# Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings

XIAOXUAN YIN, M. Sc. & PROF. DR. WOLFGANG BUSCH

Bodenbewegungen sind zeitlich variierende Verformungen von Teilen der Erdoberfläche und werden durch unterschiedliche, räumlich und zeitlich variierende Ursachen hervorgerufen. Um die räumliche und zeitliche Variation der Bodenbewegungen großflächig zu beobachten, können die satellitengestützten radarinterferometrischen Verfahren mittels der Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR), wie die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI), eingesetzt werden. Charakteristisch für diese Verfahren ist, dass sie Bewegungen nur in der Blickrichtung des Sensors erfassen. Um die dreidimensionalen Bodenbewegungen zu erhalten, müssten drei richtungsverschieden aufgenommene und sich räumlich und zeitlich überlappende Radardatensätze vorliegen, was sowohl wegen der begrenzten Verfügbarkeit von Radardaten als auch wegen der Kosten für die Radardaten in der Praxis meist nicht zu erfüllen ist. Jedoch bietet sich neuerdings durch die kostenfrei verfügbaren Sentinel-1-Daten in Ascending (ASC)- und Descending (DESC)-Flugrichtungen eine Möglichkeit der Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Bodenbewegungskomponente.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Komponente der Horizontalbewegungen aus den Ergebnissen von PSI-Auswertungen mit ASCund DESC-Daten der Sentinel-1A/B-Satelliten vorgestellt. Die abgeleiteten Höhenänderungen und Ost-West-Horizontalbewegungen liegen in Form von Zeitreihen vor, womit weiterführende spatio-temporale Analysen der Bodenbewegungen, wie Genauigkeitsbetrachtungen für beide Komponenten und ein Vergleich der radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen mit Nivellementsergebnissen, durchgeführt werden können.

In einem praktischen Anwendungsfall wird die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens auf Grundlage von PSI-Auswertungen mit den ASC- und DESC-Sentinel-1-Daten demonstriert. Die abgeleiteten Ost-West-Horizontalbewegungen (im Rasterdatenformat) entsprechen der Modellvorstellung und die rasterbasierten Höhenänderungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit vergleichbaren, nivellitisch bestimmten Höhenänderungen.

#### 1. Einführung

Bodenbewegungen können als zeitlich variierende dreidimensionale Verformungen von Teilen der Erdoberfläche verstanden werden. Sie treten kleinräumig (im Extremfall nur an einem Objekt) und großräumig (über eine Fläche von z. B. 1 km<sup>2</sup> und deutlich größer) sowie zeitlich und

räumlich variierend in unterschiedlichen Größenordnungen (z. B. Senkungsgeschwindigkeiten) auf. Ursachen für ihr Auftreten und ihre räumliche und zeitliche Variation können geogener und anthropogener Natur sein. Die Ursachen sind räumlich und zeitlich unterschiedlich und verändern sich häufig in ihrem zeitlichen Verlauf. Verschiedene Ursachen können aber auch in zeitlicher und räumlicher Nachbarschaft auftreten und somit durch ihre sich räumlich wie zeitlich überlagernden Anteile zu einer flächenhaft auftretenden Bodenbewegung und damit zu einer räumlich und zeitlich unterschiedlichen Gesamtverformung an der Tagesoberfläche führen.

Für die großflächigen Überwachungen von solchen Bewegungen werden die satellitengestützten radarinterferometrischen Verfahren mittels der Radarsysteme mit synthetischer Apertur (SAR), wie die Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) (FERRETTI ET AL. 2000), zunehmend eingesetzt. Beim PSI-Verfahren werden die interferometrischen Phasen an realen Objekten punkthaft erfasst, deren Rückstreuungseigenschaften sich über eine lange Reihe aufeinanderfolgender Aufnahmen der Radarsatelliten als signifikant und stabil erwiesen haben. Zur Ableitung von Bodenbewegungen kann eine Millimeter-Genauigkeit mit dem PSI-Verfahren erzielt werden.

Die Bewegungen können jedoch nur in der schrägen auf die Erde gerichteten Blickrichtung der Sensoren, in der sog. line-of-sight (LOS) Richtung, ermittelt werden. Da die bestimmten "Objekt"-Bewegungen in Blickrichtung des Sensors (LOS) eine eindimensionale Messgröße darstellen, liegt es nahe, daraus unter Berücksichtigung des jeweiligen Einfallswinkels  $\theta_i$  (Abbildung 1) die Höhenänderung als eindimensionale Größe abzuleiten. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass die Bewegung eines Objektes im Raum vollständig nur durch einen dreidimensionalen Verschiebungsvektor beschreibbar ist. Ein Radarsensor liefert üblicherweise nur Daten in einer Blickrichtung (schräg nach unten, gekennzeichnet durch den Blickwinkel, bezogen auf den Nadir). Da alle nutzbaren Radarsensoren eine nahezu Nord-Süd- (absteigend = descending) bzw. Süd-Nord-Flugrichtung (aufsteigend = ascending) besitzen und üblicherweise rechtsblickend (unter einem Winkel von ungefähr 90° gegenüber der Flugrichtung) sind, verlaufen die Azimut-Blickrichtungen entweder etwa von Osten nach Westen oder von Westen nach Osten. Um die dreidimensionalen Bewegungskomponenten eines Objektes zu erfassen. müssten drei Radardatenstapel vorliegen und ausgewertet werden, die in drei verschiedenen Azimut-Blickrichtungen und unter verschiedenen Einfallswinkeln (bezogen auf die Nadirrichtung) aufgenommen werden. Aufgrund der Descending- bzw. Ascending-Flugrichtung aller nutzbaren Radarsensoren können üblicherweise Objekte maximal aus zwei unterschiedlichen Azimut-Blickrichtungen (aus etwa Osten oder Westen), jedoch unter verschiedenen Blickwinkeln, beobachtet werden.

Die Ableitung einer Höhenänderung aus einer LOS-Bewegung kann rechnerisch durch die Verhältnisbildung LOS-Bewegung zu Kosinus des Einfallswinkels erfolgen. Um möglichst fehlerfreie Höhenänderungen (bei Nutzung nur einer Blickrichtung) zu erhalten, muss jedoch angenommen werden, dass keine Horizontalbewegungen aufgetreten sind. Da ein Fehler infolge aufgetretener Horizontalbewegungen von der Größe des Einfallswinkels abhängt, sollte der Einfallswinkel des verwendeten Radarsensors möglichst klein sein. Je flacher die LOS-Richtung verläuft desto größer ist der fehlerhafte Einfluss einer Horizontalbewegung auf die umgerechnete Höhenänderung. Da in der Praxis mitunter ein möglichst steil blickender Sensor nicht verfügbar ist, könnte es in Gebieten mit horizontalen Bewegungen zu Fehlinterpretationen umgerechneter Höhenänderungen kommen (BUSCH ET AL. 2016).

Eine theoretisch korrekte Bestimmung der dreidimensionalen Bewegungskomponenten erfordert drei richtungsverschieden aufgenommene und sich räumlich und zeitlich überlappende Radardatensätze. Diese Voraussetzung ist sowohl wegen der begrenzten Verfügbarkeit von Radardaten als auch der Kosten für die Radardaten und PSI-Auswertungen (außer in Forschungsprojekten) bisher kaum zu erfüllen gewesen. Jedoch bietet sich neuerdings durch die kostenfrei verfügbaren Sentinel-1-Daten eine auch für "kommerzielle" Projekte interessante Möglichkeit der Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Bodenbewegungskomponenten auf Grundlage von Daten in Ascending (ASC)- und Descending (DESC)-Flugrichtungen (Kapitel 2).

Die in 2014 gestartete Sentinel-1-Mission (BUSCH & KNOSPE 2015) der Europäischen Weltraumorganisation (*European Space Agency, ESA*) bietet für radarinterferometrische Anwendungen geeignete Daten mit einer Wiederholungsrate von 12 Tagen mit Sentinel-1A bzw. 6 Tagen bei kombinierter Verwendung mit Daten des baugleichen Sentinel-1B-Satelliten (seit 2016) an. Für das Gebiet der EU stehen Sentinel-1-Daten sowohl in ASC- als auch in DESC-Richtung zu Verfügung, so dass eine regelmäßige radarinterferometrische Erfassung von Bodenbewegungen mittels PSI-Auswertungen von Datensätzen beider Aufnahmerichtungen mit Hilfe des nachfolgend beschriebenen Verfahrens ermöglicht wird.

Dieser Beitrag beschreibt Grundlagen und Vorgehensweise zur Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Komponente der Horizontalbewegungen aus den Ergebnissen von PSI-Auswertungen mit ASC- und DESC-Daten der Sentinel-1A/B-Satelliten. Die abgeleiteten Höhenänderungen und Ost-West-Horizontalbewegungen liegen in Form von Zeitreihen vor, so dass weiterführende spatio-temporale Analysen des Bodenbewegungsgeschehens, wie auch ein Vergleich mit Nivellementsergebnissen, durchgeführt werden können. Genauigkeitsbetrachtungen über die ursprünglichen ASC- und DESC-PSI-Auswertungen sowie die abgeleiteten Höhenänderungen und Ost-West-Horizontalbewegungen erfolgen mit dem am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) entwickelten Trendpolynomverfahren (BUSCH & LINKE 2014). Die PSI-Auswertungen wurden mittels dem IPTA-Verfahren (WERNER ET AL. 2003) der GAMMA SAR and Interferometry Software der Firma GAMMA Remote Sensing Research and Consulting AG (Schweiz) durchgeführt.

# 2. Methodik zur Ermittlung von Bodenbewegungskomponenten

#### 2.1. Theoretische Grundlagen zur Ableitung von Bewegungskomponenten

Mit dem PSI-Verfahren kann eine Bewegung (Verschiebung) eines "permanent" rückstreuenden Objektes zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten nur in der Blickrichtung des verwendeten Radarsensors gemessen werden. Das Ergebnis einer solchen Auswertung ist somit die Bewegung in Blickrichtung, welche als Veränderung des Abstands zwischen dem rückstreuenden Objekt und dem Sensor entlang der Blickrichtung des Sensors interpretiert werden kann. In Abbildung 1 wird die Blickrichtung am Beispiel der ASC-Aufnahme eines rechts-blickenden Sensors in einem geographisch orientierten, dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt. Als Sensorparameter sind der Einfallswinkel (incidence angle  $\theta_i$ ) und die Azimut-Blickrichtung (azimuth looking direction  $\alpha_{ALD}$ ) des Sensors bekannt.



Abbildung 1: Blickrichtung (LOS) eines satellitengestützten Radarsensors, am Beispiel einer Ascending-Aufnahme mit right-looking-Sensor.

Eine Punktbewegung, die durch einen dreidimensionalen Vektor (z. B.  $\vec{d}$ ) beschrieben werden kann (Abbildung 2), wird als Ergebnis einer radarinterferometrischen Auswertung durch den Vektor  $\vec{d}_{LOS}$  repräsentiert, der in Richtung der Blickrichtung des Sensors  $\overrightarrow{LOS}$  zeigt und eine Länge von  $|\vec{d}| \cdot \cos \vartheta$  besitzt. Der Winkel  $\vartheta$  entspricht dem Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und der Blickrichtung des Sensors (Abbildung 2a). In der Realität sind der Betrag und die Richtung einer tatsächlichen Punktbewegung unbekannt, so dass die Ableitung des Winkels  $\vartheta$  ohne weitere Annahmen, z. B. über ein Bewegungsmodell, nicht möglich ist.



Abbildung 2: Projektion eines Bewegungsvektors auf die Blickrichtung des Sensors. (a) Direkte Projektionsumrechnung mit bekanntem Winkel zwischen Bewegungs- und Blickrichtungsvektor, (b) Summenbildung der einzelnen, auf die Blickrichtung projizierten Komponenten des Bewegungsvektors.

Anderseits können die einzelnen Komponenten einer Punktbewegung separat auf die Blickrichtung projiziert werden. Wie in Abbildung 2b beispielsweise dargestellt, kann eine Bewegung  $\vec{d}$  in eine vertikale und zwei horizontale Komponenten, die sich auf die Nord-Süd- und Ost-West-Richtungen beziehen, aufgeteilt werden. Die radarinterferometrisch messbare Bewegung in der Blickrichtung des Sensors ergibt sich dann durch die Summenbildung der einzelnen auf die Blickrichtung projizierten Bewegungskomponenten z. B. gemäß der folgenden mathematischen Beziehung:

$$\vec{d}_{\text{LOS}} = \vec{d}_{\text{up}} \cdot \cos\theta_i - (\vec{d}_N \cdot \cos\alpha_{\text{ALD}} + \vec{d}_E \cdot \sin\alpha_{\text{ALD}}) \cdot \sin\theta_i \tag{1}$$

Dabei ist  $\theta_i$  der Einfallswinkel der Blickrichtung (Winkel zwischen der Blickrichtung und der Nadirrichtung).  $\alpha_{ALD}$  ist die Blickrichtung, die dem Winkel zwischen der auf die horizontale Fläche projizierte Blickrichtung und der Nordrichtung (geographisch) entspricht (Abbildung 1).  $\vec{d}_{LOS}$  repräsentiert die radarinterferometrisch gemessene LOS-Bewegung.

Aufgrund der Datenverfügbarkeit (und Kosten) wurden und werden meist radarinterferometrische Auswertungen mit nur einem Datensatz durchgeführt, der aus den Radarszenen eines Tracks und einer Aufnahmerichtung von einem Sensor besteht. Die Auswertungsergebnisse werden deshalb üblicherweise in Form von LOS-Bewegungen ausgegeben. Da aus eindimensionalen LOS-Bewegungen nicht das gesamte dreidimensionale Bodenbewegungsgeschehen abgeleitet werden kann, werden auch Höhenänderungen mit Hilfe der Beziehung  $\frac{d Los}{\cos \theta_i}$  und unter der Annahme berechnet, dass es keinen Einfluss infolge horizontaler Bewegungen gibt.

Auf der Tagung "Fringe 2009" wurde von SAMIEIE-ESFAHANY ET AL. dargelegt, dass die Vernachlässigung von horizontalen Bewegungen zu einer falschen Interpretation von InSAR-Auswertungen führen kann. In ihrer Arbeit wurden die ASC-Bewegungen horizontal auf die Descending-Richtung umgerechnet. Das Kratzsch'sche Bodenbewegungsmodell zur Vorausberechnung bergbaubedingter Bodenbewegungen wurde als Ergänzungsinformation insofern genutzt, dass die Bewegungsrichtungen innerhalb einer Senkungsmulde prognostiziert wurden und dadurch die drei Bewegungskomponenten aus nur zwei Radar-Datensätzen, jeweils aus ASC und DESC, komplett bestimmt werden konnten. Eine ähnliche Auswertung und Nutzung von ASC- und DESC-Daten sind z. B. auch in LAZECKÝ ET AL. (2016) zu finden.

In SAMSONOV & D'OREYE (2012) und SAMSONOV ET AL. (2014) wurden ASC- und DESC-Daten mittels der Small-Baseline-Methodik (SBAS) ausgewertet und entsprechend kombiniert, um die Bewegungskomponenten abzuleiten. Da die seitenblickenden SAR-Sensoren mit einem polarnahen Orbit für Bewegungen in Nord-Süd-Richtung nicht empfindlich sind (SAMSONOV & D'OREYE 2012), können die Nord-Süd-Verschiebungen vernachlässigt werden, wenn zusätzlich die Nord-Süd-Verschiebungen deutlich kleiner als die Ost-West-Verschiebungen sind (WRIGHT ET AL. 2004). Unter Nutzung derselben Annahme finden sich Anwendungsbeispiele auch in LUBITZ ET AL. (2014), REFICE ET AL. (2015) und HAG-HIGHI & MOTAGH (2017) usw. Diesem gedanklichen Ansatz wird auch in diesem Beitrag gefolgt und nachfolgend der entsprechende Berechnungsablauf detailliert erläutert. Die Blickrichtungen (LOS) der ASC- und DESC-Aufnahmen können, siehe Abbildung 3, zusammen in einem dreidimensionalen geographisch orientierten Koordinatensystem dargestellt werden.



Abbildung 3: Blickrichtungen der ASC- und DESC-Aufnahmen in einem 3D-Koordinatensystem.

Um den Zusammenhang zwischen den beiden Blickrichtungen besser darzustellen, werden die Blickrichtungen in Abbildung 4 jeweils auf eine horizontale Ebene (Nord-Ost) und eine vertikale Nadir-Ost Ebene projiziert.



Abbildung 4: Projektionen der Blickrichtungen von ASC- und DESC-Aufnahmen: (a) auf horizontale N-O-Ebene und (b) auf vertikale Nadir-O-Ebene.

In Abbildung 4b<sup>1</sup> kann erkannt werden, dass z.B. ein ausschließliches Senkungsverhalten

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>In Abbildung 4b werden die Einfallswinkel in der Nadir-Ost-Ebene von ASC und DESC als  $\theta_i^*$  bezeichnet. Dieser Winkel ist nicht gleich dem Einfallswinkel  $\theta_i$ , welcher sich auf die Ebene der vertikalen Richtung und der Blickrichtung bezieht.

eines Punktes bei beiden Aufnahmerichtungen als "Abstandvergrößerung" gemessen wird. Eine horizontale Bewegung nach Norden entspricht einer Abstandvergrößerung in den beiden Aufnahmerichtungen (vgl. Abbildung 4a), während die Ost-West-Verschiebungen in ASCund DESC-Aufnahmen mit unterschiedlichen Vorzeichen erfasst werden. Unter der Annahme:  $2\pi - \alpha_{ALD, DESC} \approx \alpha_{ALD, ASC} = \alpha_{ALD}$  und  $\theta_{i, DESC} \approx \theta_{i, ASC} = \theta_{i}$ , lässt sich die Ost-West-Verschiebungen mit folgenden Gleichungen berechnen:

$$\vec{d}_{LOS, DESC} - \vec{d}_{LOS, ASC} = \begin{bmatrix} \vec{d}_E \\ \vec{d}_N \\ \vec{d}_{up} \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{bmatrix} \sin \theta_i, DESC \cdot \sin \dot{\alpha}_{ALD}, DESC \\ -\sin \theta_i, DESC \cdot \cos \dot{\alpha}_{ALD}, DESC \\ \cos \theta_i, DESC \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\sin \theta_i, ASC \cdot \sin \alpha_{ALD, ASC} \\ -\sin \theta_i, ASC \cdot \cos \alpha_{ALD, ASC} \\ \cos \theta_i, ASC \end{bmatrix} \right)$$
$$= \begin{bmatrix} \vec{d}_E \\ \vec{d}_N \\ \vec{d}_{up} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta_i, DESC \cdot \sin \dot{\alpha}_{ALD, DESC} + \sin \theta_i, ASC \cdot \sin \alpha_{ALD, ASC} \\ -\sin \theta_i, DESC \cdot \cos \dot{\alpha}_{ALD, DESC} + \sin \theta_i, ASC \cdot \cos \alpha_{ALD, ASC} \\ \cos \theta_i, DESC - \cos \theta_i, ASC \end{bmatrix}$$
(2)

$$\vec{d}_E = \frac{\vec{d}_{LOS, DESC} - \vec{d}_{LOS, ASC}}{2 \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_{ALD}}$$
(3)

Unter der Bedingung, dass  $\frac{\pi}{2} - \alpha_{ALD}$  ein kleiner Winkel ist, so dass der Wert von  $\cos \alpha_{ALD} \approx$ 0 ist und somit der Einfluss einer Bewegung in Nord-Südrichtung ( $\vec{d}_N \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ALD}$ ) vernachlässigt werden kann, lässt sich eine Höhenänderung  $\vec{d}_{up}$  berechnen durch:

$$\vec{d}_{LOS, DESC} + \vec{d}_{LOS, ASC} = \begin{bmatrix} \vec{d}_E \\ \vec{d}_N \\ \vec{d}_{up} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ALD} \\ 2 \cdot \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

$$= -\vec{d}_N \cdot 2 \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \alpha_{ALD} + \vec{d}_{up} \cdot 2 \cdot \cos \theta_i$$
(4)

$$\vec{d}_{up} = \frac{\vec{d}_{LOS, DESC} + \vec{d}_{LOS, ASC}}{2 \cdot \cos \theta_i}$$
(5)

Zur zusätzlichen Ableitung der Nord-Süd-Bewegungskomponente stellten FIALKO ET AL. in ihren Veröffentlichungen in 2001 und 2005 die Methodik "azimuthal offsets (AZO)" vor, die sie an ASC- und DESC-Daten des Radarsensors ENVISAT ASAR anwendeten. Ein weiterer, spezieller Ansatz, nämlich Multi-Apertur-InSAR (MAI), wurde 2006 von BECHOR & ZEBKER beschrieben. FUHRMANN (2016) stellt eine auf der Persistent Scatterer Interferometrie basierte Methodik vor, bei der die fehlende N-S-Komponente bei Verwendung der zwei Aufnahmerichtungen (ASC und DESC eines Sensors) durch zusätzliche GPS- und Nivellementsdaten berechnet wird, so dass eine Aussage über 3D-Bodenbewegungen getroffen werden kann. Diese besonderen und teilweise auf spezifischen Daten basierenden Methoden werden in diesem Beitrag nicht weiter behandelt.

#### 2.2. Berechnung der Bodenbewegungskomponenten

Entsprechend der in Kapitel 2.1 erläuterten Theorie wurden die ASC- und DESC-Datenstapel jeweils getrennt mittels des PSI-Verfahrens ausgewertet. Um einen möglichen systematischen Fehler zwischen den beiden PSI-Ergebnissen zu reduzieren, der durch unterschiedliche Referenzpunkte der beiden PSI-Auswertungen entstehen könnte, wurden die Referenzpunkte der beiden PSI-Auswertungen in einem möglichst identischen und bewegungsfreien Gebiet gewählt. Der weitere Berechnungsablauf zur Ableitung von Höhenänderungen und der Ost-West-Bewegungen ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Prozesskette zur Ermittlung von Höhenänderungen und O-W-Verschiebungen.

Das Untersuchungsgebiet wurde in quadratische Rasterzellen mit einer Größe von 100 m x 100 m aufgeteilt. Die Zeitreihen der LOS-Bewegungen von PS-Punkten aus einem Datenstapel (ASC oder DESC), die sich in einer solchen Zelle befinden, wurden durch Mittelbildung der Messwerte an jedem einzelnen Datum (Aufnahmedatum) zu einer neuen, die Rasterzelle repräsentierenden Zeitreihe berechnet. Somit steht für jede Zelle sowohl eine mittlere Zeitreihe für die ASC- als auch für die DESC-Richtung zur Verfügung. Die einzelnen Werte dieser beiden mittleren Zeitreihen einer Zelle wurden entsprechend dem Aufnahmedatum paarweise zugeordnet, so dass einem DESC-Wert dem drei Tage später aufgenommenen ASC-Wert entspricht (vgl. Kapitel 3.1). Messwerte eines Datums einer Aufnahmerichtung, für die keine Entsprechung in der anderen Aufnahmerichtung vorhanden ist, werden in den weiteren Berechnungen nicht mehr berücksichtigt. Mittels der Formel 3 und Formel 5 wurden die Ost-West-Verschiebungen und die Höhenänderungen anhand der Wertepaare der ASC- und DESC-LOS-Bewegungen berechnet. Dabei wurde der zeitliche Versatz zwischen den ASC- und DESC-Aufnahmen von drei Tagen vernachlässigt. Für die berechneten Zeitreihen der Höhenänderungen und der Ost-West-Verschiebungen wurde zusätzlich eine Trendpolynomausgleichung durchgeführt. Die Anwendungsbeispiele basieren auf ASC- und DESC-Datensätzen der Sentinel-1A/B-Satelliten und werden in Kapitel 3 vorgestellt.

# 3. Anwendungsbeispiele

#### 3.1. Datengrundlagen

Im Rahmen des Copernicus-Programms (früher Global Monitoring for Environment and Security, GMES) wurden und werden unterschiedliche Sentinel-Satelliten für Aufgaben im Bereich der Erdbeobachtung entwickelt und betrieben. Die dazu gehörenden C-Band-SAR-Satelliten "Sentinel-1" bestehen aus einer Zwei-Satelliten-Konstellation in einem polarnahen Orbit und sind für SAR-Anwendungen gut geeignet. Als Nachfolger von ERS-1/2 und ENVISAT ASAR besitzen die Sentinel-1-Satelliten eine deutlich höhere Wiederholungsrate der Befliegung mit einem zeitlichen Abstand von 12 Tagen. In Verbindung mit dem in 2016 in Betrieb genommenen Sentinel-1B, welcher baugleich zu Sentinel-1A ist bzw. konfliktfrei identische Aufnahmen erzeugen kann, verbessert sich die Wiederholungsrate auf 6 Tage.

Sentinel-1 bietet Radardaten in vier Erfassungsmodi an: Interferometric Wide Swath (IW), Wave Mode (WV), Strip Map (SM), Extra Wide Swath (EW). Der ähnlich wie ScanSAR ausgeführte IW-Modus erfasst die Erdoberfläche in Form von Sub-Swath, in denen die Aufnahme burstweise mittels des TOPSAR-Verfahrens (Terrain Observation by Progressiv Scans, TOPSAR; DE ZAN & GUARNIERI (2006) erfolgt, so dass die Daten im IW-Modus eine relativ hohe geometrische Auflösung von 5 m x 20 m besitzen und gleichzeitig über eine große Streifenbreite (Swath Wide) verfügbar sind. Die Daten aus dem IW-Modus sind auch die Datengrundlagen für die Beispiele in diesem Beitrag. Mehr Informationen zu Funktionsweise und technischen Beschreibungen der Sentinel-1-Mission finden sich z. B. in TORRES ET AL. (2012), BUSCH & KNOSPE (2015) und HAGHIGHI & MOTAGH (2017).

Das Anwendungsbeispiel (Kapitel 3.2) wurde, aufgrund der Verfügbarkeit, mit zwei Datensätzen im IW-Modus über die letzten beiden Jahre jeweils aus der ASC- und DESC-Aufnahmerichtung ausgewertet. Der ASC-Datensatz stammt aus dem relativen Orbit (RO) 15 und beinhaltet 99 Szenen, der DESC-Datensatz stammt aus dem relativen Orbit 139 und umfasst 110 Szenen. Eine ausführliche Übersicht über die verfügbaren und genutzten Radardaten enthält Abbildung 6.



Abbildung 6: Datengrundlage im zeitlichen Kontext.

Für die radarinterferometrischen Auswertungen wurde das aus X- und C-Band mosaikierte digitale Höhenmodell (DHM) der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM-XC) im geodätischen Bezugssystem DHDN90 verwendet. Die räumliche Auflösung des DHMs konnte durch Resampling auf 5 Meter umgerechnet werden.

#### 3.2. Ergebnisse der radarinterferometrischen Bodenbewegungsermittlung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in den mittleren Streifen (IW2) der ASC- und DESC-Datensätze. Es liegt somit ein nahezu identischer Einfallswinkel von  $\theta_{i, DESC} \approx \theta_{i, ASC} =$ 39° für beide PSI-Auswertungen vor. Für die Blickrichtungen in ASC ergab sich ein Wert von  $\alpha_{ALD, ASC} \approx 81,5°$  und für DESC ein Wert von  $\alpha_{ALD, DESC} \approx 281,5°$ , und somit für  $\alpha_{ALD}$ ein mittlerer Wert von 80°. Die einzelnen PSI-Auswertegebiete und der benutzte gemeinsame Überlappungsbereich sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Ableitung von Höhenänderungen und O-W-Verschiebungen kann im Überlappungsbereich der beiden Auswertungen durchgeführt werden.

Beispielhaft wird der Fokus auf die Hebungserscheinungen im nordöstlichen Überlappungsbereich gelegt (Abbildung 7). Unter der Annahme, dass keine horizontalen Punktbewegungen auftreten, lassen sich mittels der bekannten Einfallswinkel jeweils aus den DESC- und ASC-LOS-Bewegungen die vertikalen Bewegungsanteile (Höhenänderungen) berechnen und die PS-Punkt-Höhenänderungszeitreihen mit dem Trend-Polynom-Verfahren ausgleichen. Die so mit Hilfe der Trendfunktionen für jeden PS-Punkt berechneten Höhenänderungen zwischen dem ersten und letzten Aufnahmedatum sind in Abbildung 8 dargestellt.

Um den Einfluss der zuvor unberücksichtigt gebliebenen, horizontalen Bewegungsanteile auf die abgeleiteten Höhenänderungen (auf Grundlage der PSI-Ergebnisse sowohl des ASC- als auch des DESC-Datensatzes) ersichtlich zu machen, sind zusätzlich in Abbildung 8 die mit dem in Kapitel 2 vorgestellten Verfahren berechneten, rasterzellen-bezogenen Höhenänderungen dargestellt.



Abbildung 7: Auswertegebiete ASC (grüner Rahmen) und DESC (blauer Rahmen) und Überlappungsbereich.

Im Vergleich ergibt sich, dass die Hebungsbereiche der drei dargestellten Höhenänderungsergebnisse leicht gegeneinander versetzt sind. Der Hebungsbereich der ASC-Auswertung ist mehr nach Westen bzw. Südwesten ausgedehnt, und der der DESC-Auswertung mehr nach Osten bzw. Südosten. Diese Unterschiede sind das Resultat der unberücksichtigten, aber tatsächlich aufgetretenen horizontalen Bewegungen. Abbildung 9 zeigt am Beispiel des regulären, modellhaften Bewegungsverhalten einer Senkung und einer Hebung den räumlichen Zusammenhang mit der aus einer Aufnahmerichtung abgeleiteten Höhenänderungen (rote Pfeile, ohne Berücksichtigung von horizontalen Bewegungen) und die tatsächlichen Höhenänderungen (grüne Pfeile).

Deutlich zeigt sich durch die ortsabhängige Länge der roten Pfeile (Abbildung 9), dass die ohne Berücksichtigung von Horizontalbewegungen abgeleiteten Höhenänderungen auf der dem Sensor zugewandten Seite des Bewegungsgebietes eine Überschätzung gegenüber den wahren Höhenänderungen sowohl im Falle von Senkungen als auch von Hebungen erfahren. Im Gegensatz hierzu tritt eine Unterschätzung der Höhenänderungen auf der dem Sensor abgewandten Seite des Bewegungsgebietes auf.

Die vergleichenden Darstellungen (Abbildung 10) der Zeitreihen von PS-Punkten der PSI-



Abbildung 8: Gegenüberstellung unterschiedlich abgeleiteter Höhenänderungen: an PS-Punkten, abgeleitet aus ASC-LOS-Bewegungen (a) und aus DESC-LOS-Bewegungen (b), sowie in Rasterzellen, berechnet aus Ascending- und Descending-LOS-Bewegungen (c).

Auswertungen jeder Aufnahmerichtung und der entsprechenden Zeitreihe der aus beiden Auswertungen berechneten Höhenänderungen (Rasterzelle) zeigen ebenfalls die erwarteten Unterschiede. Zur Verdeutlichung sind drei ausgewählte Zeitreihen für zwei Bereiche, zum Einen von der westlichen Seite des Hebungsgebietes (Abbildung 10a, Position durch gelben Stern in Abbildung 8 markiert) und zum Anderen von der östlichen Seite des Hebungsgebietes (Abbildung 10b, Position durch roten Stern in Abbildung 8 markiert), gegenübergestellt.

Aus Abbildung 10a ist beispielhaft zu erkennen, dass das Hebungsverhalten etwa im Frühjahr 2016 begonnen hat und, wie erwartet, die abgeleiteten Höhenänderungen bei der ASC-Auswertung (grüne Linie) eine Überschätzung bzw. die bei der DESC-Auswertung (blaue Linie) eine Unterschätzung der Hebungen aufweisen. Ein ähnlicher, aber gegensätzlicher Effekt zeigt sich in Abbildung 10b für das Gebiet am östlichen Rand des Hebungsgebietes. Infolge der nahezu Ost-West-ausgerichteten Blickrichtungen der ASC- und DESC-Aufnahmen stellen



Abbildung 9: Effekte der horizontalen Bewegungen in einem Profil eines Bewegungsgebietes.



Abbildung 10: Ausgewählte Zeitreihen der Höhenänderungen, die aus der Aufnahmerichtung DESC (blaue Linie) und ASC (grüne Linie) ermittelt sind, und der umgerechneten Höhenänderung (lila Linie) mittels des Verfahrens aus Kapitel 2. Die Positionen der ausgewählten Zeitreihen sind in Abbildung 8 mit gelben bzw. roten Sternen markiert.

sich die daraus abgeleiteten Höhenänderungen (lila Linie), trotz der Vernachlässigung der Nord-Süd-Bewegungen, realitätsnah dar.

Nicht nur "verbesserte" Höhenänderungen sondern auch die horizontalen Bewegungskomponenten in der Ost-West-Richtung wurden mit diesem Verfahren gemäß Kapitel 2 abgeleitet (Abbildung 11).

Die berechneten, rasterzellen-bezogenen, horizontalen Verschiebungen in Ost-West-Richtung zeigen das erwartete Bewegungsverhalten. Im Zentrum des Hebungsgebietes treten keine oder nur geringe Ost-West-Horizontalbewegungen auf, während im westlichen Teilgebiet die Horizontalbewegungen nach Westen und im östlichen Teilgebiet nach Osten gerichtet sind. Ihr Betrag erreicht ein Maximum von 38 mm im Zeitraum Februar 2015 bis Oktober 2017.



Abbildung 11: Aus Ascending- und Descending-LOS-Bewegungen abgeleitete Ost-West-Horizontalbewegungen (Rasterzellen) im Zeitraum 02/2014 – 10/2017: a) in Klassen der Verschiebungsbeträge und der Richtungen eingeteilt, b) größen- und richtungsmäßige Pfeildarstellung mit Höhenänderungen im Hintergrund.

#### 3.3. Genauigkeitsbetrachtungen mittels einer Trendpolynomausgleichung

Mit dem am IGMC entwickelten Programm (BUSCH & LINKE 2014) zur automatischen Bestimmung von best-angepassten Trendfunktionen (basierend auf einem Polynommodell) lassen sich für jede PSI-Zeitreihe (ASC und DESC) sowie für die durch eine Mittelwertbildung berechneten Rasterzellen-Zeitreihen statistische Genauigkeitswerte ableiten. Grundlage hierfür sind für das gesamte PSI-Auswertegebiet der ASC-Daten insgesamt 424 056 PS-Punkte und 420 716 PS-Punkte für das PSI-Auswertegebiet der DESC-Daten. Im Überlappungsgebiet dieser beiden Auswertegebiete konnten für 25 825 Rasterzellen (100 m x 100 m) durch das in Kapitel 2 vorgestellte Verfahren Zeitreihen der Höhenänderungen und Ost-West-Horizontalbewegungen ermittelt werden.

Aus der Polynomausgleichung einer Höhenänderungszeitreihe lässt sich die Standardabweichung (s<sub>0</sub>) einer einzelnen Höhenänderung als Genauigkeitsmaß bestimmen. Sie repräsentiert ein Maß für die Abweichungen der Messwerte (Höhenänderungen) gegenüber dem optimalen funktionalen Trendmodell.

In Abbildung 12 sind in zwei Histogrammen zunächst die Häufigkeitsverteilungen der berechneten Standardabweichungen s<sub>0</sub> der Höhenänderungen für die PSI-Zeitreihen der ASC-Daten (Abbildung 12 oben) und der DESC-Daten (Abbildung 12 unten) dargestellt. Hieraus lässt sich ableiten, dass die jeweils über 420000 berechneten Standardabweichungen einer Höhenänderung bei der ASC-Auswertung (im Mittel etwa 5,4 mm) deutlich größer sind als bei der PSI-DESC-Auswertung (etwa 4,5 mm). Infolge der Mittelbildung zur Ableitung von über 25800 ASC- bzw. DESC-Zeitreihen für die Rasterzellen sind die Standardabweichungen der abgeleiteten Höhenänderungen mit 4,7 mm (ASC) und 3,8 mm (DESC) um jeweils 0,7 mm kleiner.

Für die gemäß dem in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren berechneten rasterzellenbasierten Höhenänderungen ergeben sich aus der Polynomausgleichung die in Abbildung 13 (grüne Säulen) dargestellten Häufigkeiten der Standardabweichung einer Höhenänderung mit einem Mittelwert von etwa 2,9 mm (siehe Tabelle 1). Die statistisch abgeleitete Standardabweichung der so bestimmten Höhenänderungen ist gegenüber den in Abbildung 12 dargestellten Standardabweichungen deutlich kleiner (im Mittel um 1,8 mm bzw. 0,9 mm).

Mit Hilfe einer Polynomausgleichung der rasterzellenbasierten Zeitreihen der Ost-West-Horizontalbewegungen konnten ebenfalls Standardabweichungen ( $s_0$ ) für die Ost-West-Horizontalbewegungen berechnet werden. Die Häufigkeitsverteilungen dieser Standardabweichungen  $s_0$  in Abbildung 13 und der Werte in Tabelle 1 zeigen, dass die Standardabweichungen einer Ost-West-Verschiebung im Mittel 3,8 mm betragen.

Aufgrund dieser statistischen Betrachtungen kann festgestellt werden, dass die aus rasterzellenbasierten Zeitreihen abgeleiteten Höhenänderungen eine mittlere Standardabweichung von kleiner als 3 mm besitzen und die Standardabweichungen einer Ost-West-Horizontalbewegung mit im Mittel etwa 3,8 mm etwas schlechter sind. Beide Ergebnisse zeigen die erreichbare hohe statistische Qualität der mit diesem Verfahren aus Sentinel-Daten abgeleiteten Bodenbewegungskomponenten auf.

lorizontalbewegungen und der Höhen	länderungen.	-	
	Arithmetischer Mittelwert	Modalwert	Median

Tabelle 1: Arithmetischer Mittelwert, Modalwert und Median der Standardabweichungen der Ost-West-

	Arithmetischer Mittelwert	Modalwert	Median
Ost-West-Verschiebungen	3,81 mm	3,80 mm	3,80 mm
Höhenänderungen	2,92 mm	2,80 mm	2,90 mm

## 3.4. Vergleich von radarinterferometrisch abgeleiteten mit nivellitisch gemessenen Höhenänderungen

Während die in Kapitel 3.3 berechneten Standardabweichungen eine "innere" Genauigkeit (im Englischen "precision") repräsentieren, ist für die praktische Anwendung einer Messmethode der (mindestens exemplarische) Vergleich mit der "Wahrheit" wichtig. Da im Regelfall die "Wahrheit" unbekannt ist, ist anzustreben, dass zumindest exemplarisch an ausgewählten Punkten ein Vergleich von mit unterschiedlichen Verfahren bestimmten Ergebnissen erfolgt. Ein solcher auf die radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen ausgerichteter Vergleich ist mit Messergebnissen von im Vergleichszeitraum wiederholt durchgeführten Nivellements möglich. In einem anderen als dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Untersuchungsgebiet lagen nivellitisch bestimmte Höhenänderungen vor. In Abbildung 14a und b sind exemplarisch für zwei Nivellementspunkte ermittelte Höhenänderungen (rot) den aus PSI-Auswertungen von ASC-Sentinel-1-Daten (grün) und DESC-Sentinel-1-Daten (blau) abgeleiteten Höhenänderungszeitreihen an benachbarten PS-Punkten über einen Zeitraum von etwa Herbst 2014 bis spätes Frühjahr 2017 gegenübergestellt.

Die PSI-Zeitreihen in Abbildung 14a-b zeigen deutliche Abweichungen der radarinterferometrisch bestimmten Höhenänderungen, und zwar im Sinne einer Über- und Unterschätzung, gegenüber den nivellitisch gemessenen Höhenänderungen. Die Anwendung des in Kapitel 2 beschriebenen rasterzellenbasierten Verfahrens (Zellengröße 80 m x 80 m) mit gemeinsamer Nutzung der ASC- und DESC-PSI-Daten führte zu den in Abbildung 14c-d in blau dargestellten Höhenänderungszeitreihen. Im Vergleich mit den in Rot dargestellten nivellitisch gemessenen Höhenänderungen zeigt sich eine sehr große Übereinstimmung und, zumindest exemplarisch, eine hohe "äußere" Genauigkeit der radarinterferometrisch und mit dem in diesem Beitrag erläuterten Verfahren abgeleiteten Höhenänderungen.



(a)



(b)

Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen so einer Höhenänderung von PS-Punkten (PSp) und gemittelten Zeitreihen innerhalb der 100 m Zellen.



Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen einer rasterzellenbasierten EW-Verschiebung (lila Balken) und Höhenänderung (grüne Balken).



Abbildung 14: Höhenänderungsdiagramme von PS-Punkt-Höhenänderungszeitreihen (grün und blau, in Abbildungen a und b) im Vergleich mit nivellitisch bestimmten Höhenänderungen (rot) sowie mit rasterzellenbasierten Höhenänderungszeitreihen (blau, in Abbildungen c und d).

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird in seinen Grundlagen und praktischer Anwendung ein Verfahren zur Ableitung der Bodenbewegungskomponenten in vertikaler Richtung und Ost-West-Horizontalrichtung mittels kombinierter Nutzung von PSI-Auswertungen von ASC- und DESC-Sentinel-1A/B-Datensätzen beschrieben. Im Gegensatz zu aus PSI-Auswertungen aus nur einer Blickrichtung abgeleiteten Höhenänderungen (unter der Annahme, dass keine horizontalen Bodenbewegungen aufgetreten sind) zeigen die mit dem hier beschriebenen, rasterzellenbasierten Verfahren berechneten Höhenänderungen sowohl eine höhere statistische Qualität als auch eine bessere "Annäherung" an die realen Höhenänderungen. Die mit dem vorgestellten Verfahrensablauf ermittelten Ost-West-Horizontalbewegungen konnten als plausibel im Vergleich zu einem Bodenbewegungsmodell bestimmt werden. Erstmals wurden mittels einer Polynomausgleichung aller rasterzellenbasierten Zeitreihen der Ost-West-Horizontalbewegungen Genauigkeitsmaße abgeleitet.

Trotz des durch diesen Beitrag dokumentierten Fortschritts bei der radarinterferometrischen Ableitung von Bodenbewegungskomponenten sei abschließend darauf hingewiesen, dass in Gebieten, in denen Nord-Süd-Horizontalbewegungen einen deutlich höheren Anteil an den horizontalen Bewegungen besitzen, es auch mit dieser Methode, aufgrund der Vernachlässigung von Nord-Süd-Bewegungen, zu einer möglichen Fehlschätzung abgeleiteter Höhenänderungen kommen kann. Die bisher ermittelten Ergebnisse ermutigen zu weiteren (auch fehlertheoretischen) Untersuchungen in Gebieten mit unterschiedlichen Bodenbewegungen und ihren Ursachen zur besseren, realitätsnahen Charakterisierung des zeitlichen und räumlichen Bodenbewegungsverhaltens.

#### Literatur

- BECHOR, N. B. D. & ZEBKER, H. A. (2006): Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. In: Geophysical Research Letters, 33, L16311.
- BUSCH, W. & LINKE, J. (2014): Räumliche Höhenänderungsanalysen auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels orthogonaler Polynome. In: AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 121, S. 298 – 310.
- BUSCH, W. & KNOSPE, S. (2015): Sentinel-1. Monitoring von Bodenbewegungen für alle? In: Tagungsband "16. Geokinematischer Tag", Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, H. 2015-1, S. 121 – 136.
- BUSCH, W., WALTER, D., COLDEWEY, W. G. & HEJMANOWSKI, R. (2016): Bergwerk Ibbenbüren der RAG AG. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- DE ZAN, F. & MONTI GUARNIER, A. (2006): TOPSAR: terrain observation by progressive scans. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44, pp. 2352 2360.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F. (2000): Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38, pp. 2202 2212.

- FIALKO, Y., SIMONS, M. & AGNEW, D. (2001): The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 M\_W7. 1 Hector Mine Earthquake, California, from space geodetic observations. In: Geophysical Research Letters, 28, pp. 3063 3066.
- FIALKO, Y., SANDWELL, D., SIMONS, M. & ROSEN, P. (2005): Three-dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit. In: Nature, 435, pp. 295 299.
- FUHRMANN, T. (2016): Surface Displacements from Fusion of Geodetic Measurement Techniques Applied to the Upper Rhine Graben Area. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, München, ISBN 978-3-7696-5185-0.
- HAGHIGHI, M. H. & MOTAGH, M. (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-Scale Interferometry, Atmospheric Effects and Ground Deformation Mapping. In: ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 2017, 142, S. 245 – 256.
- LAZECKY, M., CANASLAN COMUT, F., NIKOLAEVA, E., BAKON, M., PAPCO, J., RUIZ-ARMENTEROS, A. M., QIN, Y., DE SOUSA, J. J. M. & ONDREJKAM P. (2016): Potential of sentinel-1a for nation-wide routine updates of active landslide maps. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B7, pp. 775 – 781.
- LUBITZ, C., MOTAGH, M. & KAUFMANN, M. (2014): Ground Surface Response to Geothermal Drilling and the Following Counteractions in Staufen im Breisgau (Germany) Investigated by TerraSAR-X Time Series Analysis and Geophysical Modeling. In: Remote Sensing, 6, pp. 10571 – 10592.
- REFICE, A., PASQUARIELLO, G., BOVENGA, F., FESTA, V. & ACQUAFREDDA, P.(2015): Investigating uplift in Lesina Marina (Southern Italy) with the aid of persistent scatterer SAR interferometry and in situ measurements. In: Environmental Earth Sciences, 75: 243.
- SAMIEIE-ESFAHANY, S, HANSSEN, R. F., VAN THIENEN-VISSER, K. & MUNTENDAM-BOS, A. (2009): On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. In: Proceedings of "Fringe 2009 Workshop", Frascati, Italy.
- SAMSONOV, S. & D'OREYE, N. (2012): Multidimensional time-series analysis of ground deformation from multiple InSAR data sets applied to Virunga Volcanic Province. In: Geophysical Journal International, 121, pp. 1095 1108.
- SAMSONOV, S., D'OREYE, N., GONZÁLEZ, P. J., TIAMPO, K. F., ERTOLAHTI, L. & CLAGUE, J. J. (2014): Rapidly accelerating subsidence in the Greater Vancouver region from two decades of ERS-ENVISAT-RADARSAT-2 DINSAR measurements. In: Remote Sensing of Environment, 143, pp. 180 191.
- TORRES, R., SNOEIJ, P., GEUDTNER, D., BIBBY, D., DAVIDSON, M., ATTEMA, E., POTIN, P., ROMMEN, B., FLOURY, N., BROWN, M., NAVAS TRAVERA, I., DEGHAYE, P., DUESMANN, B., ROSICH, B., MIRANDA, N., BRUNO, C., L'ABBATE, M., CROCI, R., PIETROPAOLO, A., HUCHLERC, M. & ROSTAN, F. (2012): GMES Sentinel-1 mission. In: Remote Sensing of Environment, 120, pp. 9 – 24.
- WERNER, C., WEGMÜLLER, U., STROZZI, T. & WIESMANN, A. (2003): Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: Proceedings of IGARSS 2003, Toulouse, France.
- WRIGHT, T. J., PARSONS B. E. & LU, Z. (2004): Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. In: Geophysical Research Letters, 31, L01607.