



Detektion von Verdachtsflächen für Oberflächenbewegungen basierend auf differentieller SAR Interferometrie

Detection of potential areas of surface motion based on differential SAR interferometry

Karlheinz Gutjahr, Graz

Kurzfassung

Erdrutsche und Bodensenkungen sind verbreitete Georisiken in Europa. Methoden der differentiellen SAR-Interferometrie sind gut geeignete Verfahren, um einen kontinuierlichen, homogenen und großflächigen Überwachungsdienst in Bezug auf Oberflächenbewegungen bereitzustellen. Im aktuellen Beitrag wird dieses Potential für ein ausgewähltes Testgebiet näher durchleuchtet. Die erzielten Ergebnisse und erstellten Produkte werden durch Vergleich mit verfügbaren Referenzdaten validiert. Zuletzt wird ein Ausblick auf die Nutzung aktueller Sentinel-1 Daten über Österreich gegeben.

Schlüsselwörter: Differentielle SAR Interferometrie, Oberflächenbewegungen, Sentinel-1

Abstract

Landslides and land subsidence are widespread geohazards in Europe. Differential SAR interferometry techniques are well suited methods to provide a continuous, homogeneous and large-area monitoring service with respect to ground surface motion. In this paper this potential is analysed for a selected test site. The achieved results as well as generated products are validated by comparison to available reference data. Finally, an outlook on the use of current Sentinel-1 data over Austria is given.

Keywords: Differential SAR Interferometry, Ground motion, Sentinel-1

1. Einleitung

Erdrutsche sind eine der am weitesten verbreiteten Georisiken in Europa, die auch für erhebliche soziale und wirtschaftliche Auswirkungen verantwortlich sind. Bodensenkungen können allmählich über viele Jahre auftreten und die nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft und der Wirtschaft ernsthaft beeinträchtigen.

Mittlerweile wird zunehmend anerkannt, dass Techniken der differentiellen SAR-Interferometrie (DInSAR) gut geeignete Verfahren sind, um einen kontinuierlichen, homogenen und großflächigen Überwachungsdienst in Bezug auf Oberflächenbewegungen bereitzustellen. Dies zeigt etwa die Empfehlung der Österreichischen Geodätischen Kommission zum § 15 der VermV 2016 betreffend Gebiete mit Bodenbewegungen (ÖGK, 2017), oder auch viele gegenwärtige sowie zukünftige nationale und supranationale Initiativen zur Einrichtung von Bodenbewegungsdiensten auf der Grundlage dieser Techniken.

Aus dieser Motivation wird in diesem Beitrag zuerst die Methodik der differentiellen SAR-Interferometrie kurz zusammengefasst und anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels mögliche Ergebnisse veranschaulicht. Um auch in Hinblick auf die zu erwartenden Genauigkeiten

eine Aussage zu treffen, werden den Ergebnissen Nivellement-Daten gegenübergestellt. Zuletzt wird ein Ausblick auf die Nutzung aktueller Sentinel-1 Daten über Österreich gegeben.

2. Methodik

2.1 Radar und synthetisches Apertur Radar

Das Akronym Radar steht für *Radio Detection And Ranging* und beschreibt schon unglaublich geschickt das Messprinzip eines solchen Sensors. Wie in Abbildung 1 skizziert wird von einer Antenne (hier auf einem Satelliten montiert) ein Signal im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums ausgesandt (*radio*). Dieselbe Antenne empfängt den vom Objekt rückgestrahlten Anteil dieses Signals und misst nun die Stärke (*detection*), die Laufzeit und die Phasenlage der Rückstreuung (*ranging*).

Das synthetische Apertur Radar (SAR) nutzt die kohärenten Eigenschaften des Signals und erlaubt durch die zeitliche Integration der Rückstreuung eine signifikante Auflösungsverbesserung in Flugrichtung (Azimut). Tatsächlich kürzt sich durch dieses Verfahren die Entfernungsabhängigkeit der Auflösung in Azimut heraus und egal ob man ein boden-, flugzeug- oder satellitengestütztes SAR

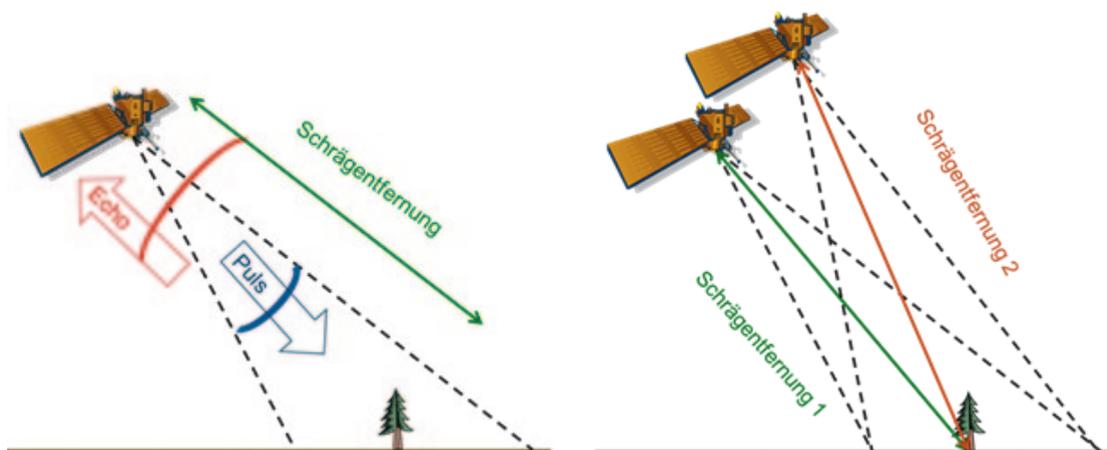


Abb. 1: Aufnahmeprinzip Radar/SAR (links) und differentielle SAR Interferometrie (rechts)

betrachtet, ist die Azimutaufösung immer ungefähr gleich der halben physikalischen Antennenlänge.

2.2 Differentielle SAR Interferometrie

Die differentielle SAR Interferometrie benötigt analog der klassischen Stereomessung zumindest zwei Aufnahmen desselben Gebietes der (Erd-) Oberfläche (siehe auch Abbildung 1). Diese Aufnahmen können wie im Fall der *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) oder der *Tandem-X Mission* simultan erfolgen, während ERS-1/2, Envisat oder jetzt Sentinel-1A/B diese zwei Szenen zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufnehmen. Dadurch ergeben sich einerseits räumliche Basislinien, welche geometrische Unterschiede in den Szenen verursachen und bei nicht simultaner Akquisition zeitliche Basislinien, welche temporale Veränderungen implizieren.

In einem komplexen Verfahren (sowohl im mathematischen als auch im übertragenen Sinn) wird

aus diesen beiden Szenen ein Interferogramm generiert, dessen (interferometrische) Phase nun der Entfernungsdifferenz entspricht. Ein 2π -Zyklus der Phase entspricht der Wellenlänge (z. B. ~ 5.6 cm im C-Band), d. h. einer Entfernungsdifferenz von ~ 2.8 cm. Das zeigt schon die enorme Sensitivität dieser Methode, wobei die verschiedenen Einflüsse auf die Entfernungsdifferenz in Gleichung (1) zusammengefasst sind:

$$\varphi = \varphi_{ell} + \varphi_{topo} + \varphi_{disp} + \varphi_{atm} + \varphi_{proc} + \varphi_{noise} \quad (1)$$

Dabei ist φ die gemessene (interferometrische) Phase, φ_{ell} die Aufnahmegeometrie-bedingte Phase, φ_{topo} der Phasenanteil der Topographie und φ_{disp} der Phasenanteil durch Veränderung der Oberfläche. Dazu kommt noch die Laufzeitveränderung des Signals durch die Atmosphäre und Ionosphäre φ_{atm} , Phasenanteile durch die Prozessierung φ_{proc} und unvermeidliches Signalrauschen φ_{noise} .

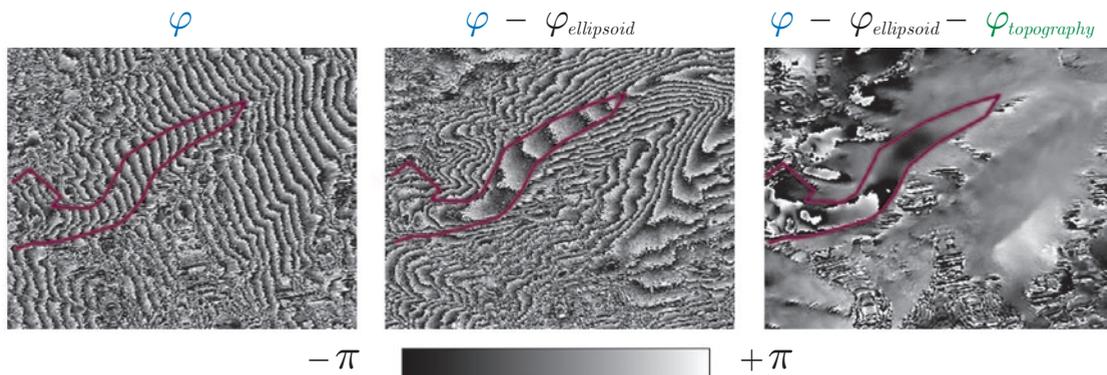


Abb. 2: Differentielle SAR Interferometrie am Beispiel von ERS Tandem Daten vom 14./15. Februar 1996 im Bereich des Hintereisferners/Tirol. Links: Gemessene interferometrische Phase, Mitte: Nach Abzug der Aufnahmegeometrie-bedingten Phase, Rechts: Nach Abzug der Topographie-bedingten Phase.

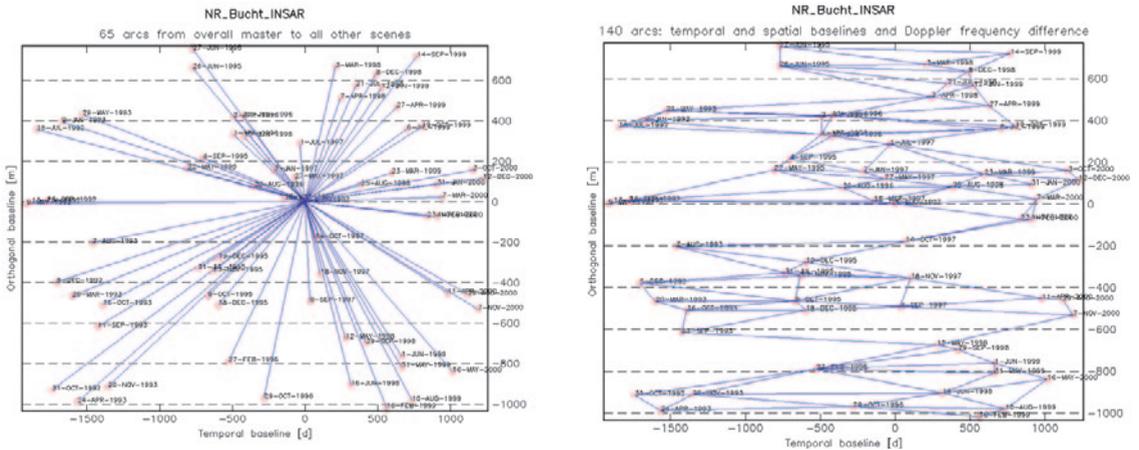


Abb. 3: Darstellung der zeitlich / räumlichen Baselinien der verwendeten Interferogramme für die ERS-1/2 Zeitreihe des Testgebietes „Niederrheinische Bucht“. Links: PSI. Rechts: SBAS.

In Abbildung 2 wird anhand des Hintereisferners in Tirol gezeigt, wie aus der interferometrischen Phase durch Subtraktion bekannter Phasenanteile (daher der Zusatz *differentielle* Interferometrie) jener Anteil, welcher durch Veränderungen der Erdoberfläche induziert wird, extrahiert werden kann.

2.3 Zeitreihenanalyse

Um die Jahrtausendwende wurde begonnen, die langen Zeitreihen der ERS-1/2 Daten zu analysieren, um speziell die verbleibenden Phasenanteile in Gleichung (1) (Atmosphäre, Prozessierung und Rauschen) besser modellieren zu können. Im Wesentlichen haben sich zwei Methoden etabliert – *Permanent Scatterer SAR Interferometry* (PSI) von Ferretti et al., 2001 und *Small Baseline*

Differential SAR Interferometry (SBAS) von Berardino et al., 2002. Einen guten Überblick über die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden bzw. deren unzähligen Weiterentwicklungen geben z. B. Osmanoğlu et al., 2016 oder Sousa et al., 2011. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die Art, wie Interferogramme ausgewählt und dann ausgewertet werden. Während PSI eine zentrale Szene auswählt und damit eine sternförmige Struktur in der zeitlich / räumlichen Baseliniedarstellung der Interferogramme forciert, wählt SBAS keine zentrale Szene, sondern, wie der Name schon andeutet, ein Netz aus möglichst kurzen Baselinien. Abbildung 3 stellt diesen Sachverhalt für die ERS-1/2 Zeitreihe der Niederrheinischen Bucht dar.

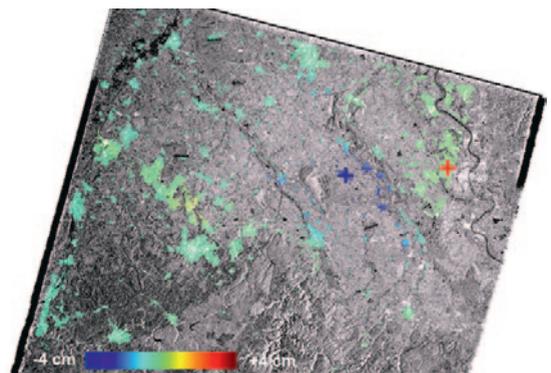
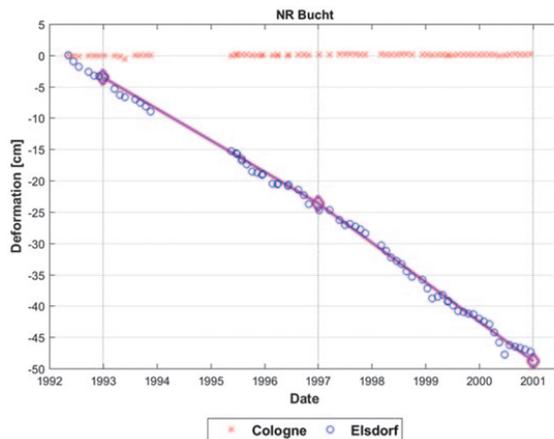


Abb. 4: SBAS Auswertung für die ERS-1/2 Zeitreihe des Testgebietes „Niederrheinische Bucht“. Links: Typischer Verlauf für einen stabilen und einen bewegten Punkt. Rechts: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten.

3. Ergebnisse und Validierung

3.1 ERS-1/2 Zeitreihe für das Testgebiet „Niederrheinische Bucht“

Das Testgebiet „Niederrheinische Bucht“ erstreckt sich in West-Ost-Richtung ungefähr von Aachen bis Köln und in Nord-Südrichtung von Mönchengladbach bis Trier in Deutschland. Die europäischen Radarsatelliten ERS-1 und ERS-2 lieferten von 1992 bis zu Beginn 2000 als das ESR-2 PRARE System ausfiel, mehr oder minder kontinuierlich Daten. Insgesamt wurden 71 Szenen von diesem Zeitraum verwendet. Das Testgebiet wurde u. a. deshalb gewählt, weil es eines der aktivsten Kohlebergbauggebiete Europas beinhaltet. Nicht nur der Kohleabbau selbst bedingt hier Setzungserscheinungen, sondern auch das Absenken des

Grundwasserspiegels. Letzteres führt aber in anderen Teilen des Testgebietes zu Hebungen, da hier stillgelegte Minen mit dem abgepumpten Grundwasser gefüllt werden. Beide Effekte sind im Ergebnis der SBAS Auswertung in Abbildung 4 zu sehen. Weiter zeigt diese Abbildung den typischen Verlauf für einen stabilen Punkt im Stadtgebiet von Köln und einen bewegten Punkt in Elsdorf. Für den bewegten Punkt sind auch noch die drei relevanten Nivellement-Messungen (siehe nächsten Abschnitt) eingezeichnet.

3.2 Validierung

Im Testgebiet „Niederrheinische Bucht“ werden alle vier Jahre umfangreiche Nivellementdaten erhoben. Mit gewissen Einschränkungen können diese Nivellements als Referenz für die Ergebnis-

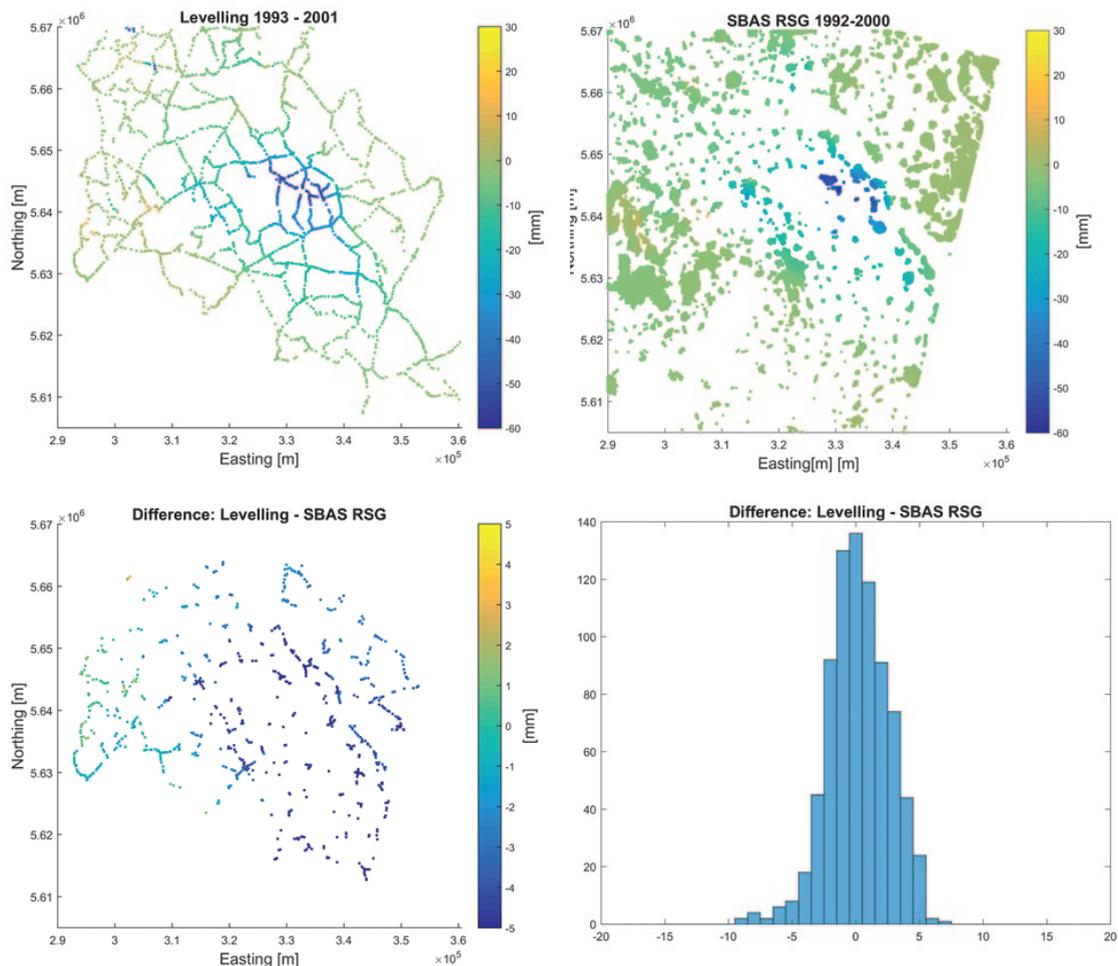


Abb. 5: Validierung für die ERS-1/2 Zeitreihe des Testgebietes „Niederrheinische Bucht“. Oben: Mittlere Jahresgeschwindigkeiten in [mm]. Links: Aus Nivellement. Rechts: SBAS Auswertung. Unten: Differenz Nivellement- SBAS Auswertung. Links: Flächenhafte Darstellung. Rechts: Histogramm der Differenzen.

se der Zeitreihenanalyse dienen. Die Einschränkungen ergeben sich aus dem Umstand, dass Nivellementmessungen punkthafte Information liefern, während eine SBAS Auswertung eine mittlere Information für eine Fläche von hier ungefähr $80 \times 80 \text{ m}^2$ darstellt. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Validierung zusammengefasst. Wie im Histogramm ersichtlich, liegt der Großteil der Differenzen „Nivellement minus SBAS“ im Bereich von $\pm 5 \text{ mm}$ pro Jahr.

4. Sentinel-1 für Österreich

4.1 Sentinel-1

Mit dem Start der Sentinel-1 Mission im Jahr 2014 als Teil des europäischen Copernicus Programmes, stehen wieder kontinuierliche SAR Daten für die vorgestellte Zeitreihenanalyse zur Verfügung. Während Aufnahmeparameter wie Wellenlänge und Auflösung mit ERS-1/2 vergleichbar sind, unterscheidet sich der Aufnahmemodus von Sentinel-1 doch deutlich von allen bisherigen SAR Missionen. Der sogenannte TOPS Modus (*Topographic mapping by Progressive Scans*, beschrieben in De Zan und Monti Guarnieri, 2006) vereinigt die Vorteile des ScanSAR Modus (Abdeckung und Streifenbreite) mit denen des Spotlight Modus (Auflösung). Neben den umfangreichen, notwendigen Erweiterungen in der Zeitreihenanalyse und extrem erhöhten Anforderungen z.B. an die Koregistrierungsgenauigkeit stellen hohe Doppler-Frequenzverschiebungen und unterschiedliche Beleuchtungsrichtungen in den Burst Überlappungen neue Anforderungen an die differentielle interferometrische Analyse von TOPS Daten.

Sentinel-1 stellt auch eine neue Dimension in der Prozessierung von Fernerkundungsdaten dar, wie ein kleines Rechenbeispiel für die Datenmenge für Österreich zeigen soll. Wie in Abbildung 6 ersichtlich ist Österreich in aufsteigender und ab-

steigender Orbitrichtung mit 5 Orbits abgedeckt, wobei pro Orbit ungefähr 2.5 Szenen anfallen. Das macht bei 8 GB pro Szene und dem momentanen Wiederholzyklus von 6 Tagen pro Jahr eine Datenmenge von 12.2 TB nur für die Eingangsdaten. In der Zeitreihenanalyse selbst müssen dann unzählige Derivate und Kombinationen aus diesen Daten gerechnet werden, wodurch sich die Datenmenge noch vervielfacht.

4.2 Kohärenzanalyse

In einem ersten Schritt wurde die Anwendbarkeit der vorgestellten Zeitreihenanalyse für Österreich exemplarisch untersucht. Dazu wurde die sogenannte Kohärenz über die ungefähr ersten beiden Jahre des Sentinel-1A betrachtet. Die Kohärenz ist ein Ähnlichkeitsmaß zwischen den beiden Szenen, welche ein Interferogramm bilden, und somit auch ein Qualitätskriterium der interferometrischen Phase. Abbildung 7 zeigt nun den Prozentsatz zuverlässiger Interferogramme für zwei ausgewählte Orbits (siehe auch Gutjahr und Leopold, 2017).

Offensichtlich ist der hohe Prozentsatz zuverlässiger Interferogramme für verbaute bzw. urbane und offene Flächen, während im inneralpinen und hier v. a. im bewaldeten Bereich die Kohärenz drastisch abfällt. Die angeführten Prozentsätze sind natürlich nur als erster Richtwert zu verstehen, da sich durch den Start des Sentinel-1B Satelliten seit 2017 die Wiederholrate verdoppelt hat und damit mehr zeitlich kohärente Interferogramme existieren. Außerdem müssten alle Orbits der aufsteigenden und absteigenden Orbitrichtung analysiert werden, was aufgrund der schon angesprochenen Datenproblematik bis jetzt noch nicht möglich war.

Detailanalysen im österreichischen Testgebiet „Mattersburg“ zeigen aber bereits jetzt, dass die Sentinel-1 Kohärenzwerte sehr gut mit Kohärenzwerten höher auflösender TerraSAR-X Daten

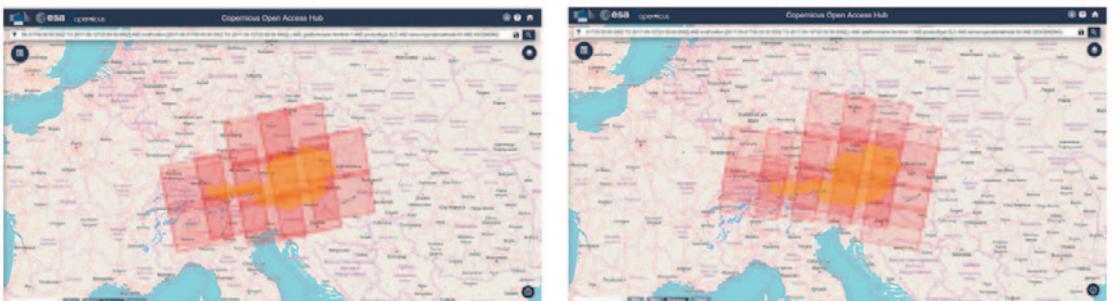


Abb. 6: Sentinel-1 Abdeckung für Österreich. Links: Aufsteigender Orbit. Rechts: Absteigender Orbit.

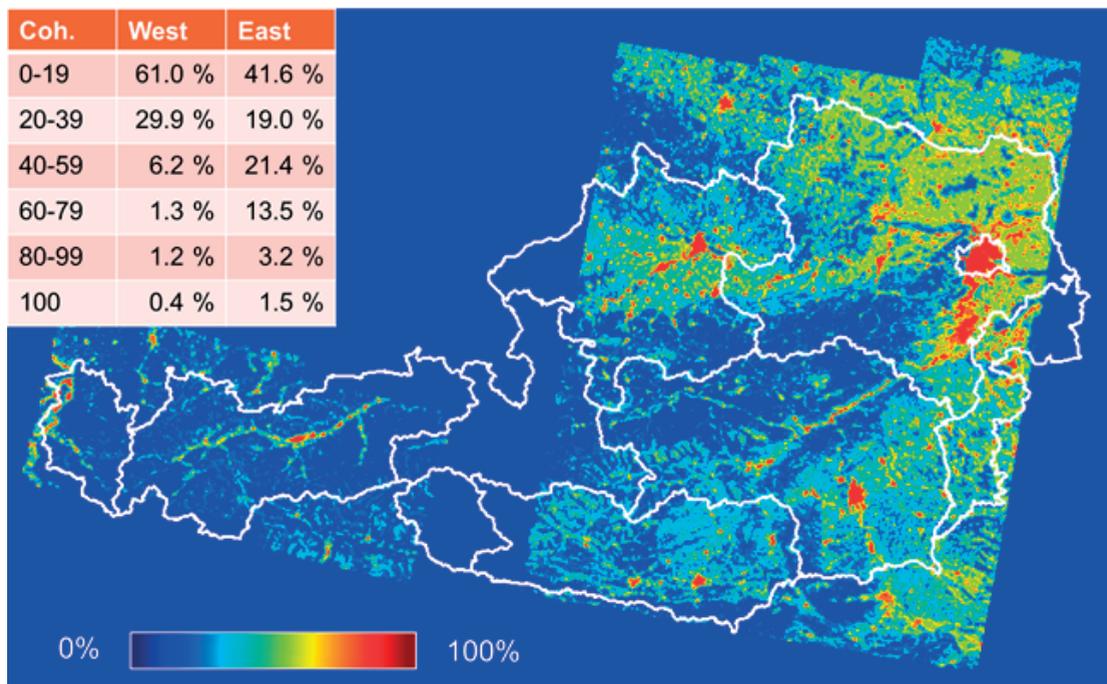


Abb. 7: Sentinel-1A Kohärenzanalyse für Österreich

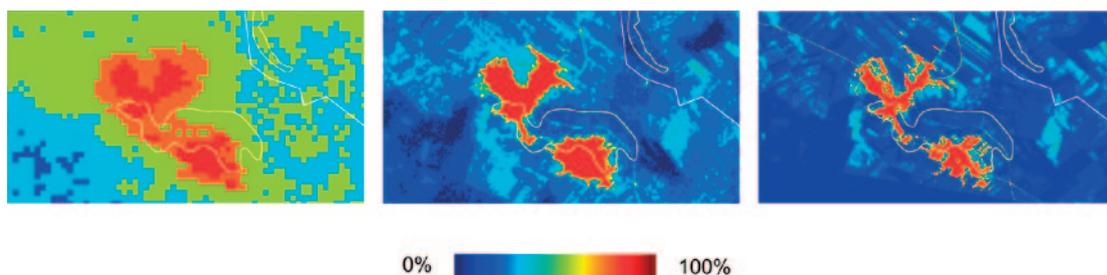


Abb. 8: Vergleichende Kohärenzanalyse für das Testgebiet „Mattersburg“. Links: Sentinel-1 TOPS Modus. Mitte: TerraSAR-X Stripmap Modus. Rechts: TerraSAR-X Staring Spotlight Modus.

übereinstimmen (siehe Abbildung 8). Die prozessierte Pixelauflösung beträgt hier für Sentinel-1 $80 \times 80 \text{ m}^2$, für die TerraSAR-X Stripmap Daten $12 \times 12 \text{ m}^2$ und für die die TerraSAR-X Staring Spotlight Daten $4 \times 4 \text{ m}^2$.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt die Detektion von Verdachtsflächen für Oberflächenbewegungen basierend auf der Methode der differentiellen SAR Interferometrie. Ausgehend vom Aufnahmeprinzip von Radar/SAR über die differentielle Analyse der interferometrischen Phase bis zur eigentlichen Zeitreihenanalyse wird dabei die grundsätzliche Methodik skizziert.

Anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels in der Niederrheinischen Bucht werden mögliche Ergebnisse einer differentiellen, interferometrischen Zeitreihenanalyse dargestellt und anhand von Nivellement-Daten validiert. Bei vergleichbarer Genauigkeit mit Abweichungen im Bereich von $\pm 5 \text{ mm}$ pro Jahr kann durch die Nutzung der Satellitendaten eine wesentlich dichtere sowohl räumliche, als auch zeitliche Auflösung erzielt werden.

Die Anwendung dieser Methode unter Nutzung der aktuellen Sentinel-1 Daten für Österreich kann bereits anhand der vorgestellten Kohärenzanalyse grob abgeschätzt werden. Der TOPS-Aufnahmodus der Sentinel-1 Daten, sowie die Daten-

menge machen neue Ansätze in der beschriebenen Zeitreihenanalyse notwendig.

Auf europäischer Ebene wird derzeit versucht, einen Copernicus-Service aufzusetzen, der ebenfalls basierend auf Sentinel-1 Daten und der beschriebenen Zeitreihenanalyse Bodenbewegungen kartieren soll. Parallel dazu gibt es eine nationale Initiative, die durch methodische Weiterentwicklungen und v. a. durch Einbindung potenzieller österreichischer Nutzer auf die speziellen Bedürfnisse Österreichs eingehen wird.

Danksagung

Die präsentierten Ergebnisse sind Teil bereits abgeschlossener, laufender und aktuell beginnender Projekte im Rahmen des Austrian Space Applications Program (ASAP) unter Förderung der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Die ERS-1/2 Daten wurden von der ESA im Rahmen eines Principal Investigator Antrages bzw. seit 2017 frei zur Verfügung gestellt. Ein spezieller Dank gilt Geobasis NRW für die Bereitstellung der Nivellement-Daten und dem Institut für Geodäsie und Geoinformation der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität Bonn für die Auswertung der Nivellement-Daten.

Referenzen

- [1] ÖGK. Ergebnisse der Arbeitsgruppe „Bodenbewegungen und Grenzkataster“, 2017. Dokumente unter: <http://www.oegk-geodesy.at/projekte.html> zuletzt aufgerufen am 9.4.2018
- [2] Ferretti, A.; Prati, C. & Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39, 8-20
- [3] Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R. & Sansosti, E. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40, 2375- 2383
- [4] Osmanoğlu, B.; Sunar, F.; Wdowinski, S. & Cabral-Cano, E. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier BV, 2016, 115, 90-102
- [5] Sousa, J. J.; Hooper, A. J.; Hanssen, R. F.; Bastos, L. C. & Ruiz, A. M. Persistent Scatterer InSAR: A comparison of methodologies based on a model of temporal deformation vs. spatial correlation selection criteria Remote Sensing of Environment , 2011, 115, 2652 – 2663
- [6] De Zan, F. & A. Monti Guarnieri. 2006. TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(9), 2352–2360
- [7] Gutjahr, K. & Leopold, Ph. Two Years of Sentinel-1 Observations over Austria Poster presentation, FRINGE 2017 Workshop, Aalto University, Helsinki, 2017

Anschrift des Autors

Dr. Karlheinz Gutjahr, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien, Steyrergasse 17, A-8010 Graz.
E-Mail: karlheinz.gutjahr@joanneum.at