

# Aspekte des Bodenbewegungsdienstes Deutschlands

DR. THOMAS LEGE, DIPL.-GEOGR. ANDRE KALIA & DR. MICHAELA FREI

Deformationen der Erdoberfläche sind das Ergebnis geologischer Prozesse oder anthropogener Maßnahmen oder deren Kombination. Beispiele sind tektonische Bewegungen, Hangrutschungen, Subrosions-, Auslaugungs- und Quellprozesse. Die Deformationen treten darüber hinaus in Folge von Öl- und Gasextraktionen, Grundwasserbewirtschaftung, Verpressungen, Tunnelauffahrungen, Baugrubenmanagement oder Bergbau auf. Verformungen der Erdoberfläche lassen sich seit fast 30 Jahren millimetergenau mit der satellitengestützten Radarinterferometrie identifizieren und monitoren. Die Einsatzfähigkeit und Genauigkeit des Verfahrens ist durch zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, Pilotstudien und Anwendungsfälle nachgewiesen.

Verursachen Bodenbewegungen Schäden, müssen die Ursachen ergründet und Fragen der Verantwortung und Kostenübernahme geklärt werden. Seit dem Start der Radarsatelliten Sentinel 1A und B des europäischen Copernicus Programms stehen flächendeckend umfangreiche Daten zum kostenfreien Download zur Verfügung. Unter Nutzung von Open-Source Software können inzwischen von zahlreichen Akteuren und Interessengruppen Deformationsdarstellung über die Erdoberfläche gewonnen und verbreitet werden. Daraus erwächst die Notwendigkeit für Verformungen der Erdoberfläche unabhängige, qualitätsgesicherte und allseits anerkannte Rahmenwerte, Entscheidungsgrundlagen und Prozessketten bereitzuhalten.

Daher baut die BGR den satellitengestützten nationalen Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) auf (KALIA ET AL., 2017). Zurzeit sind zwei Datensätze des aufsteigenden und absteigenden Orbits der Copernicus-Satellitenmission Sentinel-1 prozessiert. Sie decken als konsistente Datensätze die gesamte Fläche Deutschlands ab.

Im Beitrag wird der Sachstand des BBD präsentiert und ein Blick auf die ersten bundesweiten Datensätze mit Bezug zu geotechnischen und bergbaulichen Anwendungen geworfen. Darüber hinaus wird schlaglichtartig der Einsatz der Radarinterferometrie in Europa, auch Deutschland betreffend, beleuchtet.

**Schlüsselwörter** – Radarinterferometrie, PSI, Bodenbewegungsdienst, Copernicus, Sentinel 1, Kavernenspeicher, JadeWeserPort, Emsästuar

## 1. Einleitung und Hintergrund

Die Erdoberfläche verformt sich je nach den physikalischen/chemischen Eigenschaften des unter der Oberfläche anstehenden Gesteins auf Grund geologischer Prozesse oder in Folge von anthropogenen Maßnahmen bzw. wegen einer Kombination der Beiden. Im Folgenden werden die Deformationen der Erdoberfläche mit dem Sammelbegriff „Bodenbewegungen“ zusammengefasst. Neben tektonisch verursachten Bewegungen können Hangrutschungen, Subrosions-, Auslaugungs- sowie Schrumpfung und Quellprozesse verantwortlich sein. Bodenbewegungen treten darüber hinaus in Folge der Gewinnung von Kohlenwasserstoffen im Bohrlochbergbau, der Verpressung von Gasen und Flüssigkeiten, der Grund- und Oberflächenwasserbewirtschaftung, Tiefbaumaßnahmen wie Tunnelauffahrungen und Baugrubenerstellung und –management, dem aktiven Bergbau oder in Gebieten mit Altbergbau auf. Bereits seit Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts lassen sich kleinste Verformungen der

Erdoberfläche millimetergenau mit der satellitengestützten Radarinterferometrie identifizieren und monitoren. Dazu werden die satellitengestützt gewonnenen Radardaten auf der Basis verschiedener Ansätze prozessiert. Die zwei am häufigsten verwendeten Ansätze sind die Persistent Scatterer Interferometry (PSI) und die Small Baseline Subset (SBAS) Prozessierung. Ergebnisse sind für jeden kohärenten Rückstreuer die mittlere Geschwindigkeit über den gesamten Auswertzeitraum sowie die Zeitserie der Bewegung in der Sichtlinie der Radarsatelliten (Line-of-Sight, LOS). Die Einsatzfähigkeit und Genauigkeit der Satellitenradarinterferometrie ist durch nationale und internationale Forschungsprojekte wie z.B. GMES4Mining, TerraFirma, PanGeo, Lampre oder Subcoast vielfach nachgewiesen. Seit der kostenfreien Verfügbarkeit umfangreicher Satellitendaten aus dem Copernicus-Programm der Europäischen Union kann unter Nutzung von kommerzieller und Open-Source Prozessierungs-Software von jedem, der fachlich damit umzugehen weiß, umfangreiche Deformationsdarstellungen über die Erdoberfläche gewonnen und verbreitet werden. Darüber hinaus werden die von Fachfirmen angebotenen großflächigen Bodenbewegungskarten immer erschwinglicher. Sentinel-1 PSI-Auswertungen im 100 m<sup>2</sup>-Raster sind für mehrere 10er km<sup>2</sup> ab 2000 EUR für Großbritannien erhältlich (TRE, 2019).

Daraus erwächst die Notwendigkeit für Verformungen der Erdoberfläche unabhängige, qualitätsgesicherte und allseits anerkannte Rahmenwerte, Entscheidungsgrundlagen und Prozessketten bereitzuhalten. Erfahrungen in der Beurteilung und Nutzung dieser Datensätze, Methodenkompetenzen und Interpretationsfähigkeiten in den zuständigen öffentlichen Verwaltungen sind zu entwickeln. Zu diesem Zweck und um in Deutschland den hohen Informationsgehalt der InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) Daten für Planungs- und Monitoringaufgaben und zur Gefährdungsanalyse in der Praxis zu nutzen, baut die BGR den satellitengestützten nationalen Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) auf (KALIA ET AL., 2017). Zurzeit sind zwei Datensätze des aufsteigenden und absteigenden Orbits des Copernicus-Satelliten Sentinel-1 prozessiert. Sie decken alle konsistente Datensätze die gesamte Fläche (ca. 356.000 km<sup>2</sup>) der Bundesrepublik Deutschland ab.

## 2. Bodenbewegungsdienst Deutschland

### 2.1. Konzept

Das Konzept des BBDs besteht aus vier wesentlichen Elementen (siehe Abb. 1): Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten, Bodenbewegungsdaten und Produkten, einer Service-Plattform und Nutzern. Basisprodukt des BBDs sind bundesweite Bodenbewegungsdaten basierend auf SAR-Daten der Copernicus Sentinel-1 Mission.

Diese SAR-Mission ist besonders gut für einen nationalen Bodenbewegungsdienst geeignet, weil sie langfristig ausgerichtet ist und die Aufnahmeplanung der Landoberfläche Europas eine vollständige Abdeckung mit hoher zeitlicher Auflösung vorsieht, sodass eine hohe Verfügbarkeit für die gesamte Landesfläche ermöglicht wird. Der reguläre Aufnahmemodus von Sentinel-1 über Landoberflächen ist der interferometric wide-swath (IW) Modus. Dieser ist durch eine große Schwadbreite von ca. 250 km bei einer mittleren räumlichen Auflösung von ca. 20 m, charakterisiert. Die Sentinel-1 Rohdaten werden mittels PSI-WAP Prozessierung (ADAM ET AL., 2013; ADAM ET AL., 2011) zu bundesweiten Bodenbewegungsdaten verarbeitet. Um diese Daten der Nutzergemeinde zur Verfügung zu stellen wird ein WebGIS innerhalb der Service-Plattform entwickelt. Dieses beinhaltet neben den Bodenbewegungsdaten auch Produkte für spezielle Anwendungen. Zudem wird ein Datenarchiv historischer Bodenbewegungsdaten sowie entsprechende Dokumentationen auf der Service-Plattform entwickelt. Aufgrund der mittleren räumlichen Auflösung der Sentinel-1 IW Daten ist der primäre Anwendungsbereich auf regionaler Skala. In Ergänzung zu den Daten und Produkten des BBDs sind von der Industrie angebotene Zoom-Produkte im Konzept enthalten. Zoom-Produkte basieren auf räumlich hoch oder sehr hoch aufgelösten und an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst verarbeiteten SAR-Daten und können so auch Anwendungen auf lokalen Skalen bedienen (z.B. Bewegungen einzelner Gebäude). Ein Marktplatz auf der Service-Plattform dient der zentralen Informationsweitergabe bezüglich angebotener Zoom-Produkte.

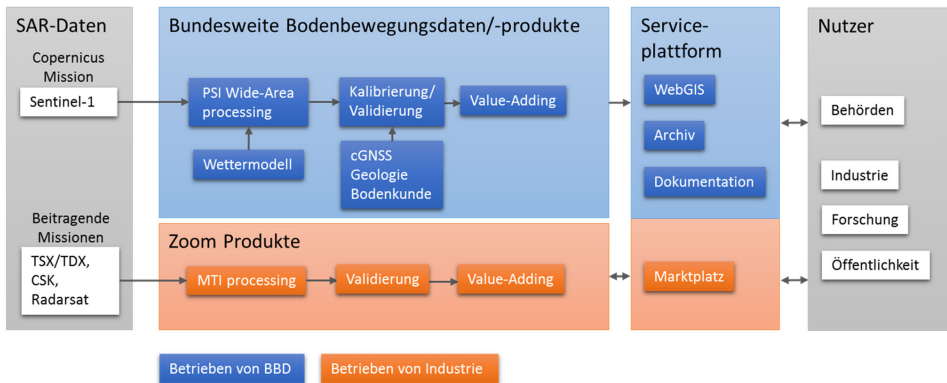


Abbildung 1: Konzept des BDD

## 2.2. Aktueller Sachstand

Aktuell befindet sich der BDD in der Aufbauphase. Dazu gehört die Qualitätssicherung der ersten bundesweiten Bodenbewegungsdaten, die Durchführung von Pilotstudien, der Wissenstransfer zwischen Nutzern und Datenproduzenten und der Aufbau eines WebGIS. Zur Qualitätssicherung der bundesweiten Bodenbewegungsdaten werden GNSS-Geschwindigkeiten basierend auf einheitlich aufbereiteten GNSS-Zeitreihen der SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationen verwendet (BROCKMEYER ET AL. 2018). Die GNSS-Zeitreihen wurden von dem Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) im Rahmen eines BGR-Auftrags produziert. Insgesamt stehen damit einheitlich aufbereitete GNSS-Geschwindigkeiten von 230 SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationen zur Verfügung.

Im Ergebnis zeigen weniger als 20% aller SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationen mittlere Geschwindigkeiten von mehr als 1 mm/a. Die größte Bewegungsrate ergibt sich im Betrachtungszeitraum für die Referenzstation Emden Knock mit 2,1 mm/a in westlicher Richtung bei einer Absenkungsrate von 2,0 mm/a. Die Station liegt im Einflussbereich der Gasgewinnung des Gasfeldes Groningen. Für die 230 SAPOS<sup>®</sup>-Stationen wurden allgemein größere Höhenänderung als Lageänderung festgestellt. Systematische Hebungen erscheinen in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern, in der Eifel und im bayerischen Voralpenraum.

Als erste Interpretationsansätze können noch anhaltende isostatische Ausgleichbewegungen nach dem Abschmelzen der Gletscher der letzten Eiszeit, der Magmatismus in der Eifel und die Hebungen der Alpen vorgeschlagen werden. In einigen Bereichen Deutschlands, jedoch weniger systematisch als bei den Hebungen, können Senkungsbewegungen erkannt werden, so im Bereich der Emsmündung. Zur weiteren Nutzung als wichtigen Kalibrationsdatensatz für den BDD ist es erforderlich, dass auch zukünftig bundesweit konsistente SAPOS<sup>®</sup>-Stationsdaten verfügbar sind.

Neben der Qualitätssicherung durch punkthafte GNSS-Daten wurden Pilotstudien zur geowissenschaftlichen Plausibilitätsprüfung der BDD Daten in Zusammenarbeit mit Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) und Landesbergämtern durchgeführt. Im Jahr 2018 nahmen 13 SGD und drei Landesbergämter an diesen Pilotstudien teil. Die 16 Pilotstudien haben die BDD Daten in Gebieten mit potentiellen anthropogen bedingten Bodenbewegungen (z.B. (Alt-)Bergbau, Kavernenspeicher) sowie in Gebieten mit potentiell geogenen Bewegungsursachen (z.B. Moorsackung, Salztekonik) untersucht. Die Ergebnisse der Pilotstudien wurden im Rahmen des Arbeitskreises 6 „Bodenbewegungsdienst

Deutschland“ des Direktorenkreises der SGD auf zwei Arbeitstreffen vorgestellt und diskutiert. Im Januar 2019 erfolgte ein zweiter Aufruf der BGR zur Einreichung von Pilotvorschlägen. Um die fachliche Bandbreite der Pilotstudien zu vergrößern wurde der Teilnehmerkreis um Landesvermessungsämter und Bundeseinrichtungen erweitert. Um potentielle Nutzer über die BBD Daten zu informieren und die Nutzerbedürfnisse abzufragen wurden Workshops bei der BGR sowie auf dem Nationalen Forum für Fernerkundung und Copernicus „Copernicus gestaltet“ durchgeführt.

Ein weiterer aktueller Aspekt des BBDs ist der Aufbau einer technischen Infrastruktur für ein WebGIS. Zu Beginn fand dazu eine Definition der benötigten Funktionalitäten statt. Diese umfassen die performante Darstellung einer großen Anzahl von Punktdaten, eine maßstabsabhängige Aggregation der originalen Punktinformationen, die Darstellung der PSI Zeitserien, etc. Aufbauend auf diesen Rahmenbedingungen wurde ein Softwarekonzept erstellt, welches sich aktuell in der Umsetzung befindet.

## 2.3. Anwendungen

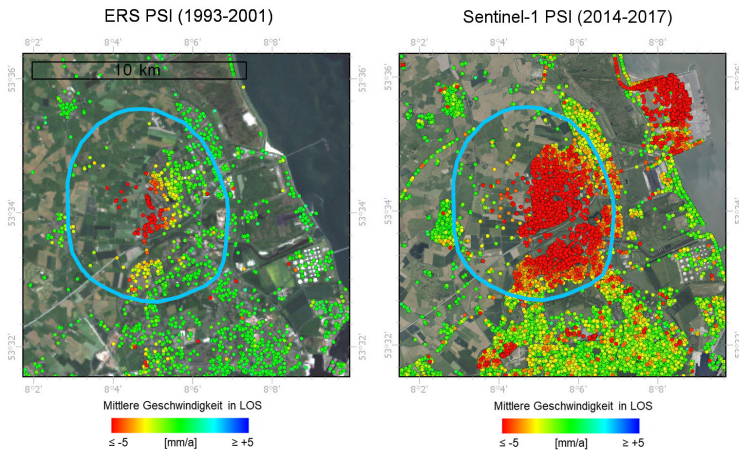
### 2.3.1. Kavernenspeicher

Landabsenkungen von tiefliegenden Küstengebieten können zu einem erhöhten Überflutungsrisiko, insbesondere vor dem Hintergrund eines Meeresspiegelanstiegs, führen. Zur Unterstützung von Risikonalysen können flächige Informationen bzgl. Bodenbewegungen einen Beitrag leisten. Im Bereich der Deutschen Nordseeküste kann bspw. der Betrieb von Kavernenspeichern zu Landabsenkung führen. Der Betrieb von Kavernenspeichern führt zu einem Druckgradienten zwischen den Kavernen und den umgebenden Gesteinen, bei Salzkavernen kommt es daher zu Kriechbewegungen des Salzgesteins in Richtung der Kaverne, was letztendlich eine Landabsenkung verursachen kann (WARREN, 2006). Im vorliegenden Fallbeispiel des Kavernenspeichers „Wilhelmshaven-Rüstringen“ befinden sich 36 Kavernen in einem Salzdom. Die Kavernen haben eine Tiefenlage zwischen 1,2 – 2,0 km, eine Größe von bis zu 800.000 m<sup>3</sup> und können insgesamt ca. 7 Millionen m<sup>3</sup> Öl speichern (NWKG, 2017).

Eine PSI-Auswertung von ERS-1/2 SAR Daten (Adam et al., 2011), zeigt eine Senkungsmulde im Bereich eines Salzdoms in dem sich der Kavernenspeicher „Wilhelmshaven-Rüstringen“ befindet (Abb. 2) (KALIA ET AL., 2018). Die maximale Bewegungsrate in LOS beträgt -8,9 mm pro Jahr. Dies entspricht, unter der Annahme einer rein vertikalen Bewegungsrichtung, einer vertikalen Bewegungsrate von 9,7 mm pro Jahr.

Ein Vergleich zwischen ERS PSI und Nivellement Daten, an 36 Nivellierpunkten, zeigte eine mittlere Abweichung von 1,1 mm pro Jahr. Die Mehrzahl der Nivellierpunkte befindet sich im ländlich geprägten Westen der Senkungsmulde, während sich die Mehrzahl der PSI Messungen im städtisch geprägten Osten der Senkungsmulde befinden (KALIA ET AL., 2018). Daher können PSI Messungen vorhandene terrestrische Nivelliernetze, insbesondere in städtischen Bereichen, in der Fläche ergänzen. Ein erster Vergleich der ERS PSI Daten mit aktuellen Sentinel-1 PSI Daten des BBDs zeigt, i) dass der Sentinel-1 PSI Datensatz eine höhere Messpunktdichte im Vergleich zum ERS PSI Datensatz aufweist, ii) sich die Absenkungsmulde im Bereich des Salzdoms vergrößert hat und iii) weitere Senkungsbereiche im Nordosten und im Süden des Kartenausschnitts detektiert wurden (Abb. 2). Das Senkungsgebiet im Nordosten befindet sich im Bereich des im September 2012 in Betrieb genommenen Container-Terminals Wilhelmshaven (JADEWESERPORT, 2019). Dieser gehört zu den größten norddeutschen Infrastrukturprojekten der letzten 50 Jahre. Zur Errichtung der Hafenumfläche mussten umfangreiche Landgewinnungsmaßnahmen, inkl. Sandaufspülung durchgeführt werden (JADEWESERPORT, 2019). Die Bauarbeiten erfolgten im Zeitraum zwischen 2008 und 2013 und somit zwischen den von ERS PSI und Sentinel-1 PSI abgedeckten Zeiträumen. Dies erklärt, warum sich im ERS PSI Datensatz keine Persistent Scatterer in diesem Bereich befinden.

Beide PSI Datensätze der Abb. 2 basieren auf SAR Daten des descending orbits und detektieren die Deformation der Erdoberfläche in LOS Richtung. Um eine Schätzung der vertikalen Deformation der Erdoberfläche unter Nutzung von ascending und descending PSI Daten zu demonstrieren dient das folgende Anwendungsbeispiel.



**Abbildung 2:** ERS und Sentinel-1 PSI Ergebnis in LOS Richtung überlagert mit den Umrissen des Salzdoms (REINHOLD ET AL. 2008). Eine Landsat Aufnahme vom 15.05.2000 dient als Hintergrundbild für die ERS PSI Daten. Eine digitales Orthophoto vom 01.05.2017 dient als Hintergrundbild für die Sentinel-1 PSI Daten (© GeoBasis-DE/BKG, 2019).

### 2.3.2. Ableitung der mittleren Geschwindigkeit in vertikaler und Ost-West Richtung

Die PSI Technik ermöglicht eine 1-D Messung der Entfernungsänderung zwischen SAR Satellit und Erdoberfläche. Die Deformation der Erdoberfläche kann aber in allen drei Raumdimensionen auftreten. Wird eine LOS Geschwindigkeit mittels des Kosinus des Einfallswinkels in eine vertikale Geschwindigkeit umgerechnet und die zugrundeliegende Annahme fehlender horizontaler Bewegungskomponenten ist nicht korrekt, kann dies zu Fehlinterpretationen führen. Um eine verbesserte Annäherung bzgl. der vertikalen Bewegungsrate zu erhalten, können zwei PSI Datensätze aus unterschiedlichen LOS Aufnahmegeometrien (d.h. SAR Daten aufgenommen vom ascending orbit und vom descending orbit) miteinander kombiniert werden. Voraussetzung dafür ist, dass beide PSI Datensätze möglichst denselben Aufnahmezeitraum umfassen, das gleiche Gebiet abdecken und sich auf möglichst denselben Referenzpunkt beziehen.

Im vorliegenden Fallbeispiel wurden zwei unabhängig voneinander verarbeitete Sentinel-1 PSI Datensätze des ascending orbits (2014 – 2018) und des descending orbits (2014 – 2017) genutzt. Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich der Städte Hamm und Ahlen und ist durch ein ausgeprägtes Hebungsgebiet gekennzeichnet (YIN ET AL., 2018). Die PSI LOS Geschwindigkeiten beider Datensätze beziehen sich auf die mittels GNSS-Zeitreihen abgeleitete Geschwindigkeit der SAPOS®-Referenzstation „Hamm“ (2009 - 2017) (BROCKMEYER ET AL. 2018). Um die ascending und descending PSI Geschwindigkeiten zu kombinieren wurde ein quadratisches Grid mit einem Gitterabstand von 60 m erstellt. Sofern in einer Gitterzelle mindestens drei Persistent Scatterer pro PSI Datensatz vorhanden sind, wurde jeweils der Mittelwert der LOS Geschwindigkeit der Gitterzelle zugewiesen. Zudem wurde jeder Gitterzelle der entsprechende Einfallswinkel und die Azimut-Blickrichtung zugewiesen. Mittels der geometrischen Zusammenhänge zwischen Einfallswinkel und Azimut-Blickrichtung der ascending und descending PSI Daten (BÉJAR-PIZARRO ET AL. 2017) und unter der Annahme keiner Bewegungskomponente in Nord-Süd Richtung, wurde für jede Gitterzelle die vertikale und die Ost-West Bewegungsrate abgeleitet (siehe Abb. 3 C und D).

Das Ergebnis zeigt, dass sich die Westseite des Hebungsgebietes nach Westen verschiebt, während

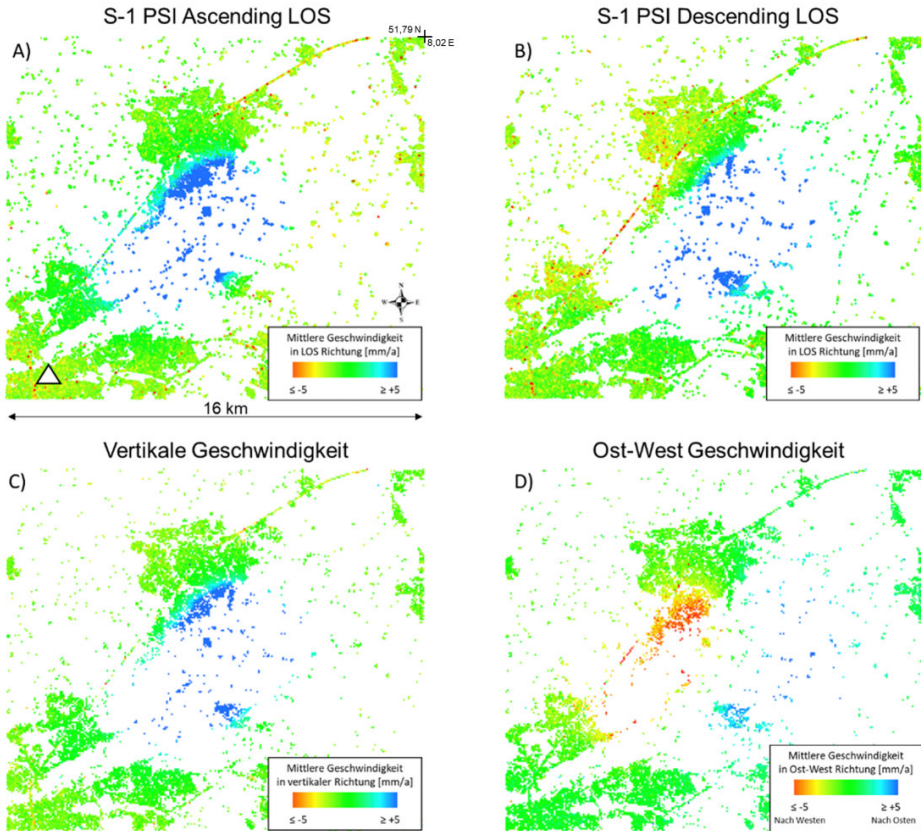


Abbildung 3: Sentinel-1 PSI in Ascending LOS Richtung und Lage der *SAPOS*<sup>®</sup>-Referenzstation „Hamm“ markiert mit Dreieck (Δ) (A), Sentinel-1 PSI in Descending LOS Richtung (B), aus Ascending und Descending abgeleitete vertikale Bewegungsrate (C) und aus Ascending und Descending abgeleitete Bewegungsrate in Ost-West Richtung (D).

sich die Ostseite nach Osten verschiebt (siehe Abb. 3 D). Die Lage des Hebungsgebietes (siehe Abb. 3 C) ist im Vergleich zu den LOS Ergebnissen (Abb. 3 A und B) plausibel. Das „Hebungsgebiet“ ist in der LOS ascending Darstellung nach Westen verschoben (Abb. 3 A), während es in der LOS descending Darstellung nach Osten verschoben ist (Abb. 3 B). Dieser Effekt ist durch die unterschiedliche Projektion der Horizontalkomponente in die entsprechende LOS Richtung verursacht.

Somit ermöglicht eine Kombination von zwei PSI Datensätzen mit unterschiedlichen Aufnahmegeometrien eine bessere Annäherung an die Deformation der Erdoberfläche. Andererseits, wird durch die Zuweisung der PSI Messwerte in einem Grid die ursprüngliche Messpunktdichte verringert. Dies kann in Gebieten mit geringer Messpunktdichte, typischerweise in ländlichen Gebieten, zu Problemen führen.

### 2.3.3. Sohlabenkung Emsästuar

LEGE ET AL. (2018) leiten aus den östlich und westlich der Außenems in den PSI-Daten beobachtbaren großräumigen Absenkung (vgl. Abb. 4) eine korrespondierende Sohlabenkung der Außenems ab. Unter Verwendung und Interpretation weiterer geologischer Information, in Kombination mit den Absenkungsmodellen des Gasfelds Groningen und GNSS-Werten der Emspegel sowie weiterer geodätischer Punkte wird eine bedeutende Subsidenz von Teilen der Gewässersohle des Emsästuars berechnet. In der Spitze werden von 1992 bis 2001 4,2 cm Sohlabenkung bestimmt. Außendeichs ist ein Gebiet mit einer Fläche von etwa 200 km<sup>2</sup> von einer Senkungsrate von mehr als 2 mm/a betroffen (vgl. Abb. 5). Wird angenommen, dass die absinkende Gewässersohle bzw. Wattfläche durch Sedimentablagerung aus der Wassersäule auf einer konstanten Höhe bleibt, so errechnet sich eine Sedimentsenke von ca. 0,55 Mio. m<sup>3</sup>/a bzw. knapp 1 Mio. t/a. Der Wert ist vergleichbar zu den 1,3 Mio. t/a des Zeitraums zwischen 1994 und 2015, die bisher üblicherweise in den Sedimentbilanzen für die Kalibrierung morphodynamischer Modelle des Emsästuars angenommen werden (vgl. z.B. VAN MAREN ET AL. 2016, KFKI 2015). Für Sedimentbilanzen und die Kalibrierung von Modellen zur Optimierung der Baggerstrategie und zur Prognose der Sohlentwicklung der Ems muss also ein Sedimentationsvolumen in etwa der doppelten Größe wie bisher angesetzt werden.

## 3. Bodenbewegungsdarstellungen in Europa

### 3.1. Beispiele Nationaler Dienste

Das erste InSAR-Projekt auf nationaler Ebene wurde seit 2007 in Italien im Rahmen eines speziellen Konzepts für ein Umweltmonitoring mit fernerkundlichen Verfahren (Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale – PST-A), das der Kartierung von Geogefahren und Vermeidung daraus erwachsender Risiken dient, umgesetzt. Im Rahmen von PST-A wurde über eine Reihe von Vergaben des italienischen Umweltministeriums eine Datenbank für Bodenbewegungen auf der Basis von PSI-Daten generiert. Dazu wurden für das gesamte italienische Staatsgebiet gut 20.000 SAR-Aufnahmen der Satelliten ERS, Envisat und COSMO-SkyMed HIMAGE (stripmap) aus den Jahren 1992 bis 2014 prozessiert.

Alle PST-A Produkte sind im INSPIRE-konformen nationalen Geoportal „Geoportale Nazionale“ (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>) veröffentlicht. Öffentliche Einrichtungen aller staatlichen Ebenen Italiens, Forschungsinstitute und Universitäten können die Daten in Abstimmung mit dem italienischen Umweltministerium herunterladen (COSTANTINI ET AL., 2017).

Seit dem 2018 ist der Nationale Bodenbewegungsdienst Norwegens über das Internet verfügbar. Die Federführung liegt hierfür beim Norwegischen Geologischen Staatsgebiet NGU. Für die gesamte Landesfläche sind die PSI-Daten vor dem Hintergrund verschiedener Kartenwerke und optischer Satellitendaten als WebMap-Service abrufbar (NGU, 2018).

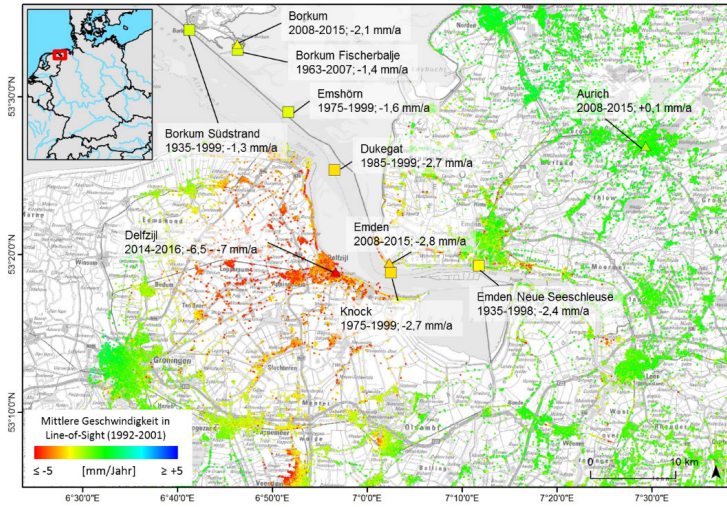


Abbildung 4: Bewegungsraten im Bereich des Emsästuars, GNSS: Dreiecke ( $\Delta$ ); Nivellement: Quadrate ( $\square$ ) (Quellen: GNSS Delfzijl: PIJPER & VAN DER LAAN (2016), GNSS Aurich/Emden/Borkum: BROCKMEIER (2015), Nivellement an Pegelstationen: IKÜS (2008)).

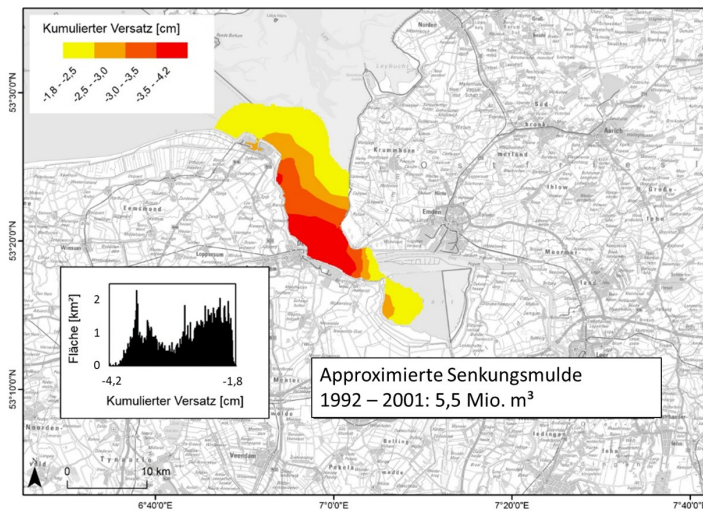


Abbildung 5: Approximiertes Volumen der Senkungsmulde im Bereich der Ems-Mündung (1992-2001).



Die Niederländische Bodenbewegungskarte ist auf Initiative des Niederländischen Zentrums für Geodäsie und Geo-Informatik unter Mitwirkung von Universitäten, Wissenschaftszentren und Vermessungsdienstleistungsunternehmen entwickelt worden. Die Auflösung beträgt  $2 \times 2 \text{ km}^2$  und es wird zwischen tiefen und flachen Ursachen für Bodenbewegungen unterschieden. Hintergründe sind Open Street Map, Bodenkarten, und optische Satellitendaten. Im Westen reicht die Darstellung nach Ostfriesland und bis ins nördliche Ruhrgebiet hinein. Für jede Kachel lässt sich die zeitliche Entwicklung der Bodenbewegung abrufen (NCG, 2018).

### 3.1.1. EU-GMS

Im Copernicus Programm wird derzeit im Rahmen des Copernicus Landdienstes unter dem Management der EEA (European Environmental Agency) ein europaweiter Bodenbewegungsdienst vorbereitet, der voraussichtlich ab Mitte 2020 in Produktion gehen und im Jahr 2021 online verfügbar sein wird (vgl. z.B.: COPERNICUS, 2019).

### 3.1.2. Weitere Bodenbewegungsdarstellungen

Über den Internet-Auftritt von Geomatic Ventures ist eine Sentinel-1 basierte relative Deformationskarte der vollständigen Landesfläche Deutschlands als interaktive Web-Anwendung verfügbar. 2200 Sentinel-1 Szenen aus dem Zeitraum von März 2016 bis März 2018 wurden auf der Basis des Intermittent Small Baseline Subset Verfahrens (ISBAS) prozessiert und in einer Auflösung von  $40 \times 40 \text{ m}^2$  georeferenziert dargestellt. Hintergrund sind hochauflösende optische Satellitendaten bzw. verschiedene Kartendarstellung, z.B. Open Street Map (GVL, 2019). Ebenso lässt sich auf die Deformationsdarstellungen der Landesflächen der Niederlande und des Vereinigten Königreiches zugreifen. Eine Sentinel-1 PSI-Auswertung im  $100 \times 100 \text{ m}^2$ -Raster mit vertikalen und horizontalen (Ost-West) Bewegungskomponenten sowie Zeitserien von Großbritannien ist unter TRE (2019) erhältlich. Zum Zeitpunkt der Texterstellung werden „pre-processed“ InSAR data für Gebiete ab  $25 \text{ m}^2$  ab 2000,- € angeboten.

## 4. Ausblick

Durch die Implementierung des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) wird erwartet, dass das Potenzial für Bodenbewegungsinformationen aus satellitengestützter SAR-Interferometrie, sein breites Nutzungsspektrum weiter entfalten wird. Die Konzepte des BBD und des europäischen Bodenbewegungsdienstes als Basisabdeckung werden von deutschen und europäischen Nutzergruppen unterstützt, wobei gleichzeitig anzumerken ist, dass für viele Anwendungen, insbesondere für das Infrastrukturmonitoring räumlich und/oder zeitlich höher aufgelöste und und speziell an die jeweilige Aufgabenstellung angepasste „Zoom-Produkte“ benötigt werden.

## Literatur

- ADAM, N., RODRIGUEZ GONZALEZ, F., PARIZZI, A., & R. BRIC (2013): Wide Area Persistent Scatterer Interferometry: Current Developments, Algorithms and Examples. In: Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1-4. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IGARSS 2013, 22. – 26. Juli 2013, Melbourne, Australien.
- ADAM, N., RODRIGUEZ GONZALEZ, F., PARIZZI, A. & W. LIEBHART (2011): Wide Area Persistent Scatterer Interferometry. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1481 – 1484. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IGARSS 2011, 24. – 29. Juli 2011, Vancouver, Kanada. ISBN 978-1-4577-1003-2.

- BÉJAR-PIZARRO, M., NOTTI, D., MATEOS, R. M., EZQUERRO, P., CENTOLANZA, G., HERRERA, G., BRU, G., SANABRIA, M., SOLARI, L., DURO, J., FERNÁNDEZ, J. (2017): Mapping Vulnerable Urban Areas Affected by Slow-Moving Landslides Using Sentinel-1 InSAR Data. *Remote Sensing*, 9(9). DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/rs9090876>
- BROCKMEYER, M. (2015): *SAPoS*® Geschwindigkeiten des LGLN, unveröffentlicht.
- BROCKMEYER, M., PAPE, W., JAHN, D.H. (2018) Prozessierung von GNSS-Stationsgeschwindigkeiten und Zeitreihen basierend auf RINEX-Daten permanenter *SAPoS*®-Referenzstationen, unveröffentlichter Bericht des LGLN, 41 S.
- COPERNICUS (2019): <https://land.copernicus.eu/about>, Zugriff am 18.01.2019.
- COSTANTINI, M., FERRETTI, A., MINATI, F., FALCO, F., TRILLO, F., COLOMBO, D., NOVALLI, F., MALVAROSA, F., MAMMONE, C., VECCHIOLI, F., RUCC, A., FUMAGALLI, A., ALLIEVI, J., CIMINELLI, A., A. & COSTABILE, S. (2017): Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *RSE*, 202, S. 250 – 275, DOI: 10.1016/j.rse.2017.07.017.
- GVL (GEOMATIC VENTURES LTD.) (2019): Sentinel-1 Relative Land Motion Map of Germany 2016-2018. <https://www.geomaticventures.com/> (2.1.2019).
- JADEWESERPORT (2019): Homepage des JadeWeserPort: <http://www.jadeweserport.de/hafen-betrieb/historie/>, Zugriff am 18.01.2019.
- IKÜS (2008): Aufbau eines integrierten Höhenüberwachungssystems in Küstenregionen durch Kombination höhenrelevanter Sensorik (IKÜS). Final Report, TU Dresden, FKZ 03KIS055, 172p.
- KALIA, A. C., FREI, M. & LEGE, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany, *RSE*, 202, S. 234-249. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.015.
- KALIA, A. C., FREI, M., LEGE, T. (2018): PSI-based German Ground Motion Service (BBD) to investigate natural and anthropogenic induced underground movements. In Proceedings of 9th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Saltmech IX, 12.-14.09.2018, Hannover, ISBN: 978-3-9814108-6-0.
- KFKI (2015): Die Küste, Heft 83, Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik der Deutschen Bucht, Hrg: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 202 S.
- LEGE, T., KALIA, A.C. & ADAM, N. (2018): Abschätzung der Absenkung der Sohle des Emsästuars mit der Persistent Scatterer Interferometry (PSI). In: Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2018, 1. bis 2. März 2018 in Clausthal-Zellerfeld, S. 153 – 165.
- NCG (NEDERLANDS CENTRUM VOOR GEODESIE EN GEO-INFORMATICA) (2018): Actuele Bodemdaalingskaart Nederland. <https://bodemdalingkaart.nl/> (2.1.2019).
- NGU (GEOLOGICAL SURVEY OF NORWAY) (2018): InSAR Norway – Launch of the Norwegian Ground Motion Service. <https://insar.ngu.no/> und <https://www.ngu.no/en/activities/launch-norwegian-ground-motion-service> (2.1.2019).
- NWKG (2017): Homepage der Nord-West Kavernengesellschaft mbH (NWKG), Zugriff am 25.10.2017: <https://www.nwkg.de/>.
- PIJPERS, F. & VAN DER LAAN, D.J. (2016): Trend changes in ground subsidence in Groningen – update May 2016, Statistics Netherlands, The Hague, ISSN 1572-0314.

- REINHOLD, K., KRULL, P. & KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands - 1:500.000. Berlin / Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- TRE (2019): <https://site.tre-altamira.com/uk-insar-map/> Zugriff am 4.3.2019.
- VAN MAREN D. S., OOST A. P., WANG Z. B. & VOS P. C. (2016): The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary, *Marine Geology* (376) 147 – 157, DOI: 10.1016/j.margeo.201603.007
- WARREN, J. K. (2006): *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- YIN, X., BUSCH, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In: Busch, W. (Hrsg.): *Tagungsband Geomonitoring 2018*, 1. bis 2. März 2018 in Clausthal-Zellerfeld, S. 119 – 138.