Landesweite, radarinterferometrische Bodenbewegungserfassung auf Grundlage von Sentinel-1-Daten – Verfahrensweise und Ergebnisse am Beispiel des Saarlandes

Dipl.-Geoinf. Thomas Engel & Prof. Dr. Wolfgang Busch

Die im Rahmen des europäischen Copernicus Programm kostenfrei erhältlichen Daten der Sentinel-1 Mission bieten den Fachbehörden der Bundesländer eine kostengünstige Möglichkeit, für die gesamte Landesfläche einen Überblick über die Bodenbewegungen zu erhalten und in Ergänzung ihrer Grundlagendaten diese Bodenbewegungsdaten anderen Fachbehörden in den Bundesländern für unterschiedliche Nutzungszwecke anzubieten. So hat das durch u. a. den untertägigen Steinkohlenbergbau geprägte Saarland durch die Abteilung Markscheidewesen und Geoinformation des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal ein Konzept zur landesweiten, radarinterferometrischen Auswertung verfügbarer Sentinel-1 Daten entwickeln und eine entsprechende Auswertung durchführen lassen.

In diesem Beitrag werden das Konzept und Ergebnisse dieser Auswertungen vorgestellt. Da das Saarland eine Ausdehnung von ca. 76 km x 60 km besitzt, erfolgte die radarinterferometrische PSI-Auswertung über vier gleichgroße und sich überlappende Teilgebiete mit einer Ausdehnung von jeweils 45 km x 38 km in einer klassischen Single-Referenz-Stack-Prozessierung. Besonderer Wert wurde auf die Qualitätsprüfung der erzielten PSI-Ergebnisse gelegt. Hierfür kam ein mehrstufiges Datenprüfkonzept zum Einsatz und für die Ableitung von Genauigkeitsmaßen die Ermittlung bestangepasster Trendpolynome für jede PSI-Zeitreihe.

1. Einleitung

Dem Monitoring von Bodenbewegungen und insbesondere Höhenänderungen (vertikale Komponente einer Bodenbewegung) kommt für verschiedene Aufgabenstellungen gerade für ein bergbaubeeinflusstes Land, wie dem Saarland, große Bedeutung zu.

Für das Land, Städte und Gemeinden können solche Daten als wertvolle und kostensenkende Grundlage z. B. für die Planung von Infrastrukturmaßnahmen dienen.

Aufbauend auf den Entwicklungen und Erfahrungen in vielfältigen F&E-Vorhaben über das großräumige Monitoring von Höhenänderungen mit Methoden der satellitengestützten Radarinterferometrie unterstützte das Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) die beteiligten Behörden des Saarlandes, das Ministerium für Umwelt und

Verbraucherschutz (MUV), das Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung (LVGL) sowie das Oberbergamt, bei der Einführung der satellitengestützten Radarinterferometrie als neue Informationsquelle in der Landesvermessung. Grundlage hierfür sind die kostenfrei erhältlichen Daten der europäischen Radarsatelliten Sentinel-1. Zur landesweiten Ermittlung vertikaler Bodenbewegungen wurde die Methode der Persistent Scatterer Interferometry (PSI) genutzt.

2. Datengrundlage

Für die radarinterferometrische Auswertung wurden die im Rahmen des europäischen Copernicus Programm kostenfrei erhältlichen Daten der Sentinel-1 Mission genutzt. Der Sensor Sentinel-1A zeichnet seit Herbst 2014 mit einem Wiederholzyklus von 12 Tagen auf und ist seit Herbst 2016 durch den baugleichen Sensor Sentinel-1B ergänzt worden (Abbildung 2). Hierdurch und wegen der Orbitkonfiguration lässt sich der auswertbare Wiederholzyklus auf 6 Tage reduzieren. Zudem werden die Satellitenbahnen in einem sehr kleinen Bereich mit einen Radius von ca. 50 m gehalten (European Space Agency 2013), wodurch sehr kleine räumliche Basislinien entstehen. Diese sind vorteilhaft für eine interferometrische Auswertung zur Bestimmung von Bodenbewegungen.

Für interferometrische Auswertungen werden Daten im sogenannten Interferometric Wide Swath Mode (IW) genutzt. Durch diesen ist es erstmalig möglich, die Erdoberfläche über sehr große Gebiete von etwa 250 km x 250 km abzutasten. Eine komplette Radarszene besteht dabei aus drei Teilstreifen (Subswaths), welche wiederum in einzelne Bursts (Aufzeichnungspakete der jeweiligen Antennenauslenkung in Azimut, d. h. der Flugrichtung) unterteilt sind (Abbildung 1).

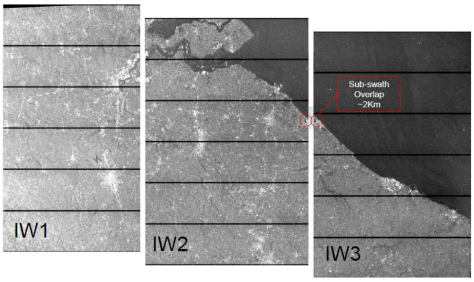

Abbildung 1: Aufbau der Sentinel-1-Daten in Subswath und Burst mit minimaler Überlappung (Bildquelle: European Space Agency 2013).

Die Aufnahmestrategie der Europäischen Weltraumagentur (ESA) sieht für die beiden Satelliten eine möglichst lückenlose sowie vollflächige Aufzeichnung in Europa vor und das sowohl für den aufsteigenden Orbit (ascending, von Süden nach Norden) als auch für den absteigenden Orbit (descending, von Norden nach Süden). Da die Orbitumrundungen der Satelliten

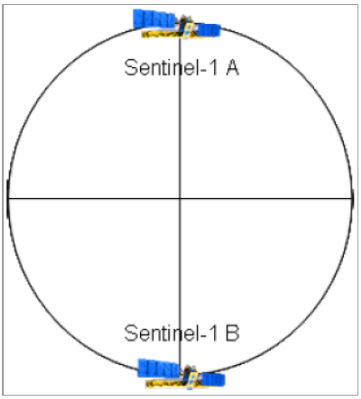

Abbildung 2: Sentinel-1 Orbitkonstellation (Bildquelle: European Space Agency 2013).

(Tracks) sich in unseren Breiten auf etwa 2/3 ihrer Fläche überlappen, ergibt sich für jedes mögliche Untersuchungsgebiet die Auswahlmöglichkeit aus zwei bzw. vier Sentinel-1 SLC Produkten (jeweils ein oder zwei auf ascending und descending Satellitentracks) im zeitlichen Abstand von 6 Tagen (Abbildung 3). Die Tracks lassen sich anhand ihrer relativen durchnummerierten Orbitnummer unterscheiden.

Tabelle 1: Eigenschaften des Radarsatelliten Sentinel-1.

Produkt	Interferometric Wide Swath (IW)	
rel. Orbit-Nr.	88	139
Streifenbreite	250 km	
Flugrichtung	Ascending	Descending
Polarisation	VV + VH	
Einfallswinkel	29° - 41°	
Auflösung Slant-Range Azimut	 ≈ 5 m ≈ 20 m	
Wiederholzyklus	12 Tage (6 Tage mit Sentinel-1B)	
Frequenzband	C-Band (5,405 GHz)	

Mit einer Abdeckung für das gesamte Saarland stehen aus einem absteigenden Orbit (Relative Orbit-Nr. 139) wie auch aus einem aufsteigenden Orbit (Relative Orbit-Nr. 88) Daten zur Verfügung. Somit bietet die Sentinel-1-Mission grundsätzlich die Möglichkeit zweier getrennter PSI-Auswertungen der Ascending- und der Descending-Daten, wodurch sich u. a. zusätzli-

che Kontroll- und Überprüfungsmöglichkeiten ergeben. Aber auch blickrichtungsabhängige Bewegungen (z. B. Hangrutschungen) können besser detektiert werden. Die grundsätzlichen Vorteile einer zweiten unabhängigen Messung sind jedoch im Hinblick auf Anforderungen und finanziellen Mehraufwand abzuwägen. Aus wirtschaftlichen Gründen wurden zunächst nur die Daten einer Blickrichtung ausgewertet. Aufgrund der besseren zeitlichen Abdeckung (weniger zeitliche sowie räumliche Datenlücken) wurden für eine erste radarinterferometrische Auswertung die Daten des Tracks 88 genutzt.

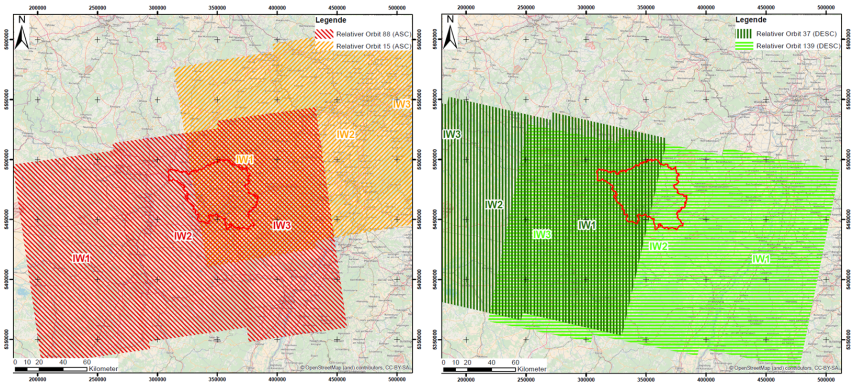

Abbildung 3: Räumliche Abdeckung der Sentinel-1 Szenen im Saarland (links: Ascending-Tracks, rechts: Descending-Tracks).

3. Radarinterferometrisches Auswertekonzept

Als radarinterferometrisches Auswerteverfahren wurde die Methode der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) gewählt. Die PSI-Methode ist ein punktbasiertes Auswerteverfahren zur Bestimmung von Zeitreihen von Abstandsänderungen in Blickrichtung (LOS) des Satelliten.

Aus den Zeitreihen der Abstandsänderungen in Blickrichtung (LOS), die sich auf einen gewählten Referenzzeitpunkt (Referenzszene) und einen Referenzpunkt beziehen, lassen sich unter bestimmten Annahmen Zeitreihen von Höhenänderungen ableiten, die damit auch mit Ergebnissen geodätischer Messungen vergleichbar sind.

Die vielfältigen und langjährigen Erfahrungen des IGMC mit PSI-Auswertungen haben gezeigt, dass das Messrauschen mit zunehmendem Abstand zum Referenzpunkt zunimmt. Dies spiegelt sich im entfernungsabhängigen Anstieg der Standardabweichung (Maß für die Streuung) wieder. Aufgrund dieser Erfahrungswerte wird eine maximale Ausdehnung eines zu untersuchenden Gebietes von etwa 40 km x 40 km empfohlen.

Da das Saarland eine Ausdehnung von ca. 76 km x 60 km besitzt erfolgte die radarinterferometrische Auswertung über vier gleichgroße und sich überlappende Teilgebiete mit einer

Ausdehnung von 45 km x 38 km in einer klassischen Single-Referenz-Stack-Prozessierung (Abbildung 4). Durch eine solche segmentweise Auswertung lassen sich vor allem höhere Punktdichten erzielen und mögliche systematische Fehler verringern. Der höhere Auswerteaufwand lässt sich ferner auch dadurch rechtfertigen, da sich die in den Überlappungsbereichen doppelt vorliegenden und unabhängig erzielten Auswerteergebnisse für eine Ergebnisüberprüfung (und auch Genauigkeitssteigerung) nutzen lassen.

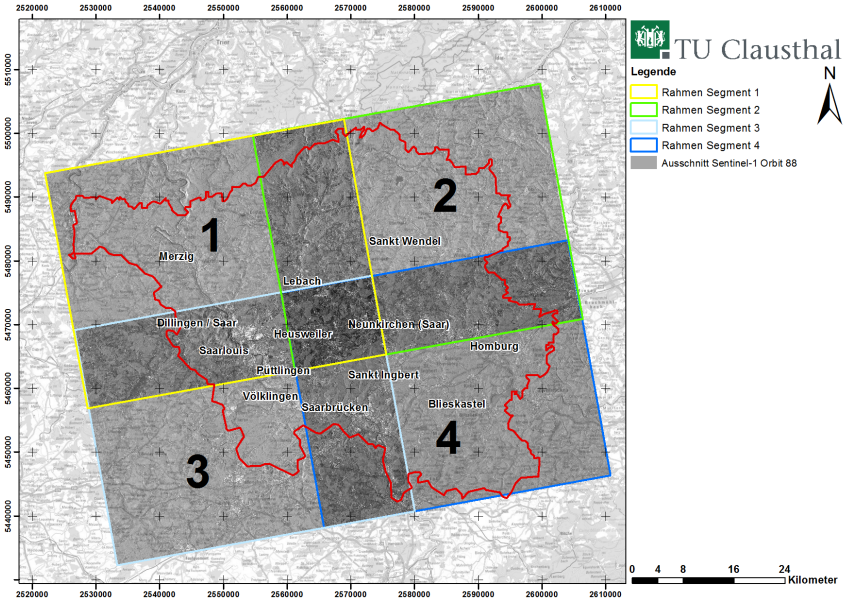

Abbildung 4: Aufteilung des Saarlandes in vier gleichgroße und sich überlappende Segmente (Überlappungsbereiche dunkelgrau) (© GeoBasis-DE/BKG 2016).

Die segmentweise Auswertung erfolgte mit 51 Radaraufnahmen des Sentinel-1A-Sensors im Zeitraum 11/2014 bis 08/2016.

4. Qualitätsmanagement

Die Ergebnisse der PSI-Auswertung sollten unbedingt vor einer weiteren Nutzung auf ihre Richtigkeit und Plausibilität geprüft werden, um auch geodätischen Qualitätsansprüchen zu genügen. Die Genauigkeit radarinterferometrischer Ergebnisse ist u. a. abhängig von der Qualität und Anzahl der Radardaten, den charakteristischen Merkmalen des Untersuchungsraums (wie z. B. der Flächennutzung), den im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Bodenbewegungen (Bewegungsraten, Bewegungsrichtung, räumliche Ausdehnung), metrologischen Einflüssen und dem gewählten Auswerteansatz. So spielen bei der PSI-Methode beispielsweise auch

die Entfernung der PS-Punkte zu einem gewählten Referenzpunkt und die PS-Punktdichte eine zusätzlich Rolle.

Als Ergebnis einer PSI-Auswertung erhält man für jeden PS-Punkt den zeitlichen Bewegungsverlauf in LOS-Richtung zwischen der ersten und der letzten Aufnahme eines Stapels von Radardaten. Jede dieser punktbezogenen Zeitreihen setzt sich aus einer Trendkomponente sowie stochastischen Schwankungen zusammen. Letztere ergeben sich durch autoregressive Prozesse (Signalschwankungen, deren Ursachen zunächst unbekannt sind), systematische und grobe Messfehler sowie zufällige Fehler. Zufällige Fehler werden durch das Messrauschen verursacht. Aus Ihnen lässt sich die innere Messgenauigkeit ableiten.

Systematische Fehler werden z. B. durch atmosphärische und topographische Einflüsse verursacht. Grobe Messfehler, wie z. B. Phasenabwicklungsfehler, können durch Modellfehler bei der PSI-Regressionsanalyse oder bei Überschreitung der maximalen Bewegungsraten entstehen. Einige systematische Messfehler können aufgrund der Auswertung langer Zeitreihen mit der PSI-Methode ermittelt und weitestgehend korrigiert werden.

Das IGMC hat ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, um anhand entscheidender Kriterien die ausgewerteten PS-Punkte im Rahmen eines Post-Processings auf grobe Messfehler (Ausreißer) zu überprüfen und grob fehlerhafte PSI-Zeitreihen bzw. PS-Punkte aus den Ergebnisdatensätzen der PSI-Auswertungen zu eliminieren. Dieses beinhaltet die folgenden Punkte:

- Detektion von PS-Punkten mit höheren Standardabweichungen für eine Beobachtung in LOS (oberhalb der 1 %-Grenze) nach einer Trendermittlung mit einem bestangepassten Polynommodell für jede PSI-Zeitreihe (Busch & Linke 2014),
- Überprüfung der räumlichen Ähnlichkeit der Ergebnisse, d. h. Bewegungen bzw. Bewegungsraten benachbarter PS-Punkte, anhand einer Clusteranalyse nach dem von Xi (2017) vorgestellten Verfahren und einem Clusterradius von z. B. 200 m,
- Manuelle Detektion von Ausreißern anhand einer Plausibilitätsprüfung unter Einbeziehung von Kenntnissen (zusätzlicher Fachdaten) über den Untersuchungsraum und das Bewegungsfeld sowie der fachlichen Expertise der Mitarbeiter.

4.1. Detektion grob fehlerhafter PS-Punkte anhand der Standardabweichung der Gewichtseinheit

Durch das PSI-Auswerteverfahren werden zunächst lineare Bewegungsraten in LOS (mm/a) abgeleitet. Ein solches Ergebnis eines der PSI-Auswertung zugrundeliegenden linearen Regressionsmodells beschreibt jedoch in vielen Fällen nicht genau genug den tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Bodenbewegungen. Hier bietet ein allgemeines Polynommodell deutliche Verbesserungen, da in der Praxis Bodenbewegungen in Abhängigkeit von der zeitlichen Variabilität ihrer Ursachen häufig nichtlinear ab- oder zunehmen. Daher ist die Ermittlung des optimalen Polynomgrades zur Beschreibung des zeitlichen Bodenbewegungstrends von großer Bedeutung. Zur automatisierten Ermittlung eines bestangepassten Polynom-Trendmodells für die massenweise vorliegenden PSI-Zeitreihen ist deshalb vom IGMC ein Programm entwickelt worden.

Bei Bodenbewegungen, die durch verschiedene geogene und anthropogene Ursachen hervorgerufen werden, können in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum zeitlich sowohl lineare Bodenbewegungstrends auftreten als auch Trends, die besser mit einem Polynom höherer Ordnung als 1 (= Gerade) beschrieben werden. Beispiele hierfür sind das nichtlineare Senkungsverhalten nach z. B. Einstellung bergbaulicher Aktivitäten oder die Umkehr des Senkungstrends in einen Hebungstrend z. B. infolge der Einstellung der Grubenwasserhaltung.

Ziel dieser durchgeführten Entwicklung war es deshalb, automatisiert für jeden der im Rahmen einer PSI-Auswertung erhaltenen PS-Punkte aus der Zeitreihe seiner Bewegungen in LOS-Richtung oder daraus abgeleiteten Höhenänderungen den Polynomgrad für die statistisch optimale Anpassung zu ermitteln. Hierzu wurde auf das bewährte Modell orthogonaler Polynome zurückgegriffen und zur Parameterschätzung die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Einzelheiten zur Theorie sowie der softwaretechnischen Umsetzung sind der Veröffentlichung Busch & Linke (2014) zu entnehmen. Das Ergebnis einer solchen Trendmodellierung ist exemplarisch für eine Zeitreihe von Höhenänderungen in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 5).

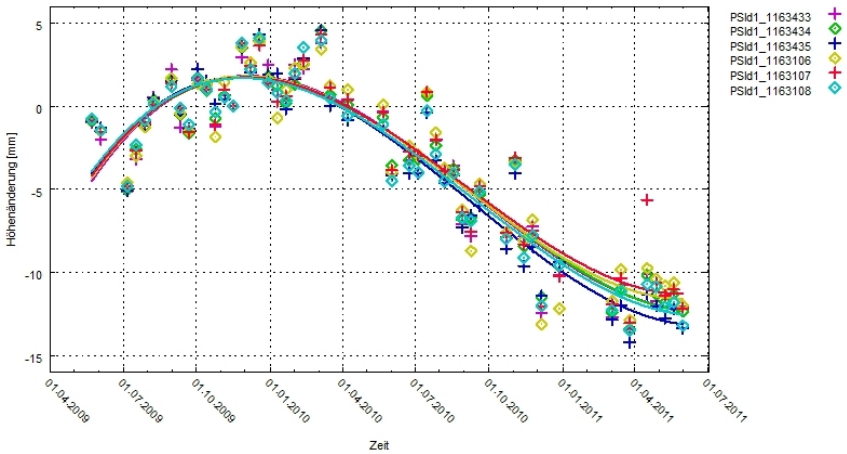

Abbildung 5: Ausgleichende Trend-Polynome 3. Grades für ausgewählte PS-Punkte und deren Höhenänderungen (Busch & Linke 2014).

Neben der graphischen Darstellung des Polynoms erhält man die folgenden weiteren Ergebnisse:

- den Polynomgrad, die Polynomkoeffizienten und ihre Standardabweichung,
- die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 der einzelnen Beobachtungen (z. B. LOS-Bewegung oder Höhenänderung),
- im Falle eines linearen Polynoms die Bewegungsrate (in LOS oder Höhenänderungsrate) in mm/a und ihre Standardabweichung,
- die Verbesserungen $\mathbf{v}$.

Aus diesen Ergebnissen ist es nun möglich, die Qualität der Daten zu beurteilen. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit s_0 repräsentiert die Standardabweichung eines einzelnen, mit der PSI-Methode ermittelten Beobachtungswertes (Standardabweichung der Gewichtseinheit). Diese ist u. a. vom jeweiligen Radarsensor abhängig.

PS-Punkte mit einer hohen Standardabweichung der Gewichtseinheit zeigen im Sinne der Statistik ein großes Rauschen der Messung in einer Zeitreihe an. Die Ursache hierfür kann sehr unterschiedlich sein, wie zum Beispiel über die Zeit stark veränderliche Rückstreueigenschaften aufgrund von Baumaßnahmen, starke Eigenbewegungen der rückstreuenden Objekte (Strommasten, Verkehrszeichen, Leitplanken) oder auch starke atmosphärische Einflüsse, wodurch solche Punkte als nicht repräsentativ für die Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen interpretiert werden können.

Um solche, für die Ableitung von Bodenbewegungen nicht repräsentative („grob fehlerhafte") PS-Punkte zu detektieren und dadurch die Qualität sowie die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu verbessern, erfolgt eine Filterung. Als Schwellenwert wird hierfür die 2-fache Standardabweichung um den Mittelwert herum (2σ-Signifikanzbereich) eingeführt.

Der Mittelwert der Standardabweichung einer LOS-Beobachtung betrug in der Auswertung der Sentinel-1 Daten in den vier Segmenten 3,8 mm mit einer 2σ-Signifikanzgrenze von 5,25 mm, welches etwa 1 % der PS-Punkte betrifft, die aus den PSI-Ergebnis entfernt wurden.

4.2. Überprüfung der räumlichen Ähnlichkeit benachbarter PS-Punkte anhand einer Clusteranalyse

Aufgrund verschiedener Ursachen können die ermittelten PSI-LOS-Bewegungszeitreihen an einzelnen PS-Punkten vom erwarteten flächenhaften Bodenbewegungsverhalten abweichen. Zur Detektion solcher „Ausreißer" wurde am IGMC ein Ansatz der Clusteranalyse basierend auf dem Verfahren „Local Moran's I" entwickelt (Xi 2017). Hierbei wird die räumliche Beziehung der PS-Punkte mit berücksichtigt. Der Grundgedanke ist dabei, das beim Auftreten von flächenhaften Bodenbewegungen alle eine deformierte Fläche repräsentierenden Punkte in ihrem räumlichen Umfeld eine ähnliche Höhenänderung (oder allgemein ähnliche Werte eines anderen Merkmals) aufweisen. Einzelne Punkte mit davon stark abweichendem Bewegungsverhalten können entweder auf ein objektspezifisches Bewegungsverhalten hinweisen (und sind damit nicht repräsentativ für die zu detektierenden flächenhafte Bodenbewegung) oder sind Ausdruck verfahrenstechnisch bedingter grober Abweichungen. Somit können so detektierte Punkte, als nicht repräsentativ für Bodenbewegungen oder als messtechnisch grob fehlerhaft angenommen, eliminiert werden.

4.3. Manuelle Detektion von Ausreißern anhand einer Plausibilitätsprüfung

Während die beiden erstgenannten Verfahren automatisiert anwendbar sind, erfordert die manuelle Fehlerdetektion zusätzliche Kenntnis über das Auftreten systematischer Fehler, Be-

wegungsursachen und -intensität sowie Arbeitszeit und vor allem fachliche Expertise der Mitarbeiter. Beispiele hierfür sind:

- Definition von Aussparungsbereichen mit horizontalen Bewegungen, in denen es durch Umrechnung der LOS-Bewegungen in Höhenänderungen zu einer Unter- oder Überschätzung abgeleiteter Höhenänderungen kommen kann,
- Untersuchung von Gebieten mit großen Hebungs- oder Senkungsgeschwindigkeiten, da es durch sie zu Phase Unwrapping-Fehlern und damit zu einer Unter- oder Überschätzung der LOS-Werteänderungen bzw. der abgeleiteten Höhenänderungen kommen kann,
- Vergleichende Prüfung von radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen im Umfeld von Nivellementspunkten und nivellitisch bestimmten Höhenänderungen,
- Vergleichende Prüfung der unabhängig ermittelten LOS-Bewegungen bzw. Höhenänderungen in den Überlappungsbereichen der segmentweisen Auswertegebiete.

4.4. Vergleich der PSI-Ergebnisse in Überlappungsbereichen

Durch die Aufteilung des Saarlandes in Segmente mit einer räumlichen Überlappung wird ein direkter Vergleich von unabhängig prozessierten PSI-Ergebnissen für die überlappenden Bereiche möglich.

Im Gegensatz zu geodätischen Messungen mit eindeutig markierten (vermarkten) Punkten werden bei einer PSI-Auswertung nach bestimmten Kriterien und Auswertemodellen permanent rückstreuende (reale) Objekte „zufällig“ definiert. Somit besitzt ein solcher PS-Punkt auch eine „zufällig“ ermittelte Position. Selbst wenn (theoretisch) das physikalisch rückstreuende Objekt in verschiedenen Auswertungen dasselbe wäre, würden sich die Lagekoordinaten des diesem Objekt entsprechenden PS-Punktes (der verschiedenen Auswertungen) unterscheiden (Engel & Busch 2015). Um die Ergebnisse unterschiedlicher PSI-Auswertungen miteinander vergleichen zu können, müssen deshalb zunächst homologe Persistent Scatterer Punkte aus den unterschiedlichen Auswertungen gefunden werden.

Zur Detektion von homologen Punkten aus jeweils zwei unterschiedlichen und sich räumlich überlappenden PSI-Auswertungen wurde am IGMC ein Programm entwickelt und getestet. Als Ansatz dient ein bekannter Algorithmus zur passpunktlosen Verknüpfung von Punktwolken (Besl & Mc Kay 1992). Der sogenannte Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) schätzt für eine Quellpunktwolke Q (Quelle, m Punkte) Transformationsparameter, so dass die Abstände zu allen Punkten aus einer Zielpunktwolke Z (Ziel, n Punkte) minimal sind und Q optimal Z abbildet. Das entwickelte Verfahren arbeitet iterativ und wird solange durchgeführt, bis das Minimum der mittleren Abstände (Restklaffungen) oder ein Maximum der Anzahl an Iterationsschritten erreicht ist. Als Ergebnis liegen dann m homologe Punktpaare mit m kürzesten Entfernungen vor.

Anhand der ermittelten homologen PS-Punkte können die LOS-Bewegungsraten der PSI-Auswertungen im Überlappungsbereich durch Differenzbildung direkt miteinander verglichen werden. Ein Vergleich dieser Raten eignet sich gut zum Auffinden von Abweichungen in den Bewegungsänderungen, da diese aus einer linearen Regressionsanalyse resultieren, welche

anfällig auf Ausreißer in den Bewegungsänderungen reagieren. Kleine Abweichungen der Bewegungsänderungen können deutlich abweichende LOS-Bewegungsraten zu Folge haben und es lassen sich in der Differenzbildung größere Unterschiede erkennen (Abbildung 6).

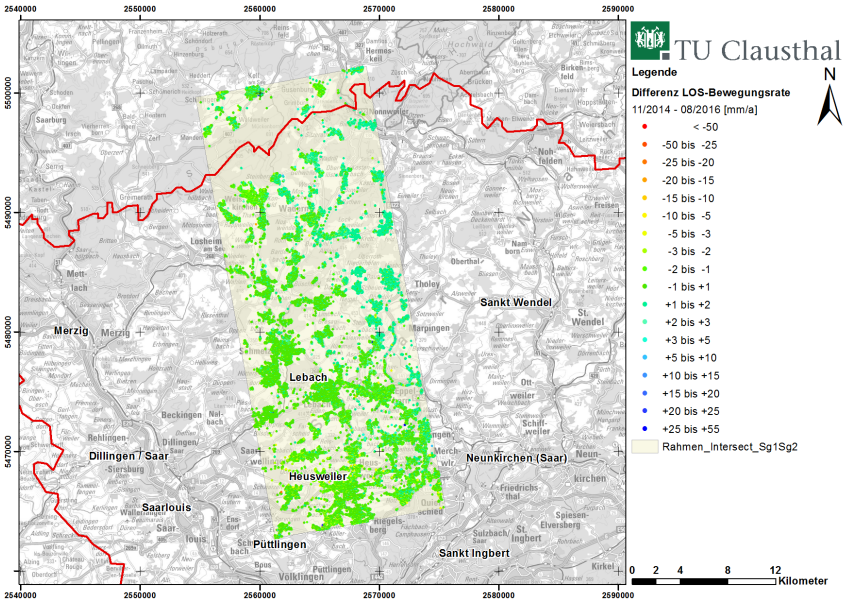

Abbildung 6: Differenzen der LOS-Bewegungsraten an homologen Punkten im Überlappungsbereich von Segment 1 und 2 (© GeoBasis-DE/BKG 2016).

Die Verteilung der Differenzen der LOS-Bewegungsraten z. B. durch Analyse in einer Boxplot-Darstellung (Abbildung 7) lässt eine Klassifizierung erkennen, welche Rückschlüsse auf grobe Fehler in den Zeitreihen zulassen.

In den Zeitreihen der homologen Punkte mit maximalen Differenzen ($> \pm 10$ mm) konnten fast ausschließlich zufällige Messwert-Sprünge sowie Phase-Unwrapping-Fehler als Ursache der Abweichungen festgestellt werden. Zudem konnten auch vereinzelt PS-Punkte detektiert werden, die ein stark anderes Bodenbewegungsverhalten aufweisen als PS-Punkte in ihrer unmittelbaren Umgebung. Die Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen beispielhaft Zeitreihen entsprechend aufgefallener homologer Punkte mit teilweise mehrfachen Phase-Unwrapping-Sprüngen.

Die so detektierten PS-Punkte können als grob fehlerhaft in den PSI-Auswertungen angesehen werden. Allerdings kann in den seltensten Fällen und dann nur mit zusätzlichen Fachinformationen entschieden werden, welche der verglichenen Zeitreihen der Realität entspricht. Folglich werden alle homologen Punkte, welche eine größere Differenz der LOS-Bewegungsrate aufweisen, in den einzelnen PSI-Auswertungen entfernt.

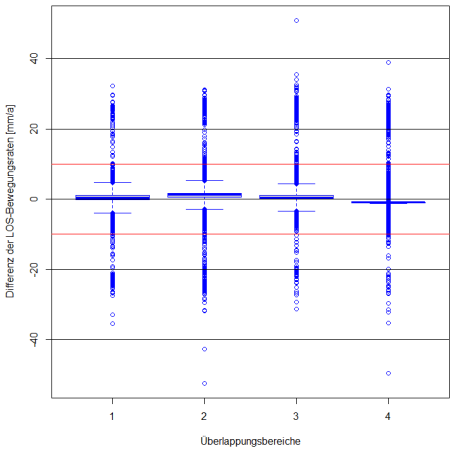

Abbildung 7: Boxplot der Differenzen der LOS-Bewegungsraten an homologen Punkten in den einzelnen Überlappungsbereichen (Plot 1: Segment 1/2; Plot 2: Segment 1/3; Plot 3: Segment 2/4; Plot 4: Segment 3/4).

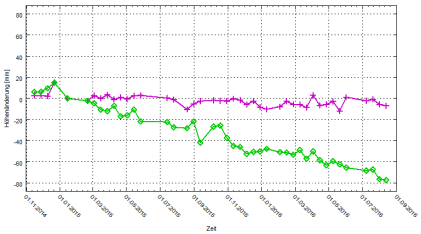

Abbildung 8: Beispielhafte PSI-Zeitreihe eines homologen PS-Punktpaares mit einer Differenz der LOS-Bewegungsrate von 43 mm/a.

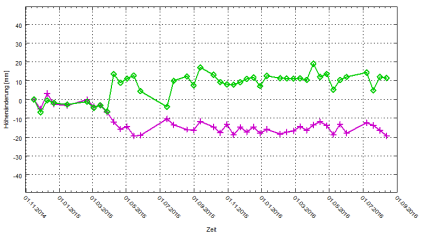

Abbildung 9: Beispielhafte PSI-Zeitreihe eines homologen PS-Punktpaares mit einer Differenz der LOS-Bewegungsrate von -16 mm/a.

5. Ergebnisse

Die erste landesweite radarinterferometrische Auswertung des Saarlandes lieferte nach der Qualitätsprüfung im Post-Processing einen Datensatz von 1 230 886 PS-Punkten innerhalb der Landesgrenze. Dies entspricht einer durchschnittlichen Punktdichte von circa 480 PS/km².

Ausgehend von den ermittelten Bewegungen in LOS-Richtung (Δr) an den PS-Punkten kann mit Hilfe des Einfallswinkels (Θ_i) eine Ableitung der Werte in Höhenänderungswerte (Δh, vertikale Bewegungen) erfolgen:

$$\Delta h = \frac{\Delta r}{\cos \theta_i} \tag{1}$$

Die Umrechnung erfolgt jedoch ohne Berücksichtigung möglicherweise aufgetretener Horizontalbewegungen und sollte daher immer kritisch hinterfragt werden. Insbesondere in Gebieten mit starken, z. B. bergbaubedingten Bodenbewegungen, sowie bei Verwendung von Radardaten eines Satelliten mit großem Blickwinkel können systematische Fehlereinflüsse auftreten.

In Abbildung 10 ist das Ergebnis einer solchen großflächigen Auswertung (über alle vier Segmente) in Form von Höhenänderungsraten [mm/a] für den Zeitraum 11/2014 bis 08/2016 zusammengefasst dargestellt. Deutlich sind im ehemals bergbaublich beeinflussten Gebiet im südlichen Saarland, im Bereich des Warndt (ehem. Standort Warndt/Luisenthal) zwischen Völklingen und Großrosseln, flächenhaft Hebungen zu erkennen. Ursächlich hierfür ist die bereits ab 2005 erfolgte Flutung des Grubengebäudes. Ein weiterer Bodenbewegungsschwerpunkt befindet sich zwischen Saarlouis, Dillingen, Heusweiler und Lebach. Hier treten noch Restsenkungen durch die Bergbautätigkeiten des 2012 geschlossenen Bergwerkes Saar (Standort Ensdorf) auf.

Zudem wurden für die Höhenänderungs-Zeitreihen pro PS-Punkt mit dem Trendmodellierungstool des IGMC bestangepasste Trendpolynome abgeleitet werden. Mit Hilfe des für jeden PS-Punkt vorliegenden Höhenänderungs-Trendpolynoms wurden anschließend die Differenzen des letzten und ersten Polynomfunktionswertes (Messwert + Verbesserung) berechnet. Diese stellen die gesamten Höhenänderungen zwischen 11/2014 und 08/2016 dar. Die so für jeden PS-Punkt berechneten Höhenänderungen [mm] sind in Abbildung 11 dargestellt.

Des Weiteren können aus diesen Ergebnissen für ausgewählte Zeiträume Höhenänderungen abgeleitet werden. Dazu kann die gesamte Zeitreihe z. B. in einjährige Zeitscheiben unterteilt werden. Hierzu können z. B. die Höhenänderungsdifferenzen aus den Funktionswerten zwischen dem Datum der ersten und der letzten Szene eines Kalenderjahres genutzt werden. Die so berechneten Höhenänderungen stellen ein Maß für die Höhenänderungen in dem Jahr dar und können als Eingangsgrößen in z. B. ein zukünftiges Bodenbewegungskataster des Saarlandes als ein erstes Basisattribut übernommen werden.

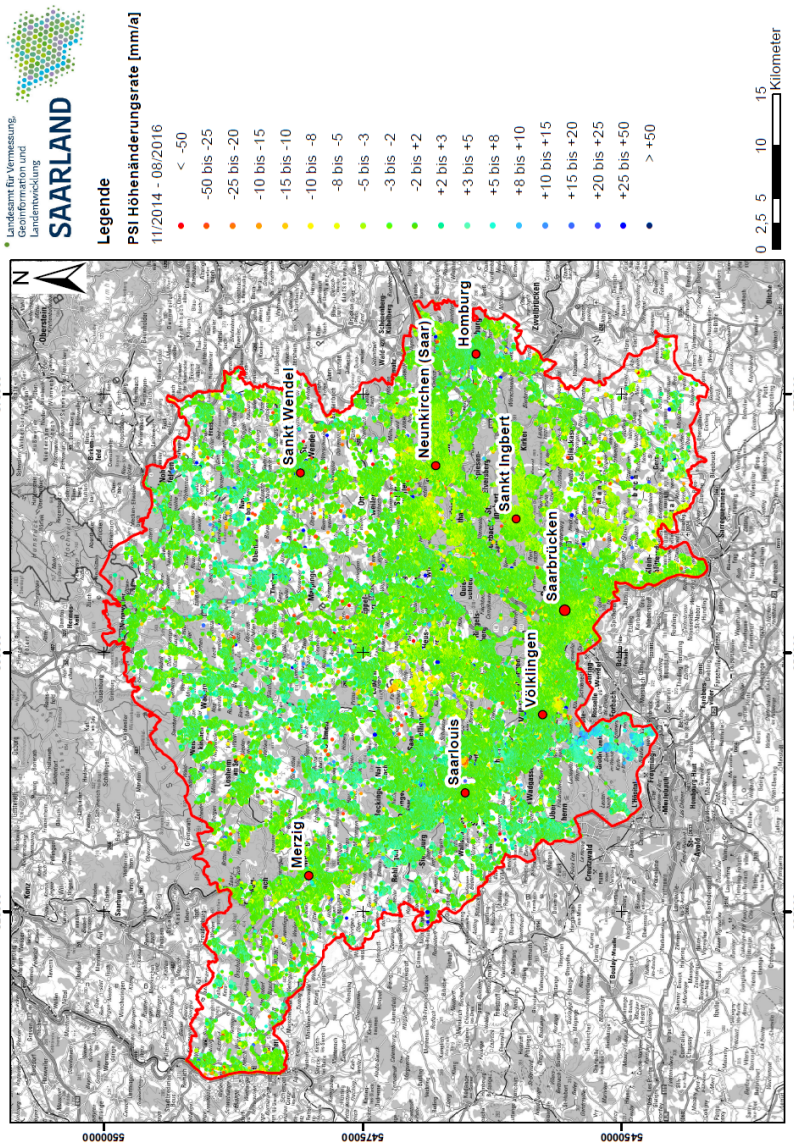

Abbildung 10: PSI-Höhenänderungsraten [mm/a] für den Beobachtungszeitraum 11/2014 bis 08/2016 (© GeoBasis-DE/BKG 2018).

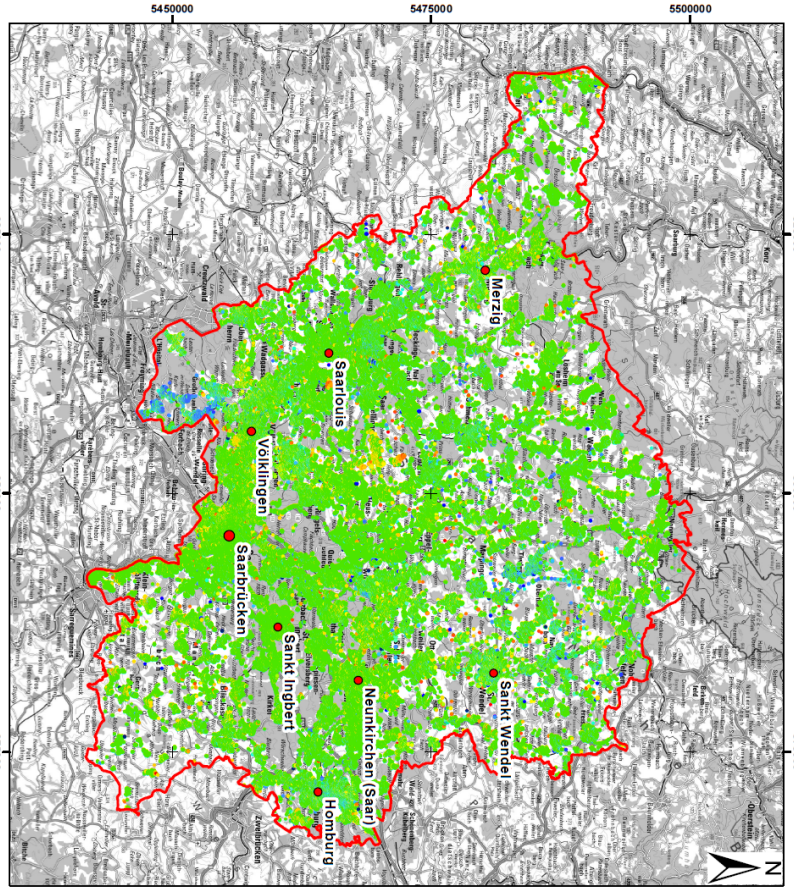

Abbildung 11: PSI-Höhenänderungen [mm] für den Beobachtungszeitraum 11/2014 bis 08/2016(© GeoBasis-DE/BKG-2018).

Literatur

Besl, P. J. & Mc Kay, N. D. (1992): A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 14(2), pp. 239 – 256.

Busch, W. & Linke, J. (2014): Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels Orthogonaler Polynome. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten AVN, Heft 8/9, S. 298 – 310.

Engel, T. & Busch, W. (2015): Nächste-Nachbar-Strategie zur Bestimmung von identen Persistent Scatterern aus sich zeitlich und räumlich überlappenden PSI-Auswertungen. Tagungsband Geomonitoring 2015, Clausthal-Zellerfeld, S. 105 – 121.

European Space Agency (2013): Sentinel-1 User Handbook. Von `https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook` abgerufen.

Xi, F. (2017): Detektion von anormalen Zeitreihen an Persistent-Scatterer-Punkten im Zusammenhang mit der Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen. Dissertation, TU Clausthal, Fakultät für Energie und Wirschaftswissenschaften, Clausthal-Zellerfeld.