

BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform

BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Concept, Implementation and Service Platform

Andre C. Kalia | Michaela Frei | Thomas Lege

Zusammenfassung

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 unter anderen infolge von Öl- und Gasextraktionen, Grundwasserbewirtschaftung, (Alt-)Bergbau, Geothermienutzung, Tunnelauffahrungen und Baugrubenmanagement auf.

Verformungen der Erdoberfläche lassen sich seit mehr als 20 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 -1B des europäischen Copernicus Programms stehen flächendeckend umfangreiche Daten zum kostenfreien Download zur Verfügung. Inzwischen können von zahlreichen Akteuren und Interessengruppen Deformationsdarstellungen über die Erdoberfläche gewonnen und verbreitet werden. Daraus erwächst die Notwendigkeit für Verformungen der Erdoberfläche unabhängige, qualitätsgesicherte und allseits anerkannte Rahmenwerte, Entscheidungsgrundlagen und Prozessketten bereitzustellen.

Daher stellt die BGR den satellitengestützten nationalen BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD) als WebGIS-Anwendung zur Verfügung. Datensätze der aufsteigenden und absteigenden Orbits der Copernicus-Satellitenmission Sentinel-1 sind in Line of Sight (LOS) und als vertikale sowie Ost-West-Bewegungen abrufbar. Die gesamte Fläche Deutschlands ist durch konsistente Bodenbewegungsdatenprodukte abgedeckt.

Schlüsselwörter: BodenBewegungsdienst Deutschland, BBD, Copernicus, Sentinel-1, Persistent Scatterer Interferometrie, PSI

Summary

Deformations of the earth's surface are the result of geological processes or anthropogenic measures or a combination of these. Examples are tectonic movements, landslides, subrosion, leaching and swelling processes. Deformations also occur as a result of oil and gas extraction, groundwater management, (abandoned) mining, geothermal energy use, tunnel excavation and construction pit management.

For more than 20 years, deformations of the earth's surface can be identified and monitored with millimetre precision using satellite-supported radar interferometry. The applicability and accuracy of the method has been proven by numerous national and international research projects, pilot studies and applications.

If ground motions induce damage, the causes must be investigated and questions of responsibility and cost absorption clarified. Since the launch of the radar satellites Sentinel-1A and -1B of the European Copernicus programme, comprehensive data has been available for download free of charge. In the meantime, numerous actors and interest groups can obtain and disseminate deformation representations of the Earth's surface. This makes it necessary to provide independent, quality-assured and universally accepted framework values, bases for decision-making and process chains for deformations of the Earth's surface.

Therefore, BGR provides the satellite-based national Ground Motion Service Germany (BBD) as a WebGIS application. Data sets of the ascending and descending orbits of the Copernicus satellite mission Sentinel-1 are available in Line of Sight (LOS) and as vertical and east-west movements. The entire land area of Germany is covered by consistent ground motion data products.

Keywords: BodenBewegungsdienst Deutschland, BBD, Copernicus, Sentinel-1, Persistent Scatterer Interferometry, PSI

1 Hintergrund

Deformationen an der Erdoberfläche werden fast immer durch die Eigenschaften des Untergrunds und seiner Nutzung verursacht. Diese geologischen und geophysikalischen Gegebenheiten zu erfassen, geogene Prozesse zu interpretieren, Auswirkungen der Nutzung vorherzusagen, zu beobachten und diesbezüglich zu beraten, ist Kernaufgabe der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Sie berät die Bundesregierung in Bezug auf Georisiken und nachhaltiges Georessourcenmanagement. Die BGR aggregiert für die gesamte Landesfläche Deutschlands geologische, geophysikalische, bodenkundliche, hydrogeologische und weitere vergleichbare Geodaten (vgl. Abb. 1, BGR-Produktcenter, www.bgr.bund.de).

Anthropogene Ursachen für Oberflächendeformationen, die hier als Bodenbewegungen bezeichnet werden, sind Auswirkungen der Grundwasserbewirtschaftung,

Erdöl- und Erdgasförderung, Geothermie, Speicherung von Kohlenwasserstoffen sowie des (Alt-)Bergbaus und von Verpressungsmaßnahmen. Natürliche Prozesse wie Sedimentkompaktion, Gesteinsquellung und -schrumpungen, Torfschwund oder -aufwuchs, Hangbewegungen, Subrosion, Erdfälle und tektonische Aktivität können Lageveränderungen an der Erdoberfläche verursachen. Deformationen der Erdoberfläche bzw. Bodenbewegungen sind hier ausschließlich Bewegungen einer äußerlich unveränderten Erdoberfläche. Massenabträge oder -aufträge durch Baggerarbeiten oder Aufschüttungsmaßnahmen, Erosion, Denudation und Sedimentation werden nicht erfasst.

Gabriel et al. (1989) und Massonnet et al. (1993) zeigten, dass sich mit der satellitengestützten Radarinterferometrie Bodenbewegungen mit einer Präzision von wenigen cm bestimmen lassen. Ferretti et al. (1999, 2000) zeigten, dass sich mit der Permanent Scatterer Interferometrie (PSI) sehr langsame Bewegungsgeschwindigkeiten der Erdoberfläche mit einer Präzision von wenigen mm pro Jahr detektieren lassen. Die Einsatzfähigkeit und Genauigkeit der Satellitenradarinterferometrie ist durch nationale und internationale Forschungsprojekte wie z. B. GMES4Mining, TerraFirma, PanGeo, Lampre oder Subcoast vielfach nachgewiesen (Adam et al. 2009, Bateson 2011, Heleno et al. 2011, Commerci et al. 2015, Raspini et al. 2016). Mit den Daten der Radarsatelliten Sentinel-1A und -1B des europäischen Copernicus-Programms (www.copernicus.eu, Hoffmann und Schultze-Lieckfeld 2020) sind seit 2014 Radardaten öffentlich, kostenfrei, mit hoher zeitlicher Auflösung (6 Tage) und langfristig verlässlich verfügbar. Daher müssen für Deformationen der Erdoberfläche unabhängige, qualitätsgesicherte und allseits anerkannte Rahmenwerte, Entscheidungsgrundlagen und Prozessketten bereitgehalten werden. Zu diesem Zweck und um in Deutschland den hohen Informationsgehalt der Radardaten für Planungs- und Monitoringaufgaben und zur Gefährdungsanalyse in der

Praxis zu nutzen, betreibt die BGR den satellitengestützten nationalen BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD).

2 Zielsetzung

Nach ausführlichen Diskussionen mit den betroffenen Akteuren in Deutschland wurden von der BGR die nachfolgenden Anforderungen an den BBD kompiliert:

- Blattschnittfreie, konsistente, einheitliche und überregionale Auswertung und Darstellung der Radarsatellitendaten mit mittlerer Auflösung.
- Landes- und Kommunalbehörden können satellitengestützte Bodenbewegungsinformationen zur effizienten und optimierten Erledigung ihrer Aufgaben nutzen (Setzungen, Bau- und Bergaufsicht, Raumplanung, Gefahrenabwehr, Information der Bevölkerung, ...).
- Früherkennung der Gefährdung von Bevölkerung und Infrastruktur; Schadensbegrenzung, Risikominimierung.
- Terrestrische Vermessungen können auf zeitliche und räumliche Hot Spots konzentriert werden.
- Optimierung der Mittelpriorisierung zur Gefahrenabwehr und der Raumplanung.
- Beiträge zur Beweissicherung.
- Verbesserung der Zuordnung von Ursache und Wirkung bei Bodenbewegungen.
- Information der Bevölkerung.
- Initiierung detaillierterer Untersuchungen.
- Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel (Monitoring von Küstenabsenkung, Grundwasserabsenkungen und Torfschwund/Renaturierungserfolge).
- Beitrag zur Energiewende (Monitoring von Bodenbewegung durch Kavernenspeicher, Geothermie-Kraftwerke, Identifikation geeigneter Endlagerstandorte).

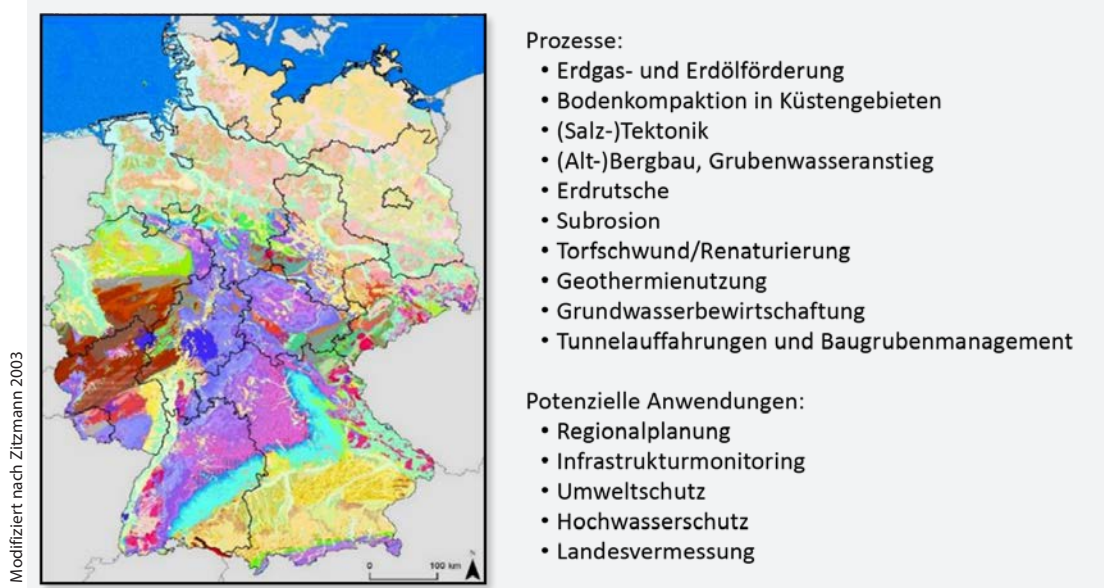


Abb. 1:
Geologische
Übersichtskarte
Deutschlands
1:1.000.000;
Prozesse, die Bodenbewegungen
verursachen.

3 Konzept

Den Anforderungen folgend wurde das Konzept des BBDs entwickelt (Kalia et al. 2014, 2017). Das Konzept besteht aus vier wesentlichen Elementen (siehe Abb. 2): Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten, Bodenbewegungsdaten und Produkten, einer Service-Plattform und Nutzern. Die blaue Ebene stellt das Basisprodukt des BBDs dar, die bundesweit von der BGR bereitgestellten Bodenbewegungsdaten und ihre Bereitstellung auf der Basis der SAR-Daten der

Ergänzend zu den Daten und Produkten des BBDs sind in der orangenen Ebene von der Industrie angebotene Zoom-Produkte im Konzept enthalten. Zoom-Produkte basieren auf räumlich und zeitlich 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.

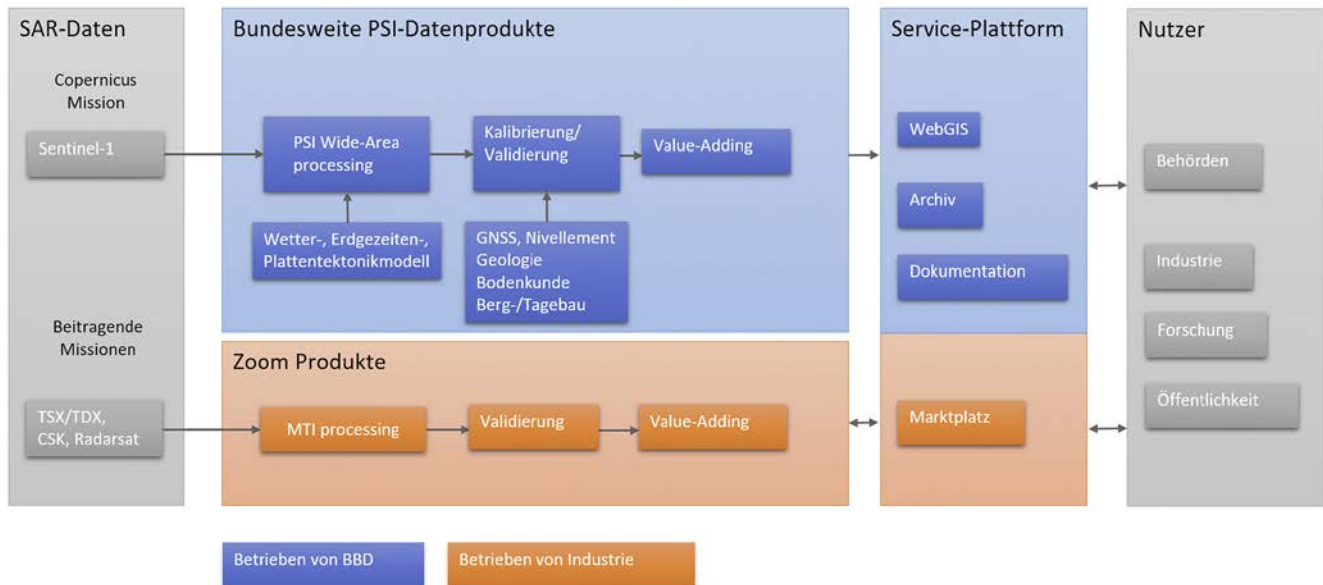


Abb. 2: Konzept des BBD

Copernicus Sentinel-1-Mission. Die orange Ebene bildet nutzergetriebene, anforderungsspezifische räumliche und/oder zeitliche Zoomprodukte unter Nutzung beitragender und/oder dritter Satellitenmissionen ab.

Die Sentinel-1 SAR-Mission ist besonders gut für einen nationalen Bodenbewegungsdienst geeignet, weil sie langfristig ausgerichtet ist und die Aufnahmeplanung für die Landoberfläche Europas eine vollständige Abdeckung mit hoher zeitlicher Auflösung (6 Tage Wiederholungsrate) vorsieht. So besteht eine hohe Verfügbarkeit für die gesamte Landesfläche. 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 × 5 m charakterisiert. Die Sentinel-1-Rohdaten werden, wie im blauen Bereich skizziert, mittels PSI-WAP-Prozessierung (Adam et al. 2011, 2013, Goel et al. 2016, Adam 2019) zu bundesweiten Bodenbewegungsdaten verarbeitet. Die Daten werden öffentlich über eine WebGIS-Anwendung innerhalb der Service-Plattform zur Verfügung gestellt. Es ist vorgesehen, neben den bundesweiten Datenprodukten auch regionale Produkte für spezielle Anwendungen bereitzustellen. Aufgrund der mittleren räumlichen Auflösung der Sentinel-1-IW-Daten liegt der primäre Anwendungsbereich auf regionaler Skala.

Im BBD sind für die gesamte Fläche der Bundesrepublik die radarinterferometrischen Bodenbewegungsdaten spezifiziert, kalibriert und validiert. Die blattschnittfreie deutschlandweite PSI-WAP-Darstellung basiert auf den Sentinel-1-Rohdaten unter Einbindung der GNSS-Informationen des Integrierten Geodätischen Referenznetzes Deutschlands (GREF, <https://gref.bkg.bund.de>) und der SAPOS®-Daten (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen, www.sapos.de). Sie ist mittels einer WebGIS-Anwendung kostenfrei zugänglich.

4 Umsetzung

4.1 Prozessierung und PSI-WAP-Ansatz

Die Synthetic Aperture Radar (SAR) Daten der Sentinel-1-Satelliten werden mittels der Persistent Scatterer Interferometry (PSI) verarbeitet. Bei dieser Technologie werden in einer Bildserie (synonym werden auch die Begriffe »Bildstapel« oder »Aufnahmestapel« verwendet) von Radaraufnahmen des gleichen Gebietes zu aufeinanderfolgenden Zeitpunkten eine große Zahl von kohärenten Objekten statistisch identifiziert (sog. Persistent Scatterer, PS).

Die Persistent Scatterer entsprechen an der Erdoberfläche vorhandenen künstlichen Objekten, wie z. B. Gebäuden, Hochspannungsmasten, Infrastruktur oder natürlichen, wie z. B. Gesteinen. Jeder PS wird durch einen über mehrere Jahre gemittelten Geschwindigkeitswert (ausgedrückt in mm/Jahr) und eine Zeitreihe der Bewegungen charakterisiert. Für jeden PS wird die Zeitreihe der Bewegungen von der ersten Sentinel-1-Aufnahme bis zur letzten ausgewerteten Sentinel-1-Aufnahme berechnet.

Aufgrund der Phasenmehrdeutigkeit werden die Entfernungsänderungen relativ zu einem als unbewegt angenommenen Referenzpunkt geschätzt. Bei den dargestellten Entfernungsänderungen handelt es sich aufgrund des SAR-Aufnahmeprinzips um eine eindimensionale Messung entlang der Sichtlinie des Satelliten (LOS, Line of Sight). Die LOS-Geometrie wird durch den Einfallswinkel und die von der Flugrichtung abhängige Blickrichtung des Satellitensensors beschrieben. Die Copernicus Sentinel-1-Satelliten

Differenzielle SAR-Interferometrie

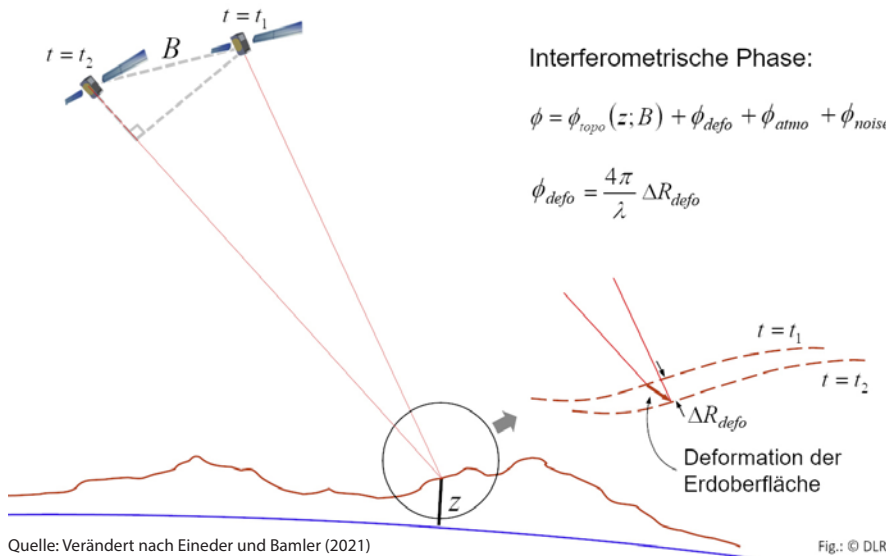


Abb. 3:

Prinzip der differentiellen SAR-Interferometrie. Die gemessene interferometrische Phase (ϕ) setzt sich aus mehreren Phasenteilen zusammen. Diese sind u. a. verursacht durch Topographie (ϕ_{topo}), Deformation (ϕ_{defo}), Atmosphäre (ϕ_{atmo}) und Rauschen (ϕ_{noise}).

Die BBD PSI-Daten basieren auf Zeitreihen von SAR-Aufnahmen des interferometric wide (IW) swath mode. Diese sind gekennzeichnet durch eine mittlere räumliche Auflösung von ca. 5 m × 20 m. Das Aufnahmeprinzip einer SAR-Aufnahme basiert auf der Abstrahlung monochromatischer elektromagnetischer Strahlung durch eine SAR-Antenne, Streuung bzw. Reflektion an der Erdoberfläche und Empfang des auf demselben Weg zurückgestreuten Teils der Strahlung. Die Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung liegt bei Sentinel-1 im C-Band des Mikrowellenbereichs des elektromagnetischen Spektrums und beträgt 5,6 cm. Im Rahmen einer interferometrischen Verarbeitung wird die Phase von zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen SAR-Aufnahmen überlagert (repeat pass Interferometrie). Das Ergebnis ist die interferometrische Phase, die – neben anderen Einflussgrößen (Geländetopographie, atmosphärische Eigenschaften, etc.) – eine Funktion der Entfernungsänderung zwischen Satelliten und Erdoberfläche ist (Gabriel et al. 1989, Massonnet et al. 1993, Eineder und Bamler 2021, Abb. 3). Durch eine statistische Auswertung der interferometrischen Phase einer Vielzahl von SAR-Aufnahmen, aufgenommen über einen Zeitraum von mehreren Jahren, wird die Entfernungsänderung, ausgedrückt als mittlere Geschwindigkeit und Bewegungszeitreihe, präzise geschätzt (Feretti et al. 2001, 2011, Goel et al. 2016, Parizzi et al. 2021).

umrunden die Erde auf einem polnahen Orbit, weshalb die Flugrichtung zum einen von ca. Nord nach Süd (descending/absteigender Orbit) und zum anderen von ca. Süd nach Nord (ascending/aufsteigender Orbit) ausgerichtet ist. Da die SAR-Antenne eine rechtsblickende Schrägsicht nutzt, wird die Erdoberfläche beim descending Orbit von ca. Ost nach West beobachtet, bzw. beim ascending Orbit von ca. West nach Ost. Aufgrund der LOS-Geometrie und insbesondere der Flugrichtungen sind PSI-Daten sensitiv für Deformationen der Erdoberfläche in vertikaler und in Ost-West-Richtung. Deformationen in Flugrichtung der SAR-Satelliten (d. h. ca. Nord-Süd-Richtung) können durch die LOS-Geometrie nicht detektiert werden. Zur weiteren Vertiefung in das Thema PSI eignen sich beispielsweise die vom BMWi geförderten Schulungsmaterialien des EO College (<https://eo-college.org>) oder Feretti et al. (2014).

4.2 Möglichkeiten und Grenzen des Ansatzes für ganz Deutschland

Die BBD PSI-Daten können zur Charakterisierung von Deformationen mit Geschwindigkeiten von ca. ± 2 mm pro Jahr bis zu einigen cm pro Jahr und einer räumlichen Ausdehnung von wenigen hundert Metern bis zu mehreren Zehner Kilometern genutzt werden. Ursachen für solche

Oberflächendeformationen sind beispielsweise (Alt-)Bergbau, Erdgasförderung und der Betrieb von Kavernenspeichern (vgl. Abb. 2). Je nach Ausprägung und Messpunktdichte können auch Gebäudesetzungen in setzungsempfindlichen Böden oder Hangrutschungen detektiert werden. Kleinstflächige Oberflächendeformationen wie z. B. Erdfälle oder Tagesbrüche können mit den BBD PSI-Daten in der Regel nicht detektiert werden. Sehr großflächige Oberflächendeformationen verursacht durch tektonische Prozesse können mit den BBD PSI-Daten, aufgrund der Ausdehnung und der geringen Deformationsrate, nur eingeschränkt detektiert werden. Bekannte großflächige Bewegungen wie die Erdbeben oder die plattentektonische Verschiebung Europas nach Nordosten sind rechnerisch korrigiert (Rodriguez Gonzalez et al. 2018).

In Gebieten mit Vegetationsbedeckung und über Wasserflächen erfolgt eine ständige Änderung der Oberflächengeometrie (Blätterrauschen, Wellen, etc.). Konsequenz ist ein inkohärentes Rückstreuverhalten der elektromagnetischen Wellen, sodass die interferometrische Phase wegen der temporalen Dekorrelation keine Information mehr beinhaltet. Bodenbewegungen können in diesen Gebieten nicht ermittelt werden. In bewegtem Terrain wie Gebirgen kommt es aufgrund der SAR-typischen Schrägsicht zu perspektivischen Bildverzerrungen (Layover, Radarschatten), die sich negativ auf die PS-Verteilung auswirken.

4.3 GNSS Kalibrierung

Basierend auf dem Koordinatenmonitoring der national verfügbaren GNSS-Referenzstationen des GREF-Netzwerks des Bundes und der SAPOS®-Daten der Länder wurden Koordinatenzeitreihen für die Kalibrierung und Validierung der BBD PSI-Datenprodukte genutzt. Hierzu waren Homogenisierungen der räumlichen Bezugssysteme und Zeitreihenanalysen notwendig (Brockmeyer et al. 2018, Brockmeyer 2019). Diese wurden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und vom Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) umgesetzt.

Für die Kalibrierung des ersten bundesweiten PSI-WAP-Datensatzes stellte das BKG die Daten von 40 GREF-Stationen zur Verfügung. Sechs der Stationen konnten nicht für die Kalibrierung verwendet werden, weil die Zeitserien Artefakte aufwiesen. Die Daten von neun ausgewählten Stationen wurden für die Validierung reserviert. Somit wurde das erste BBD PSI-Teilprodukt auf 25 GREF-Stationen kalibriert.

Die fünf Datensätze der aktuell verfügbaren BBD PSI-Produkte wurden auf 108 SAPOS-Stationen kalibriert und auf 122 Stationen validiert. Dazu wurden die Daten von 272 SAPOS-Stationen untersucht. 230 Stationen waren für die Verwendung im BBD qualifiziert (Brockmeyer et al. 2018, Brockmeyer 2019).

5 Der BBD WebDienst – Hintergründe und wichtigste Anforderungen

Inhalt der Webanwendung sind Punktdaten, die aus der PSI-Prozessierung von Sentinel-1 SAR-Daten stammen und die über Bodenbewegungen in Deutschland Auskunft geben. Die Attribute Versatz und Geschwindigkeit der Bewegung sind in Zeitreihen erfasst. Herausfordernd sind insbesondere die großen und weiter ansteigenden Datenmengen. Ein bundesweites BBD PSI LOS Datenprodukt hat aktuell z. B. mehr als 50 Millionen Messpunkte (verteilt über ganz Deutschland) mit jeweils ca. 200 Messzeitpunkten, die in den Zeitreihen hinterlegt sind. Ein aktuelles BBD PSI LOS Datenprodukt umfasst damit mehr als 10 Milliarden Dateneinträge. Die Bereitstellung von Ascending und Descending LOS-Datenprodukten führt zu einer Verdopplung der Datenmenge. Die Bereitstellung von zwei bewegungszerlegten Produkten (vertikale und Ost-West-Richtung) führt ebenfalls zu einem Anstieg der Datenmenge. Somit umfasst ein BBD PSI-Datenprodukt, bestehend aus vier Datenlayern (Ascending-/Descending LOS, vertikal und Ost-West), mehr als 25 Milliarden Dateneinträge.

Die sich aus dem Konzept und den massenhaften PSI-Daten des BBD ergebenden Anforderungen an die Webanwendung sind:

- performante und interaktive Visualisierung der BBD PSI-Datenprodukte, d. h. der Geschwindigkeit und der Zeitserien,
- dynamische Abfragen nach Geschwindigkeit und Kohärenz,
- Einbindung in lokale GIS über Download und Web-Map-Service,
- Überlagerung mit bundesweit verfügbaren thematischen Daten (z. B. (Hydro-)Geologie, Bodenkunde, Bergbau),
- jährliche Aktualisierung des bundesweiten Datenproduktes,
- Aktualisierung für einige Gebiete in Deutschland bis zu alle 6 Tage.

Um diese Anforderungen zu erfüllen wurde erstmals eine moderne BigData-Anwendung in der BGR-Geodateninfrastruktur umgesetzt. Diese basiert u. a. auf dem Spatio-temporal-BigData-Store und dem GeoAnalytics Server der Firma ESRI® (Kalia und Vienken 2019, Kalia et al. 2020). Bereits im BBD WebGIS umgesetzt ist die jährliche Aktualisierung der bundesweiten BBD Ascending-/Descending LOS-Datenprodukte, eine interaktive Visualisierung, dynamische Abfragen, der Download (max. 400 km², größere Gebiete auf Nachfrage) und die Überlagerung mit thematischen Daten. Die aktuellen Entwicklungen umfassen die Einbindung der bewegungszerlegten Layer und die Einrichtung eines Web-Map-Service. Die langfristige Entwicklung umfasst die Aktualisierung für einige Gebiete bis zu alle 6 Tage und ggf. die Einbindung der Datenprodukte des European Ground Motion Service (EGMS) (Crosetto et al. 2020). Damit können dann auch grenzüberschrei-

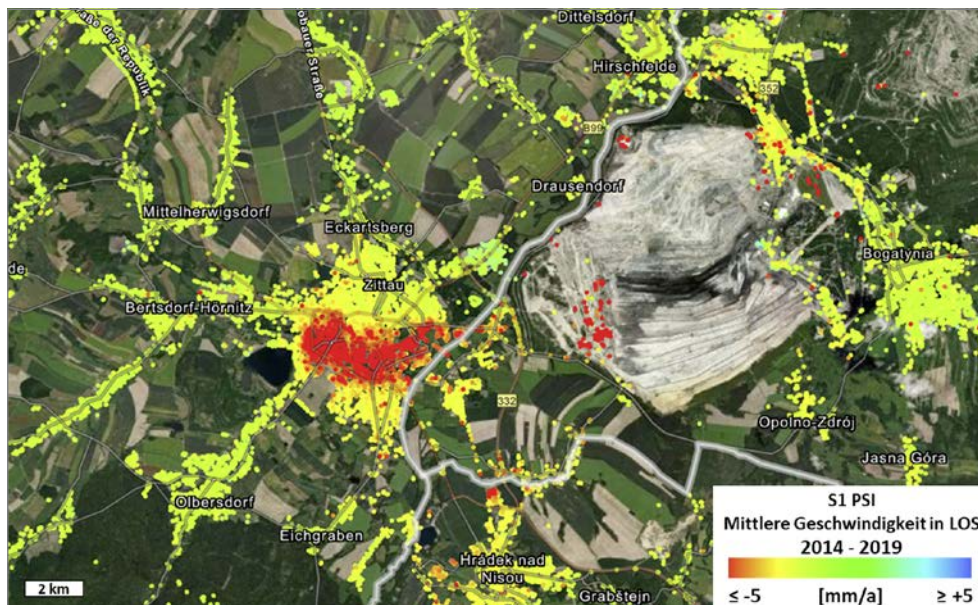


Abb. 4:
Subsidenz in der Region
Zittau verursacht durch
GW-Senkung für den
Tagebau Turow in Polen

tende Prozesse wie z. B. die in Zittau im Dreiländereck mit Polen und Tschechien beobachteten Bodensenkungen im Gesamtzusammenhang analysiert werden (Abb. 4).

Der BBD WebDienst ist unter <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de> abrufbar. Der Zugriff ist für interne und externe Nutzer (Öffentlichkeit, Politik, öffentliche Verwaltung, Forschung, Unternehmen) kostenfrei.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Umsetzung des Konzeptes des BBD wurden die ersten bundesweiten Sentinel-1 PSI-Datenprodukte erstellt. Der speziell für große Flächen optimierte PSI-Prozessor des DLR-IMF (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Methodik der Fernerkundung) und die bei der PSI-Prozessierung verwendeten Zusatzdaten (Rodriguez Gonzalez et al. 2018, Adam 2019) ermöglichten eine hohe Qualität der Bewegungsmessung. Diese wurde durch BGR-interne Studien und begleitende Pilotstudien (u. a. durch die Staatlichen Geologischen Dienste, Landesbergämter, Landesvermessungsämter) wiederholt bestätigt.

Um das Sentinel-1 PSI-Datenprodukt für eine breite Öffentlichkeit nutzbar zu machen, wurde die BBD WebGIS-Anwendung erstellt und veröffentlicht. Eine Anforderung an die BBD WebGIS-Anwendung war die performante interaktive Visualisierung der massenhaften PSI-Daten. Dazu wurde erstmals BigData WebGIS-Technologie in der Geodateninfrastruktur der BGR verwendet. Werkzeuge für die explorative Datenanalyse, zusätzliche bundesweite Datenebenen (z. B. bzgl. Geologie, Bergbau, Bodenkunde), Nutzungshinweise, Download- und ein Web-Map-Service sowie die Verknüpfung in Datenrepositorien (z. B. GDI-DE/Geoportal.de, GEOSS/Geoportal.org) runten die BBD WebGIS-Anwendung ab. Sowohl das Senti-

nel-1 PSI-Datenprodukt als auch die WebGIS-Anwendung werden jährlich aktualisiert.

Durch die Implementierung des BBD werden die Bodenbewegungsinformationen aus satellitengestützter SAR-Interferometrie ihr breites Nutzungsspektrum weiter entfalten (vgl. z. B. Lege et al. 2019, Rieken et al. 2019, Bettzieche 2020, Brockmeyer et al. 2020). Die Konzepte des BBD und des europäischen Bodenbewegungsdienstes EGMS (Crosetto et al. 2020), im Sinne einer Basisinformation, werden von deutschen und europäischen Nutzergruppen unterstützt. Anzumerken ist, dass für viele Anwendungen – insbesondere für das Infrastrukturmonitoring – räumlich und/oder zeitlich sehr hoch aufgelöste und speziell auf die jeweilige Aufgabenstellung angepasste »Zoom-Produkte« benötigt werden.

Die zukünftigen Entwicklungen des BBD umfassen Studien neuartiger Prozessierungsalgorithmen (z. B. Ansari et al. 2018) bzgl. des bundesweiten Datenprodukts, höhere Aktualisierungsraten für bestimmte Gebiete, die semi-automatisierte Informationsextraktion aus den PSI-Datenprodukten und den Ausbau der BBD WebGIS-Anwendung.

Literatur

- Adam, N. (2019): Methodology of a Troposphere Effect Mitigation Processor for SAR Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12 (12), 5334–5344. IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2957919.
- Adam, N., Parizzi, A., Eineder, M., Crosetto, M. (2009): Practical persistent scatterer processing validation in the course of the TerraFirma project. *Journal of Applied Geophysics*, 69, 59–65.
- Adam, N., Gonzalez, F.R., Parizzi, A., Liebhart, W. (2011): Wide area persistent scatterer interferometry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, BC, 2011, 1481–1484. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049347.

- Adam, N., Rodriguez Gonzalez, F., Parizzi, A., Brcic, R. (2013): Wide Area Persistent Scatterer Interferometry: Current Developments, algorithms and Examples. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1–4. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IGARSS 2013, 22.–26. July 2013, Melbourne, Australia.
- Ansari, H., De Zan, F., Bamler, R. (2018): Efficient Phase Estimation for Interferogram Stacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56 (7), 4109–4125. IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2826045.
- Bateson, L. (2011): GMES-service for assessing and monitoring subsidence hazards in coastal lowland areas around Europe. British Geological Survey, 97 pages. (OR/11/068) (unpublished). <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/16186/>, accessed on 07.04.2021.
- Bettzieche, V. (2020) Satellitenüberwachung der Verformungen von Staumauern und Staudämmen. *WasserWirtschaft*, Heft 9.
- Brockmeyer, M. (2019): Daten der Landesvermessung zur räumlichen Interpolation von Bodenbewegungen. *GeoMonitoring* 2019, 151–163. DOI: 10.15488/4519.
- Brockmeyer, M., Pape, W., Jahn, C.-H. (2018): Prozessierung von GNSS Stationsgeschwindigkeiten und Zeitreihen basierend auf RINEX Daten permanenter SAPOS Referenzstationen. Prozessierungsbericht des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), 60 Seiten, unveröffentlicht.
- Brockmeyer, M., Schnack, C., Jahn, C.-H. (2020): Datenanalyse und flächenhafte Modellierung der PSI-Informationen des BodenBewegungsdienst Deutschlands für die Landesfläche Niedersachsens. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 3/2020, 145. Jg., 154–167. DOI: 10.12902/zfv-0300-2020.
- Comerci, V., Vittori, E., Cipolloni, C., et al. (2015): Geohazards Monitoring in Roma from InSAR and In Situ Data: Outcomes of the PanGeo Project. *Pure Appl. Geophys.* 172, 2997–3028. DOI: 10.1007/s00024-015-1066-1.
- Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A. (2020): Ground deformation monitoring at continental scale: the European Ground Motion Service. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B3-2020, 293–298. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-293-2020.
- Eineder, M., Bamler, R. (2021): Module 2201: SAR Interferometry Basics. https://eo-college.org/resource/insar_basics/, accessed on 07.04.2021.
- Ferretti, A. (2014): Satellite InSAR Data, Reservoir Monitoring from Space. Publisher, EAGE Publications bv, The Netherlands.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience und Remote Sensing*, 39, 8–20.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks, SqueeSAR. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 49, 3460–3470.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., Zebker, H. A. (1989): Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 94, 9183–9191.
- Goel, K., Adam, N. A., Shau, R., Rodriguez-Gonzalez, F. (2016): Improving the reference network in wide-area Persistent Scatterer Interferometry for non-urban areas. *Proceedings of IGARSS 2016*, 1448–1451. IEEE Xplore. IGARSS 2016, 10–15 July 2016, Beijing, China. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729370.
- Heleno, S. I. N., Oliveira, L. G. S., Henriques, M. J., Falcão, A. P., Lima, J. N. P., Cooksley, G., Ferretti, A., Fonseca, A. M., Lobo-Ferreira, J. P., Fonseca, J. F. B. D. (2011): Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, Issue 8, 2152–2167, ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.021.
- Hoffmann, J., Schultz-Lieckfeld, L. (2020): Das Europäische Copernicus-Programm. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2020, 145. Jg., 246–253. DOI: 10.12902/zfv-0298-2020.
- Kalia, A. C., Frei, M., Lege, T. (2014): Preparation of a national Copernicus service for detection and monitoring of land subsidence and mass movements in the context of remote sensing assisted hazard mitigation. *Earth Resources und Environmental Remote Sensing/ GIS Applications V*, Proceedings of SPIE, Vol. 9245, Amsterdam, 6 pages.
- Kalia, A. C., Frei, M., Lege, T. (2017): A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 202, 234–249, ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.015.
- Kalia, A. C., Vienken, S. (2019): Big geospatial data: identifying hazards with GIS technology. Vortrag auf der Konferenz Big.Data.AI Summit am 10.4.2019 in Berlin.
- Kalia, A. C., Frei, M., Kamping, H., Langos, T., Wodtke, T., Lege, T. (2020): Erdbeobachtung in der Praxis – Aktuelles aus dem BodenBewegungsdienst Deutschland. Vortrag auf der Konferenz EsriKon am 3.3.2020 in Bonn.
- Lege, T., Kalia, A. C., Adam, N. (2019): Application of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Indicates a Significant Sediment Sink for the Ems Estuary. *Coastal Structures 2019*, 793–802. Bundesanstalt für Wasserbau. DOI: 10.18451/978-3-939230-64-9_079.
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., Rabaute, T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* 364, 138–142.
- Parizzi, A., Brcic, R., De Zan, F. (2021): InSAR Performance For Large Scale Deformation Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1–11. IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3039006.
- Raspini, F., Bianchini, S., Moretti, S. et al. (2016): Advanced interpretation of interferometric SAR data to detect, monitor and model ground subsidence: outcomes from the ESA-GMES TerraFirma project. *Nat Hazards* 83, 155–181. DOI: 10.1007/s11069-016-2341-x.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 6/2019, 144. Jg., 254–361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Rodriguez Gonzalez, F., Parizzi, A., Brcic, R. (2018): Evaluating the impact of geodetic corrections on interferometric deformation measurements. *Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR*, 377–381. VDE Verlag GmbH. EUSAR 2018, 4.–7. June 2018, Aachen, Germany. ISBN 978-3-8007-4636-1. ISSN 2197-4403.
- Zitzmann, A. (2003): Die Geologische Übersichtskarte 1:200 000 – von der Karte bis zur Sachdatenbank. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Band 154/1, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart, 121–139.

Kontakt

Andre C. Kalia | Dr. Michaela Frei | Dr.-Ing. Thomas Lege
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2, 30655 Hannover
andre.kalia@bgr.de | michaela.frei@bgr.de | thomas.lege@bgr.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.