

Neues Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“

NICO ADAM¹, RALF REULKE² & VOLKER SPRECKELS³

Zusammenfassung: In letzten Jahren ist das Interesse an der Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung stark gewachsen und kommerzielle und behördliche Dienste stehen zur Verfügung. Das Ziel des neuen DIN-Normungsverfahrens ist es, vereinheitlichte Begriffe, validierte Verfahren und Standards bei den Vermessungsprodukten und der Qualitätssicherung zu etablieren und damit fachkundig und rechtssicher für die betriebliche und behördliche Praxis einsetzbar zu machen. Dieser Beitrag beschreibt den Kontext der Initiative, den Stand der bisherigen Validierungen und Standardisierungen und Beispiele von aktuellen Bodenbewegungsdiensten und Corner-Reflektoren.

1 Einleitung

Die SAR Interferometrie ist ein Fernerkundungsverfahren, mit dem die Topographie und Bewegungen der Erdoberfläche mit Hilfe eines kohärenten Radars bildhaft gemessen werden. Die genaueste Technik für das Bodenbewegungsmonitoring ist die Persistent Scatterer Interferometry (PSI). Diese ermöglicht unter Nutzung von Radar-Satelliten die großflächige und kontinuierliche Vermessung mit Millimeter-Genauigkeit. Auf Grund dieser Messempfindlichkeit gibt es zahlreiche Anwendungen wie z.B. die Detektion und Vermessung von Auswirkungen durch Energiespeicherung, Geothermie, Bergbau, Gas- und Ölförderung sowie von vulkanischen und tektonischen Bewegungen. Daher ist in den letzten Jahren in der Forschung aber auch seitens behördlicher und kommerzieller Nutzer das Interesse an dieser neuen fernerkundlichen Vermessungstechnik stark gewachsen. Unterstützt wird dieser Trend durch die allgemeine Verfügbarkeit von Radar-Satelliten mit synthetischer Apertur (SAR). Die hochaufgelöst erfassenden TerraSAR-X und die großflächig beobachtenden Sentinel-1 Satelliten sind speziell für interferometrische Anwendungen entwickelt worden und bieten eine kontinuierliche und erschwingliche Datenbasis. In Anwendungsprojekten wurden interferometrische Auswertungen bisher für kleine Gebiete aufwändig einzeln beauftragt und oft mit Prototypensoftware realisiert. Die Nutzer solcher Daten haben jedoch beständig den Wunsch geäußert, über vergleichbare Auswertungen, Referenzvermessungen, vereinheitlichte Begriffe und validierte Verfahren zu verfügen. Aus Aspekten der Qualitätssicherung und auch der Akzeptanz wurde daher das Thema „Radar-Norm“ bzw. „InSAR-Norm“ bereits mehrfach von Anwendern aus Industrie sowie Bundes- und Länderbehörden und Kommunen an den Normungsausschuss herangetragen. Mit dem neuen Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“ wird das nun end-

¹ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Methodik der Fernerkundung, Münchner Str. 20, 82230 Weßling, E-Mail: Nico.Adam@dlr.de

² Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Optische Sensorsysteme, Rutherfordstrasse 2, 12489 Berlin, E-Mail: Ralf.Reulke@dlr.de

³ RAG Aktiengesellschaft, SB BG Standort-/Geodienste - BG N Nachbergbau, Wilhelmstrasse 98, 44649 Herne, E-Mail: Volker.Spreckels@rag.de

lich möglich (REULKE 2015). Nutzer sind Behörden, Kommunen, die Wirtschaft und die Bevölkerung. Die Kenntnis über die Stabilität des Untergrundes bietet ein sehr breites Anwendungsspektrum für praktisch alle Entscheidungsträger, die auf Geodaten angewiesen sind, von der Raum- und Verkehrswegeplanung bis zum Küsten- und Hochwasserschutz.

2 Stand der Validierungen und Standardisierungen

Die satellitengestützte SAR Interferometrie hat sich in den 90-er Jahren mit den ERS-Satelliten schnell in der Wissenschaft etabliert (MASSONNET et al. 1994; GOLDSTEIN 1995; ZEBKER et al. 1997). Im Februar 2000 wurde mit der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) diese Technik zum ersten Mal zur operationellen globalen (Breitengradbereich 54°S - 60°N) 3D-Vermessung der Erde eingesetzt (FARR et al. 2007; WERNER 2001; RABUS et al. 2003). Das *Digital Elevation Model* (DEM) war das Hauptmissionsziel, daher ist es durch die in der Raumfahrt üblichen Spezifikations-, Design- und Reviewprozesse standardisiert. Seit 2015 ist das SRTM DEM mit einer Auflösung von einer Bogensekunde (ca. 25 m) in Länge und Breite frei verfügbar. Die dadurch erfolgte zahlreiche Nutzung hat diesen Datensatz zusätzlich validiert. Die deutsche TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements*) Mission hatte zum Ziel, eine vollständige und noch genauere 3D-Vermessung der Erde zu liefern (KRIEGER et al. 2007; EINEDER et al. 2013; HUBER et al. 2007). Dieses DEM ist 2016 mit einer Pixelgröße von 0,4 Bogensekunden (ca. 12 m) fertig gestellt worden und steht seit 2018 mit einer reduzierten Pixelgröße von 3 Bogensekunden (ca. 90 m) für die wissenschaftliche Nutzung kostenfrei zur Verfügung (GEOSERVICE DLR 2018). Die hochspezialisierten interferometrischen DEM Missionen setzen und werden selbst durch die umfangreiche Datennutzung Standards.

Anders ist es mit den neu entwickelten Anwendungen der SAR Interferometrie. Hier ist besonders die interferometrische Bodenbewegungserfassung zu nennen, die in der Forschung aber auch auf der behördlichen und kommerziellen Nutzerseite starkes Interesse geweckt hat. Der Grund ist der Durchbruch in der Genauigkeit der relativen Bodenbewegungsbestimmung mit ca. einem Millimeter pro Jahr, der durch FERRETTI et al. (1999; 2000; 2001) mit der PSI Technik erzielt wurde. Die PSI gibt ein Konzept vor, um typische städtische Gebiete mit vorhandenen Daten, einem einheitlichen Vorgehen und bisher unerreichter Genauigkeit zu vermessen. Die ESA hatte das Potential dieser Technik erkannt und auf der FRINGE 2003 entschieden, eine Validierung der unabhängig entwickelten Verfahren d.h. der *Permanent Scatterer*TM Interferometrie von FERRETTI et al. (1999; 2000; 2001), dem *Small Baseline Subset* (SBAS) *algorithm* von BERNARDINO et al. (2002), der *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) von WERNER et al. (2003) und andere PSI Entwicklungen von z.B. HANSEN et al. (2005), ADAM et al. (2003) bzw. KAMPES & ADAM (2005) zu fördern. Die Abbildung (Abb. 1) visualisiert einen Ausschnitt des PSIC4 Testgebiets mit dem Gardanne Bergbauggebiet. Die unabhängige Validierung sollte Bedenken bei den Endnutzern, die keine Radarspezialisten sind, ausräumen (RAUCOULES et al. 2007). Eine weitere SBAS-Entwicklung ist das „Intermittent Small Baseline Subset“ (ISBAS) Verfahren (LANARI et al. 2007).

Das Nachfolgeprojekt der ESA hieß Terrafirma und war ein *service element* im *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) Programm. Hauptziel des Projektes war es, einen Europa-weiten *ground motion hazard information service* (Gefahreninformationsdienst bezüg-

lich Bodenbewegungen) in jedem der damaligen 27 EU Staaten anzubieten. Die generierten Bodenbewegungsprodukte der vier *operational service provider* (OSPs) sind online kostenfrei verfügbar (TERRAFIRMA 2005 - 2015). Das Hauptziel wurde durch eine Validierung unterstützt, um die Zuverlässigkeit und Präzision der PSI Bewegungsmessungen zu demonstrieren und Standards bei den PSI Produkten und der Qualitätssicherung zu etablieren (ADAM et al. 2010). Dazu wurde eine Product Validation Workgroup (PVW) gebildet, die zwei sich gegenseitig ergänzende Validierungsstrategien umsetzte. Die eine Validierungsmethode war die Product Validation, welche die geocodierten Ergebnisse mit Referenzdaten (ground truth) verglich (HANSSEN et al. 2008; CROSETTO et al. 2009). Die andere war die Process Validation, welche für die PSI Technik bis dahin noch nicht angewendet wurde und zudem eine Zertifizierung der PSI Prozessierungssysteme als langfristig wirkende Qualitätssicherung beinhaltete (ADAM et al. 2009). Im Rahmen dieser Process Validation wurden Zwischenprodukte der PSI Verarbeitungen mit der DLR Referenzprozessierung verglichen und validiert. Die Abbildung (Abb. 2) visualisiert das Testgebiet mit dem DLR Referenzdatensatz. Im Rahmen dieses Projektes haben ADAM & PARIZZI (2008) auch eine kurzfristig wirkende Qualitätssicherung erarbeitet. Die Qualitätsparameter einer typischen Verarbeitung werden dazu in einem Quality Control Protocol zusammengeführt und dem Endnutzer mit dem PSI Datensatz als standardisierter Teil des Prozessierungsreports bereitgestellt. Die Abbildung (Abb. 3) veranschaulicht die Komponenten des ganzen Terrafirma Services und die jeweiligen Validierungsarten. Die Abbildung (Abb. 4) visualisiert, dass alle Prozessschritte im Ablauf des Terrafirma Bodenbewegungsservices durch die Kurzzeit- und Langzeit-Validierungen abgedeckt sind.



Abb. 1: Ausschnitt des PSIC4 Testgebiets mit dem Gardanne Bergbaugebiet, Quelle: Abbildung 9 in KAMPES & ADAM (2005)

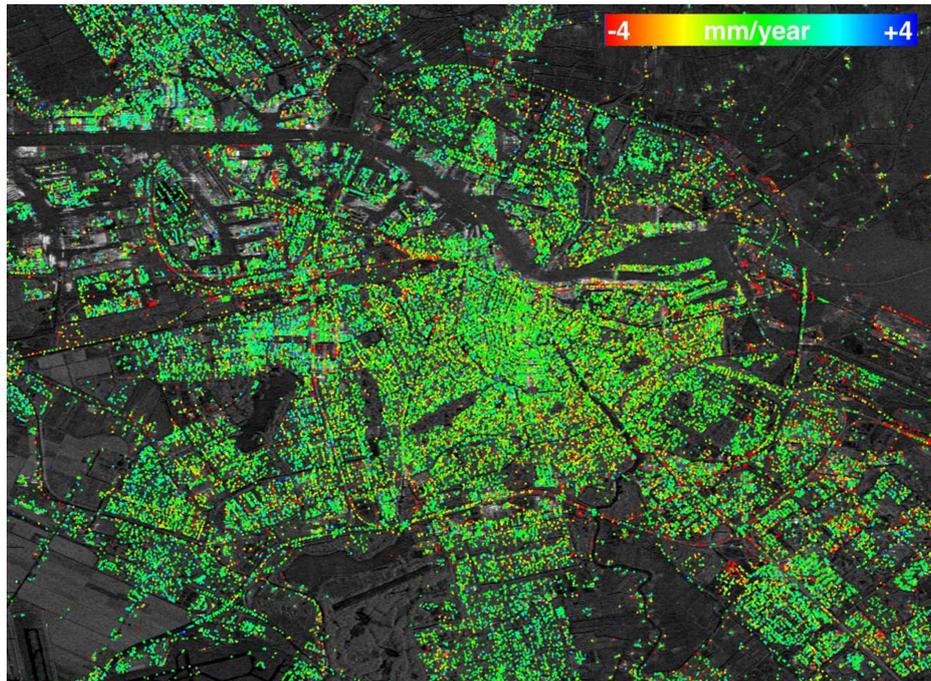


Abb. 2: DLR Referenz-Prozessierung für die Produkt- und Prozessvalidierung (TerraFirma Testgebiet Amsterdam)

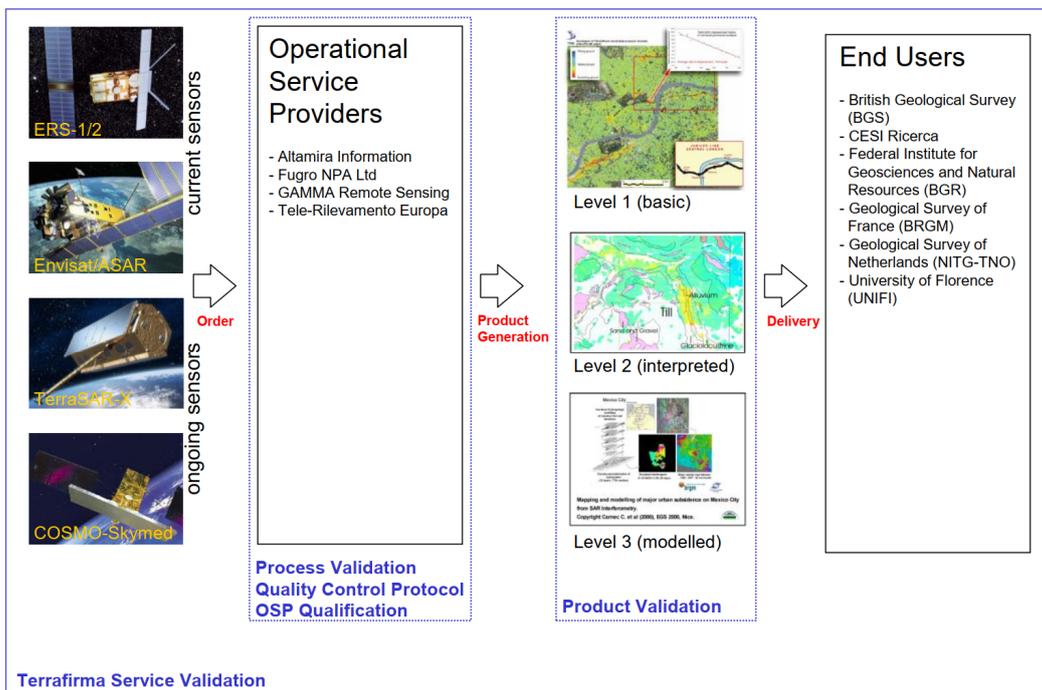


Abb. 3: Komponenten des ganzen TerraFirma Services und die jeweiligen Validierungsarten, Quelle: Abbildung 1 in ADAM et al. (2010)

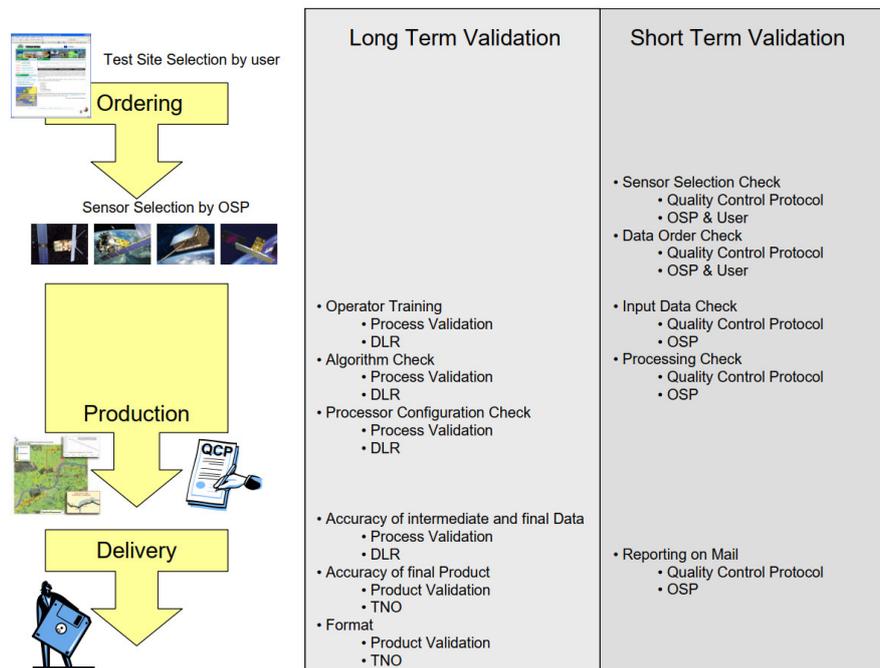


Abb. 4: Serviceelemente (gelb) für L1 Basisprodukte und die Beiträge der Langzeit- und Kurzzeit-Validierung, Quelle Abbildung 3 in ADAM et al. in (2010)

Unabhängig von den internationalen Aktivitäten, gab es auch nationale Initiativen z.B. mit dem Arbeitspapier des DEUTSCHER MARKSCHEIDER-VEREIN E.V. (2013). Die formulierten Grundsätze und Empfehlungen zum Einsatz der Radarinterferometrie sollen diese Vermessungstechnik fachkundig und rechtssicher für die betriebliche und behördliche Praxis einsetzbar machen. Die Grundsätze beinhalten eine Kurzbeschreibung des Messverfahrens, die Planung eines Radarinterferometrieprojektes, die Dokumentation der grundlegenden Projektinformationen, der genutzten Satellitendaten und der Prozessierung aber auch der Qualitätskontrolle. Diesen Grundsätzen hat sich der Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG) angeschlossen (BVEG 2018).

Beim Deutschen Institut für Normung (DIN) wird seit 2015 im Rahmen des Normungsausschuss NA 005-03-02 AA „Photogrammetrie und Fernerkundung“ die Norm 18740 Radarinterferometrie arrangiert (BALTRUSCH & REULKE 2017). Die Themen für die neue InSAR-Norm sind

- Sensoren, Prozessoren, Algorithmen z.B. Informationen zu den und eindeutige Festlegung der diversen Verfahren (z.B. InSAR, SBAS, ISBAS, PSI, SAR-Tomographie)
- Datenverfügbarkeit (z.B. ERS-1/2, Envisat/ASAR, TerraSAR-X, Sentinel-1)
- Anforderungen an die Prozessoren
- Präzise Geolokalisierung und Georeferenzierung von radarinterferometrischen Daten
- Genauigkeitsanforderungen an die Georeferenzierung z.B. über Corner-Reflektoren
- Zusätzliche notwendige Korrekturen (z.B. Atmosphäre)

3 Aktuelle Beispiele von Bodenbewegungsdiensten

Neue Normungsanforderungen ergeben sich aus der allgemeinen Verfügbarkeit von Bodenbewegungsdaten. Hier sind, behördlich beauftragte und damit geprüfte Vermessungen und unabhängig promotete Daten zu unterscheiden. Behördlich hat Italien (COSTANTINI et al. 2017) aus ERS, Envisat und COSMO-SkyMed Daten sein ganzes Territorium bezüglich Bodenbewegungen vermessen. Auch in den Niederlanden (NETHERLANDS GEODETIC COMMISSION 2018) und in Deutschland (BGR 2019) ist jeweils eine solche landesweite Vermessung realisiert worden. In Deutschland hat die BGR im Zeitraum von 2016 bis 2019 den Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) umgesetzt (KALIA et al. 2017; KALIA & FREI 2019). In diesem Projekt werden Copernicus Daten der Satelliten Sentinel-1A und B mit dem vom DLR entwickelten PSI *Wide Area Processing* (WAP) (ADAM et al. 2011) durch die BGR in einem WebGIS kostenfrei bereitgestellt. Die Datennutzer werden mit Nutzungshinweisen (KALIA 2019) bei der Verwertung der Daten unterstützt. Mit dem DLR Prozessierungssystem ist im Rahmen von Pilotstudien und eigenständigen Entwicklungsarbeiten auch eine Bodenbewegungskarte der 90-er Jahre, basierend auf ERS Daten, generiert worden. Die beiden erstellten landesweiten Bodenbewegungskarten sind in der Abbildung (Abb. 5) veranschaulicht. Weitere unabhängige Bodenbewegungsprozessierungen stellt die Firma Geomatic Ventures Limited (GVL) von Großbritannien (GVL 2018a), den Niederlanden (GVL 2018b) und Deutschland (GVL 2018c) unter Verwendung des *Intermittent Small Baseline Subset* (ISBAS) Verfahrens (SOWTER et al. 2013) kostenfrei bereit.

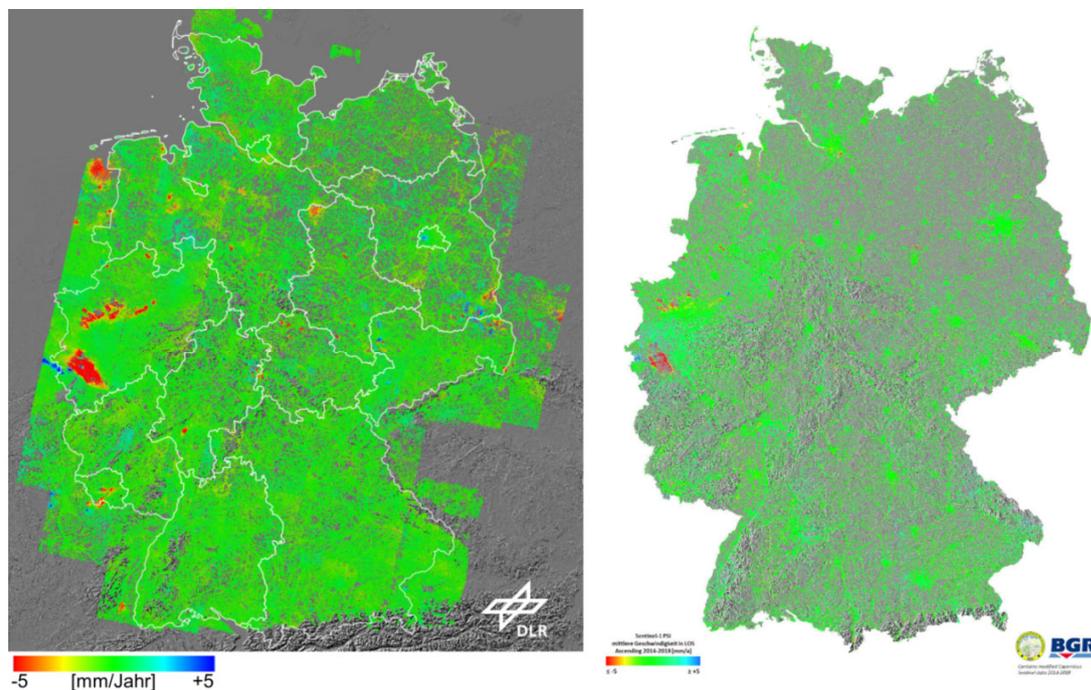


Abb. 5: links: PSI Prozessierung mit ERS Daten der 90-er Jahre. (ADAM et al. 2010); rechts: PSI Prozessierung mit Sentinel-1A/B Daten der Jahre 2014-2019 (KALIA, & FREI 2019)

Zukünftige Bodenbewegungsdienste sind national aber auch im europäischen Rahmen als Copernicus Service Element geplant (Frei 2017). Vertikale Bodenbewegungen sollen mit den Bodenbewegungskatastern der Vermessungsverwaltungen der Länder Nordrhein-Westfalen und Saarland zur Verfügung gestellt werden. In NRW wird das Bodenbewegungskataster NRW nach derzeitigem Stand 2021 online gehen (RIECKEN et al. 2019). Im Jahr 2020 werden vom saarländischen Landesamt für Geoinformation, Vermessung und Landentwicklung (LVGL) im Rahmen des „Saarländischen Bodenbewegungskataster“ (SaarBoBeKa) eigene PSI-Bodenbewegungsanalysen bereitgestellt. Hier ist vorgesehen, die Radarsatellitendaten aus den Ascending- und den entsprechenden Descending-Orbits zu kombinieren (YIN & BUSCH, 2019), was über Multisensor-Stationen (MSST) erfolgen wird (Abb. 6), die derzeit im Saarland errichtet werden (Abb. 7).

4 Corner Reflektoren

Corner Reflektoren (CR) erlauben die Validierung der Vermessung und den Abgleich der relativen interferometrischen Bewegungsänderungen mit zeitlich und örtlich ausreichend dichten Referenzdaten für Lage- und Höhenveränderungen (relative Lagerung). Letztendlich folgt die absolute Lagerung in einem Lage- und Höhenkoordinatensystem, was mit höchster Genauigkeit nur über Corner-Reflektoren mit einem Lage- und Höhenanschluss an das jeweilige Messnetz zu gewährleisten ist.

Das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) hat bereits einige GNSS-Standorte (Hof, Bautzen, Lindenberg, Bremgarten) mit Corner-Reflektoren erweitert, wobei je ein CR für den Ascending- und ein CR für den Descending-Orbit eingerichtet wurde (Abb. 8). Das BKG baut diese Stationen weiter aus, wobei je nach Standorteignung passive Corner-Reflektoren oder die Installation von aktiven elektronischen *Compact Active Transponder* (CAT) vorgesehen ist (FRIEDLÄNDER & LIEBSCH 2019).

Am Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung (LVGL) des Saarlands und der RAG sind dafür im Rahmen des „Saarländischen Bodenbewegungskataster“ Doppel-Corner-Reflektoren (Doppel-CR) für die Multisensor-Stationen (MSST) entwickelt worden. Die MSST bestehen aus einem ca. 2 m × 2 m × 2 m mächtigen Stahlbetonfundament, welches einen massiven Doppel-CR von 2 m Durchmesser und 1 m Kantenlänge aus 10 mm Edelstahlplatten, eine permanent registrierende GNSS-Station mit kalibrierter 2-Frequenz Choking-Antenne zum Anschluss an das amtliche SAPOS-Netz und mehrere Nivellementpunkte zum Anschluss an die Höhenmesslinien der Länder birgt. Testmessungen konnten am RAG Standort Duhamel bei Saarlouis an einem Prototypen des Doppel-CR und einem benachbarten einfachen CR erfolgen. Der Doppel-CR wurde im April 2018 mobil auf einer Palette belassen, um Änderungen der Ausrichtung, Verkipnungen und eventuelle GNSS-Mehrwegeeffekte untersuchen zu können. Der einfache CR wurde im Dezember 2010 in descending Ausrichtung gesetzt. Die Untersuchungen zu Sentinel-1 und TerraSAR-X Satellitendaten und haben ergeben, dass der Doppel-CR sowohl in Sentinel-1 asc/desc und TerraSAR-X ascending gut erkennbar ist. Langzeit-statische GNSS-Messungen des LVGL über und neben dem Doppel-CR sowie an unterschiedlichen Standorten ergaben, dass es keine signifikanten Mehrwegeeffekte durch den Doppel-CR auf die GNSS-

Messung gibt. Somit sind die MSST zur Validierung und Referenzierung aller fernerkundlichen und terrestrischen Messdaten geeignet (SPRECKELS et al. 2020).

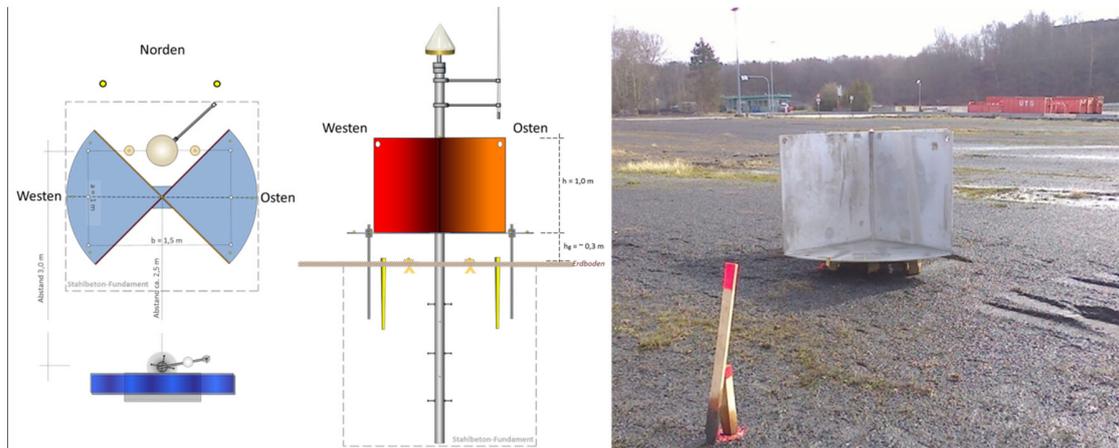


Abb. 6: Konstruktionsskizze einer RAG Multisensor-Referenzstation (MSST) aus Doppel-CR, GNSS-Monitoringstation, Nivellementanschlussspunkten, Datenübertragung, autarker Energieversorgung: Aufsicht (links), Seitenansicht von Süden (Mitte). RAG Doppel-CR für Testreihen am Standort Duhamel, Saarland (rechts). (Mit freundlicher Genehmigung der RAG Aktiengesellschaft)

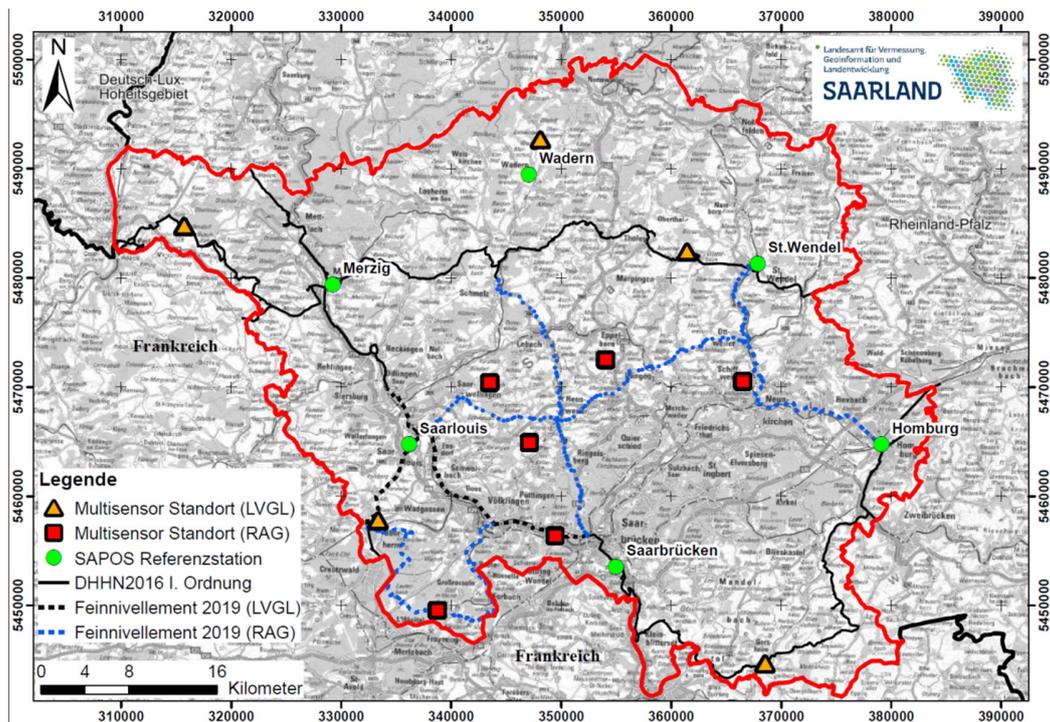


Abb. 7: Umsetzung des Monitoringkonzepts SaarBoBeKa im Saarland (Quelle: SPRECKELS et al. 2020)



Abb. 8: Doppel-CR des BKG: Konstruktionsskizze (links), Einmessung (rechts) (Mit freundlicher Genehmigung vom BKG)

5 Fazit & Ausblick

Das Interesse an der Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung ist in den letzten Jahren stark gewachsen und erreicht inzwischen Nutzer ohne Radar- und Vermessungserfahrungen. Der Grund liegt in der kostengünstigen oder kostenfreien Verfügbarkeit kommerzieller und behördlicher Dienste. Das neue Normungsverfahren soll die Lücke zwischen den Experten d.h. den Service Providern und den Anwendern schließen. Daher ist es das Ziel, vereinheitlichte Begriffe, validierte Verfahren und Standards bei den Vermessungsprodukten aber auch bei der Qualitätssicherung zu etablieren. Diese DIN-Initiative stärkt und untermauert alle bisherigen Entwicklungen, stärkt das Vertrauen der Nutzer in diese neue Technik und macht die interferometrische Bodenbewegungserfassung rechtssicher und in der betrieblichen und behördlichen Praxis alltäglich.

Dieser Beitrag soll auch auf das neue Normungsverfahren „InSAR – Radarinterferometrie für die Bodenbewegungserfassung“ aufmerksam machen, um interessierte Kreise für Beiträge anzusprechen und neue Experten für diese Initiative einzuladen.

6 Literaturverzeichnis

- ADAM, N., KAMPES, B. M., EINEDER, M., WORAWATTANAMATEEKUL, J. & KIRCHER, M., 2003: The development of a scientific permanent scatterer system. ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space **6**, <https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/adam.pdf>.
- ADAM, N. & PARIZZI, A., 2008: Terrafirma Quality Control Protocol for Level 1 Products”, Terrafirma Project Document, **1(5)**, 1-61.
- 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(1)**, 59-65.

- ADAM, N., PARIZZI, A. & KAMPES, B., 2010: TerraFirma Service Validation Protocol C5. ESA GMES TerraFirma Technical Note V.37, ESRIN/Contract no. 17059/03/I-IW, 1-139.
- ADAM, N., RODRIGUEZ GONZALEZ, F., PARIZZI, A. & LIEBHART, W., 2011: Wide Area Persistent Scatterer Interferometry: Algorithms and Examples. In Proceedings of Fringe, 1-5.
- BALTRUSCH, S. & REULKE, R., 2017: DIN-Normungsarbeit in der Photogrammetrie und Fernerkundung – Stand und Perspektiven. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 26, T. Kersten (Hrsg.), 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 7.-10. März 2017 in Würzburg, Tagungsband auf CD-ROM, 280-287.
- BERARDINO, P., FORNARO, G., LANARI, R. & SANSOSTI, E., 2002: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **40**(11), 2375-2383.
- BGR, 2019: WebGIS BodenBewegungsdienst Deutschland. online: <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de/mapapps/resources/apps/bbd/index.html?lang=de>.
- BVEG, 2018: Höhenüberwachung durch Radarinterferometrie. online: <https://www.bveg.de/Erdgas/Erdgasspeicher/Radarinterferometrie>.
- COSTANTINI, M., FERRETTI, A., MINATI, F., FALCO, S., TRILLO, F., COLOMBO, D., NOVALI, F., MALVAROSA, F., MAMMONE, C., VECCHIOLI, F., RUCCI, A., FUMAGALLI, A., ALLIEVI, J., CIMINELLI, M. G. & COSTABILE, S., 2017: Analysis of surface deformations over the whole Italian territory by interferometric processing of ERS, Envisat and COSMO-SkyMed radar data. *Remote Sensing of Environment* **202**, 250-275, doi: 10.1016/j.rse.2017.07.017.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., JUNGNER, A. & CRIPPA, B., 2009: Persistent Scatterer Interferometry: potential and limits. ISPRS Hannover Workshop 2009 High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, ISPRS Archives – Volume XXXVIII-1-4-7/W5.
- EINER, M., BAMLER, R., CONG, X., GERNHARDT, S., FRITZ, T., ZHU, X., BALSS, U., BREIT, H., ADAM, N. & FLORICIOIU, D., 2013: Globale Kartierung und lokale Deformationsmessungen mit den Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* **1**, 75-84.
- FARR, T. G., ROSEN, P.A., CARO, E., CRIPPEN, R., DUREN, R., HENSLEY, S., KOBRICK, M., PALMER, M., RODRIGUEZ, E., ROTH, L., SEAL, D., SHAFFER, S., SHIMADA, J., UMLAND, J., WERNER, M., OSKIN, M., BURBANK, D. & ALSDORF, D., 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.* **45**(RG2004), doi:10.1029/2005RG000183.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 1999: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium* **3**, 1528-1530.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 2000: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **38**(5), 2202-2212, doi: 10.1109/36.868878.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 2001: Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **39**(1), 8 - 20, doi: 10.1109/36.898661.
- FREI, M., 2017: European Ground Motion Service (EU-GMS) - A proposed Copernicus service element. online: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-white-paper>.

- FRIEDLÄNDER, S. & LIEBSCH, G., 2019: Monitoring geodätischer Infrastruktur – Das Potential der SAR-Interferometrie für das Vermessungswesen. Vortrag auf dem DIN-Normungsausschuss Photogrammetrie und Fernerkundung, Berlin, 08.10.2019.
- DEUTSCHER MARKSCHEIDER-VEREIN E.V., 2013: Grundsätze zum Einsatz von satellitengestützten Verfahren der Radarinterferometrie zur Erfassung von Höhenänderungen. online: https://www.dmv-ev.de/images/stories/uploads/DMV_Radar_interferometrie_Grundsätze_2013_09_16.pdf.
- GEOSERVICE DLR, 2018: The TanDEM-X 90m Digital Elevation Model, online: <https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/>.
- GOLDSTEIN, R., 1995: Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical Research Letters* **22**, 2517-2520.
- GVL, 2018a: United Kingdom Relative Deformation Map. online: <https://mangomap.com/geomatic-ventures-limited/maps/72883/united-kingdom-relative-deformation-map>.
- GVL, 2018b: Netherlands Relative Deformation Map. online: <https://mangomap.com/geomatic-ventures-limited/maps/80063/netherlands-relative-deformation-map-2016-2018#>.
- GVL, 2018c: Germany Relative Deformation Map. online: <https://mangomap.com/geomatic-ventures-limited/maps/76398/germany-relative-deformation-map>.
- HANSEN, R. F., VAN LEIJEN, F., KETELAAR, G., MARINKOVIC, P. S. & GEHLOT, S., 2005: PSIC4: PSI-processing over a validation test site. applicability report. TU Delft Technical Report, ESA Contract Nr. 18707/04/I-LG.
- HANSEN, R. F., VAN LEIJEN, F. J., VAN ZWIETEN, G. J., BREMMER, C., DORT-LAND, S. & KLEUSKENS, M., 2008: Validation of existing processing chains in TerraFirma stage 2; Product validation: validation in the Amsterdam and Alkmaar area, in GMES TerraFirma Report, ESRIN/contract No. 19366/05/I-E, 1-85.
- HUBER, M., WESSEL, B., HABERMEYER, M. & ROTH, A., 2007: Quality of Orthorectified TerraSAR-X Products. IEEE 2007 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 3937-3937 doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423707.
- KALIA, A. C., FREI, M. & LEGER, T., 2017: A Copernicus downstream-service for the nationwide monitoring of surface displacements in Germany. *Remote Sensing of Environment* **202**, 234-249.
- KALIA, A. C. & FREI, M., 2019: BodenBewegungsdienst Deutschland – BBD. online: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Fernerkundung/BodenBewegungsdienst_Deutschland/bodenbewegungsdienst_deutschland_node.html.
- KALIA, A., 2019: Nutzungshinweise BBD WebGIS. Version 01, online: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Fernerkundung/Downloads/nutzungshinweise-bbd-webgis.html?nn=12782094
- KAMPES, B. & ADAM, N., 2005: The STUN algorithm for persistent scatterer interferometry. Proceedings of FRINGE, **SP-610**, 1-14, https://elib.dlr.de/110190/1/kampes_fringe05.pdf
- KRIEGER, G., MOREIRA, A., FIEDLER, H., HAJNSEK, I., WERNER, M., YOUNIS, M. & ZINK M., 2007: TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **45**(11), 3317-3341, doi: 10.1109/TGRS.2007.900693.

- LANARI, R., CASU, F., MANZO, M., ZENI, G., BERARDINO, P., MANUNTA, M. & PEPE, A., 2007: An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 637-661, doi: 10.1007/s00024-007-0192-9.
- MASSONNET, D., FEIGL, K., ROSSI, M. & ADRAGNA, F., 1994: Radar interferometric mapping of deformation in the year after the Landers earthquake. *Nature* **369**, 227-230.
- NETHERLANDS GEODETIC COMMISSION, 2018: The Netherlands Bodemdalingskaart. online: <https://bodemdalingskaart.nl/portal/index>.
- RABUS, B., EINEDER, M., ROTH, A. & BAMLER, R., 2003: The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – A New Class of Digital Elevation Models Acquired by Spaceborne Radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **57**(4), 241-262, doi: 10.1016/S0924-2716(02)00124-7.
- RAUCOULES, D., BOURGINE, B., DE MICHELE, M., LE COZANET, G., CLOSSET, L., BREMMER, C., VELDKAMP, H., TRAGHEIM D., BATESON, L., CROSETTO, M. & AGUDO, M., 2007: Persistent Scatterers Interferometry Independent Validation and Intercomparison of Results – Executive Summary. ESA Report BRGM/RP-55640-FR.
- REULKE, R., 2015: Standardisierung und Qualitätssicherung. Arbeitskreis der Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (DGPF), online: <https://www.dgpf.de/aks/sqs.html>.
- RIECKEN, J., KRICKEL, B., GEFELLER, V. & REIFENRATH, P., 2019: Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In *Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement (zfv)* **144**, 354-361, doi: 10.12902/zfv-0281-2019.
- SPRECKELS, V., SCHULZ, M., NIEMEIER, W., ENGEL, T., SCHÄFER, F., KEMKES, E., RÜFFER, J., TENGEN, D., BECHERT, S., SCHLIENKAMP, A., DROBNIEWSKI, M., MÜLLER, M. & SCHMITT P., 2020: GNSS, Nivellement und Radar – einheitliche Multisensor-Referenzstationen zur Überwachung von Bodenbewegungen in ehemaligen Bergbaubereichen. Tagungsband GeoMonitoring 2020.
- SOWTER, A., BATESON, L., STRANGE, P., AMBROSE, K. & SYAFIUDIN, M. F., 2013: DInSAR estimation of land motion using intermittent coherence with application to the South Derbyshire and Leicestershire coalfields. *Remote Sensing Letters*, **4**(10), 979-987.
- TERRAFIRMA, 2005-2015, Projektwebseite, <http://www.europe-geology.eu/terrafirma/#mapobj>.
- WERNER, M., 2001: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), Mission overview, *J. Telecomm.* **55**, 75-79.
- WERNER C., WEGMÜLLER, U., STROZZI, T. & WIESMANN, A., 2003: Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proc. IGARSS 2003*.
- YIN, X. & BUSCH, W., 2018: Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. Tagungsband GeoMonitoring, 119-138.
- ZEBKER, H. A., ROSEN, P. A. & HENSLEY, S., 1997: Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **102**(B4), 7547-7563.