsmodell mit einer regelmäßigen Rasterweite von 500 m kann für weitergehende Untersuchungen verwendet werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in den Modellierungen ausschließlich PSI-Daten aus aufsteigenden (ascending) Orbits der Sentinel-1 Satelliten eingegangen und dadurch Systematiken aufgrund von Lageverschiebungen enthalten sind.

6 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Methode zur Qualitätssicherung von PSI-Auswertungen vorgestellt, mit der zeitliche und räumliche Ausreißer automatisiert detektiert werden können. Diese sind zur weiteren Verarbeitung aus den PSI-Daten auszuschließen, um Fehlinterpretationen

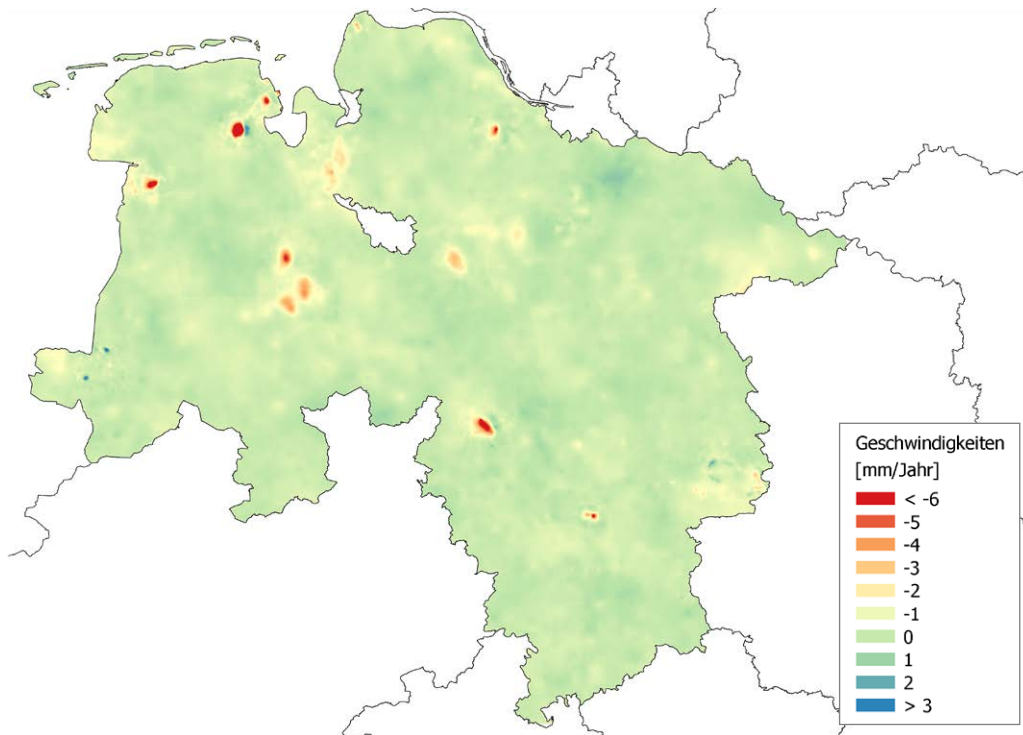


Abb. 13:
Finales Kombinationsmodell aus regionalen und gebietsbezogenen Geschwindigkeitsapproximationen

einzelner Punkte vorzubeugen und großräumige Bodenbewegungsmodellierungen zu verbessern. Die zeitliche Ausreißerdetektion beruht auf der Annahme eines linearen Bewegungsverhaltens, was besonders in anthropogen verursachten Bodenbewegungen nicht immer den tatsächlichen Bewegungsverlauf realistisch widerspiegelt. Häufig treten in solchen Gebieten nicht lineare Bewegungen auf, die sich mit einem allgemeinen Polynommodell deutlich besser beschreiben lassen. Zur automatisierten Bestimmung des erforderlichen Polynomgrades könnten zukünftig orthogonale Polynomschätzungen in den Algorithmus der zeitlichen Ausreißerfilterung integriert werden (Busch und Linke 2014).

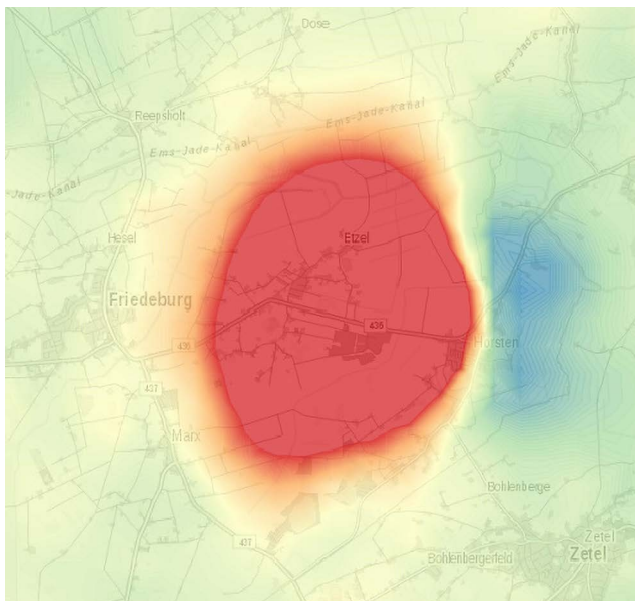


Abb. 14: Bodenbewegungsgebiet Etzel (rot) mit modellierten Hebungserscheinungen (blau)

Für die flächenhafte Approximation von punktuellen Geschwindigkeitsinformationen wurde das geostatistische Kriging-Verfahren in Kombination mit der Variographie auf geprüfte PSI-Daten angewendet, um ein Bodenbewegungsmodell für die Landesfläche Niedersachsens zu erstellen, und ein Algorithmus verwendet, der Genauigkeitsinformationen der einzelnen Scatterer in den Modellierungen berücksichtigt. Zur Kombination von Approximationen unterschiedlicher SAR-Stacks wurden als bekannt angenommene Höhenänderungen aus dem amtlichen Festpunktfeld in den Modellierungsprozess integriert, um ein einheitliches Geschwindigkeitsdatum in die Bewegungsmodelle einzuführen. Aufgrund unterschiedlicher Kovarianzfunktionen von regionalen und lokalen Bewegungsmustern wurden diese zur möglichst realistischen Modellierung separat analysiert. Zukünftige Untersuchungen sollen sich auf gemeinsame Modellierungen von lang- und kurzwelligen Bewegungssignalen fokussieren sowie verschiedene theoretische Variogrammfunktionen verwenden.

Die von der BGR für diese Untersuchungen bereitgestellten PSI-Auswertungen basieren nur auf aufsteigenden (ascending) Orbits der Sentinel-1 Mission. Um aus den ursprünglichen line-of-sight Informationen Höhenänderungen abzuleiten, wurden diese unter Annahme, dass keine Lageverschiebungen vorhanden sind, in die Vertikalrichtung projiziert. Besonders in lokalen Bodenbewegungsgebieten sind Horizontalverschiebungen aber die Regel und führen durch deren Vernachlässigung zu systematischen Verfälschungen abgeleiteter Höhenänderungen. Dies konnte besonders in den Gebieten Etzel (siehe Abb. 14) und Wunstorf festgestellt werden, da sich hier im Randbereich der Deformationsgebiete

Hebungserscheinungen zeigen, die eindeutig auf vorhandene Lageverschiebungen zurückzuführen sind.

Für eine künftige Trennung der Vertikalkomponenten von Lageeinflüssen ist eine kombinierte Lösung von Daten auf- und absteigender Satelliten nötig (Yin und Busch 2018). Dadurch lässt sich die Vergleichbarkeit zwischen den Geschwindigkeiten der Höhenfestpunkte und den PSI-Punkten steigern. Außerdem würde die Form der Bewegungsgebiete verbessert und die Qualität einer Gebietsabgrenzung erhöht werden.

Insgesamt kann klar hervorgehoben werden, dass der Datensatz des BBD eine wichtige Ergänzung für die Untersuchung von Bodenbewegungsgebieten bildet. Die Informationen geben der Landesvermessung deutliche Hinweise, in welchen Regionen eine Aktualisierung des Raumbezugs erforderlich ist und bedarfsorientierte, notfalls kurzfristige Messungen notwendig sind. Daher werden PSI-Daten und die daraus gewonnenen Analysen und abgeleiteten Modelle der Landesvermessung von hohem Nutzen sein.

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 (Rili-RB-AdV). Version 3.0 – Stand 16.05.2017.
- Anselin, L. (1995): Local Indicators of Spatial Association – LISA. In: *Geographical Analysis*, Vol. 27, No. 2, 93–115.
- BGR (2020): <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de>, letzter Zugriff 01/2020.
- Bodemdalingskaart (2019): <https://bodemdalingenkaart.nl>, letzter Zugriff 10/2019.
- Brockmeyer, M. (2013): Untersuchung von Bodenbewegungen mit GNSS-Messungen im Bereich der SAPOS-Referenzstation Emden. In: *VDVmagazin* 5/13, 382–387.
- Brockmeyer, M. (2019): Daten der Landesvermessung zur räumlichen Interpolation von Bodenbewegungen. In: Alkhatib, H., Pfaffenholz, J.-A. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2019*, 151–163, Hannover. DOI: 10.15488/4519.
- Busch, W., Linke, J. (2014): Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels orthogonaler Polynome. In: *AVN* 121, Heft 8/9, 298–310.
- Chen, D., Lu, C.-T., Kou, Y., Chen, F. (2008): On Detecting Spatial Outliers. In: *GeoInformatica*, Vol. 12, No. 4, 455–475. DOI: 10.1007/s10707-007-0038-8.
- Engel, T., Busch, W. (2018): Landesweite, radarinterferometrische Bodenbewegungserfassung auf Grundlage von Sentinel-1-Daten – Verfahrensweise und Ergebnisse am Beispiel des Saarlandes. In: Busch, W. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2018*, 11–25.
- GVL (2019): <https://mangomap.com/geomatic-ventures-limited/maps>, letzter Zugriff 04/2020.
- Heinrich, U. (1992): *Zur Methodik der räumlichen Interpolation mit geostatistischen Verfahren*. Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-663-14522-6.
- Jahn, C.-H., Feldmann-Westendorff, U., Grüner, D., Kulle, U., Lembrecht, P. (2011): Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen. In: *NaVKV – Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung* – 4/2011, 3–25.
- Kalia, A.C., Frei, M., Lege, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. In: *Remote Sensing of Environment* 202 (2017), 234–249.
- Kalia, A.C. (2018): Classification of Landslide Activity on a Regional Scale Using Persistent Scatterer Interferometry at the Moselle Valley (Germany). In: *Remote Sensing* 2018, 10, 1880.
- Kou, Y., Lu, C.-T., Chen, D. (2006): Spatial Weighted Outlier Detection. In: *Proceedings of the 2006 SIAM International Conference on Data Mining*, Bethesda, USA. DOI: 10.1137/1.9781611972764.71.
- Krickel, B. (2018): Bodenbewegungskataster NRW – ein Werkstattbericht. In: Busch, W. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2018*, 27–37.
- Lege, T., Kalia, A., Adam, N. (2018): Abschätzung der Absenkung der Sohle des Emsästuars mit der Persistent Scatterer Interferometry (PSI). In: Busch, W. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2018*, 153–165.
- Lege, T., Kalia, A., Frei, M. (2019): Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands. In: Alkhatib, H., Pfaffenholz, J.-A. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2019*, 37–47.
- Lu, C.-T., Chen, D., Kou, Y. (2003): Algorithms for spatial outlier detection. In: *Third IEEE International Conference on Data Mining*, Melbourne, USA. DOI: 10.1109/ICDM.2003.1250986.
- MI – Niedersächsisches Innenministerium (2016): Realisierung, Führung und Bereitstellung des Landesbezugsystems in Niedersachsen (Raumbezugserlass).
- Montero, J.M., Fernández-Avilés, G., Mateu, J. (2015): Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modeling and Kriging. In: *Wiley Series in probability and statistics*.
- Niemeier, W. (2008): *Ausgleichungsrechnung – Statistische Auswertungsmethoden*. 2. Auflage, Berlin.
- Oliver, M.A., Webster, R. (2014): A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. In: *Catena*, Vol. 113, 56–69.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: *zfv* 6/2019, 354–361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Rodrigues Gonzales, F., Parizzi, A., Brcic, R., Shau, R., Adam, N., Redl, S., Siegund, R. (2018): Bodenbewegungsdienst Deutschland – Bericht zur Lieferung Teilleistung TL2. Institut MF-SAR-OP, 31.10.2018.
- SAPOS (2017): SAPOS®-Qualitätsbericht 2017 der Projektgruppe SAPOS®-Qualitätsmanagement. www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/SAPOS/, letzter Zugriff 03/2020.
- Schafmeister, M.-T. (1999): *Geostatistik für die hydrologische Praxis*. Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-58567-8.
- Tobler, W.R. (1970): A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. In *Economic Geography*, Vol. 46, 234–240.
- Wackernagel, H. (1998): *Multivariate Geostatistics*. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-03550-4.
- Walter, D. (2012): *Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen*. Dissertation, 1. Auflage, Clausthal-Zellerfeld.
- 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*, Heft 76.
- Xi, F. (2017): Detektion von anomalen Zeitreihen an Persistent-Scatterer-Punkten im Zusammenhang mit der Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen. Dissertation, Clausthal-Zellerfeld.
- Yin, X., Busch, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfiguration zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In: Busch, W. (Hrsg.): *Tagungsband: GeoMonitoring 2018*, 119–138.

Kontakt

M.Sc. Marco Brockmeyer | M.Sc. Christian Schnack |
Dr.-Ing. Cord-Hinrich Jahn
Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), Landesvermessung und Geobasisinformation
Podbielskistraße 331, 30659 Hannover
marco.brockmeyer@lgl.niedersachsen.de
christian.schnack@lgl.niedersachsen.de
cord-hinrich.jahn@lgl.niedersachsen.de