

25 Jahre Bodenbewegungen in der Niederrheinischen Bucht – Ein kombinierter Ansatz aus D-InSAR und amtlichen Nivellementen

Christina Esch, Joël Köhler, Karlheinz Gutjahr und Wolf-Dieter Schuh

Zusammenfassung

Die Erzeugung von Deformationszeitreihen aus differentiellen SAR Interferometrie (D-InSAR) Bildern, die mehrere Radarmissionen umfassen, stellt eine Herausforderung dar. Da die SAR-Aufnahmen unterschiedlicher Missionen im Allgemeinen nicht untereinander korreliert werden können, entsteht für jede Satellitenmission ein eigener Bildstapel. Aufgrund des differentiellen Charakters der Beobachtungen ist es notwendig, einen Bezugszeitpunkt für die Zeitreihen zu wählen, die aus radarinterferometrischen Auswertungen abgeleitet werden. Da sich die Missionen zudem oftmals zeitlich nicht überlappen, ist eine Zusammenführung der Zeitreihen nicht ohne Weiteres möglich. Außerdem unterscheidet sich die Anzahl und Lage der auswertbaren Punkte für jede Satellitenmission. Bei der hier präsentierten Methode wird eine inverse Distanzgewichtung genutzt, um zunächst D-InSAR-Höhenänderungen an vorliegenden Nivellementpunkten zu berechnen. Anschließend werden diese relativen Zeitreihen auf den amtlichen Nivellementdaten gelagert, um eine zusammenhängende Zeitreihe zu generieren. Somit können aus unabhängigen D-InSAR-Auswertungen höher aufgelöste Zeitreihen an den Nivellementpunkten erzeugt werden.

Summary

Generating deformation time series based on differential SAR interferometry (D-InSAR) from multiple satellite missions is a challenging task. Generally, it is not possible to correlate the SAR acquisitions of different missions. Therefore, each satellite mission yields an independent D-InSAR stack. Due to the differential character of the observations, a reference date is needed for each D-InSAR time series. Moreover, the individual missions often do not overlap in time. This makes the combination of the deformation time series more difficult. Additionally, the number and positions of analysed points differ for each D-InSAR stack.

In this article an inverse distance weighting is used to estimate D-InSAR deformations at the coordinates of all available leveling points. Afterwards, these relative time series are referred to the leveling data in order to generate the combined time series of the multiple satellite missions.

Consequently, the presented method uses independent D-InSAR analyses to obtain a deformation time series with a higher temporal resolution at the leveling points.

Schlüsselwörter: Bodenbewegungen, Nivellement, D-InSAR, SBAS, Multimissionsauswertung

1 Einleitung

Deformationen der Erdoberfläche, die einen natürlichen (z.B. Plattentektonik) oder anthropogenen (z.B. Gewinnung von Rohstoffen) Ursprung haben, können mit differentiellen SAR Interferometrie (D-InSAR) Bildern bestimmt werden. Ein Vorteil gegenüber der klassischen terrestrischen Nivellementmessung ist, dass mit D-InSAR-Daten die Deformationen der Erdoberfläche mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung erfasst werden können.

Die Auswertung von radarinterferometrischen Zeitreihen zur Detektion von großräumigen Bodenbewegungen gehört heute schon zur wissenschaftlichen Praxis. Zu den Anwendungen zählt beispielsweise das Monitoring von vulkanisch aktiven Regionen. Ein sehr prominentes Beispiel sind hier die Phlegräischen Felder und der Vesuv (Berardino et al. 2002, 2004; Casu et al. 2006; Pepe et al. 2005, 2011; Pepe und Lanari 2006). Auch Untersuchungen von Bodensenkungen und -hebungen durch anthropogene Einflüsse, wie den Kohleabbau oder Gas einspeicherungen, sind vielfach in der Literatur zu finden (Spreckels et al. 2001; Spreckels 2002; Haghghi und Motagh 2017; Krickel 2018). Bei all diesen Anwendungen werden jedoch stets einzelne Satellitenmissionen ausgewertet.

Die Ähnlichkeit der Sensoren der ERS-1/-2 (European Remote Sensing Satellites) und Envisat (Environmental Satellite) Satelliten erlaubt es, sogenannte Cross-Interferogramme missionsübergreifend zu berechnen (Colesanti et al. 2003). Dies ermöglicht prinzipiell, Zeitreihen aus verschiedenen Satellitenmissionen bereits auf Ebene der Interferogramme miteinander zu verknüpfen und somit beide Missionen gemeinsam auszuwerten. Allerdings erfordern die unterschiedlichen Orbits und leicht abweichenden Frequenzbänder spezielle Methoden.

Pepe et al. (2005) nutzen dagegen die zeitliche Überlappung der ERS-1/-2- und Envisat-Daten. Dazu werten sie die ERS-2-Daten bis Mai 2004 aus, wobei die Aufnahmen seit 2001 aufgrund eines defekten Gyroskops nur noch bedingt nutzbar sind. Dadurch entsteht ein kleiner Überlappungsbereich zur Nachfolgemission Envisat, die 2002 startete. In der Auswertung werden alle Interferogramme auf eine gemeinsame Szene koregistriert und ein identisches Pixelgitter wird gewählt. Somit ist sicher gestellt, dass die ausgewerteten Rückstreuer identisch sind. Die Generierung der Interferogramme sowie das Phase Unwrapping werden jedoch für die ERS-1/-2- und

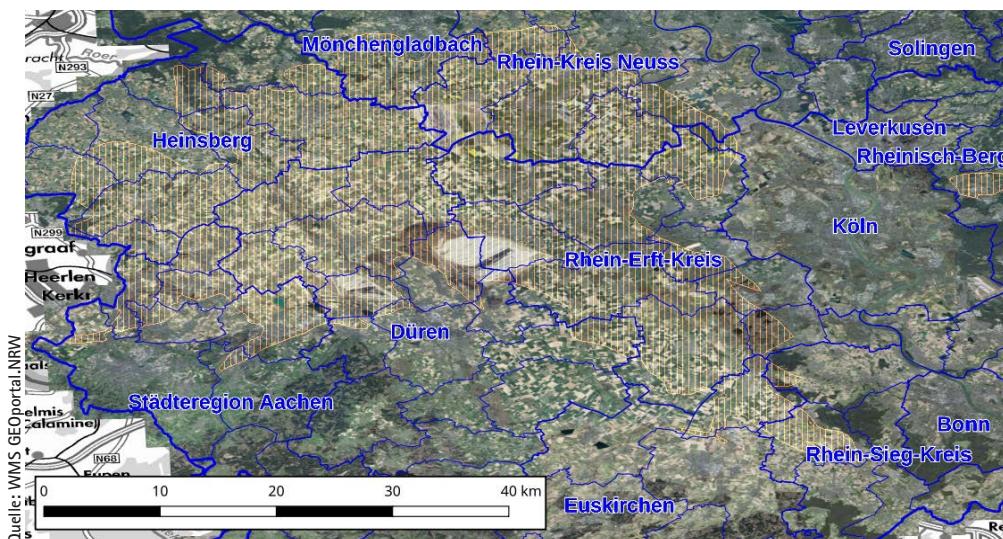


Abb. 1:
Gebietsübersicht mit Darstellung des Bergbaugebiets (gelbe Schraffur) in der Niederrheinischen Bucht

Envisat-Mission unabhängig durchgeführt. Durch die zeitliche Überlappung und die Annahme von stückweise linearen Bewegungen können die beiden Datensätze anschließend zusammengefügt werden.

In Caro Cuenca et al. (2010) ist diese zeitliche Überlappung durch die Schätzung eines Bewegungsmodells nicht notwendig. In einem Ausgleich nach Parametern wird der zeitliche Offset der Deformation, der zwischen zwei unabhängigen D-InSAR-Auswertungen von ERS-1/-2- und Envisat-Daten besteht, durch ein (globales) Polynom und zusätzliche Offsetparameter bestimmt. Dies setzt jedoch voraus, dass das zu erwartende Bewegungsverhalten bekannt ist und sich durch ein Polynom parametrisieren lässt. Damit die ausgewerteten Rückstreuer an der gleichen Koordinate vorliegen, werden die bestimmten Deformationen zunächst mittels Ordinary Krigings interpoliert. Dieser Ansatz wird beispielsweise von Fuhrmann et al. (2015) genutzt, um interferometrische Daten aus der ERS-1/-2- und Envisat-Mission zu verknüpfen. Diese werden anschließend mit Nivellement und GNSS (Global Navigation Satellite System) Daten kombiniert, um geodynamisch bedingte Bodenbewegungen des Oberrheingrabens zu detektieren. Dies geschieht u.a. unter der Annahme, dass tektonische Verschiebungen, deren Geschwindigkeiten im Untersuchungszeitraum (1870–2011) konstant sind, ein lineares Bewegungsverhalten aufweisen. Somit werden im Besonderen D-InSAR-Punkte vernachlässigt, deren Bewegungen auf kurzeitige Variationen, z.B. anthropogene Einflüsse, zurückzuführen sind, da diese ein nicht-lineares Verhalten aufweisen. Es sei angemerkt, dass gerade diese nicht-linearen Deformationen durch anthropogene Einflüsse charakteristisch für die Bodenbewegungen in dem hier betrachteten Untersuchungsgebiet (siehe Abb. 1) sind.

Der hier präsentierte Ansatz nutzt externe Daten in Form von amtlichen Leitnivelllements, um mehrere Einzelmissionsauswertungen zusammenzufügen. Durch die Verknüpfung der Einzelmissionen sollen zeitlich höher aufgelöste Zeitreihen an den Nivellementpunkten erzeugt werden. Dazu werden in diesem Beitrag fünf Datensätze

von Radaraufnahmen aus vier verschiedenen Satellitenmissionen (ERS-1/-2, Envisat, TerraSAR-X und Sentinel-1A) genutzt, die jeweils das Gebiet der Niederrheinischen Bucht abbilden. In einer Vorverarbeitung werden aus diesen Datensätzen mittels unabhängiger SBAS (Small BAseline Subset) Auswertungen relative Zeitreihen erzeugt. Diese können für Punkte bestimmt werden, die über die Zeit eine stabile Rückstreichcharakteristik aufweisen. Für jeden dieser stabilen Rückstreuer wird pro Satellitenmission ein Referenzzeitpunkt gewählt, auf den sich die Zeitreihe bezieht. Sowohl die Lage dieser Punkte als auch die Referenzzeitpunkte unterscheiden sich somit für jede Satellitenmission.

In einem ersten Schritt werden die Höhenänderungen an den D-InSAR-Punkten mittels inverser Distanzgewichtung auf die Koordinaten der amtlichen Höhenfestpunkte interpoliert. Auf die Interpolation mittels Ordinary Kriging wird an dieser Stelle verzichtet, da sich bereits in Schuh (1987) gezeigt hat, dass die Methoden der deterministischen und stochastischen Prädiktion nahezu identische Ergebnisse liefern. Unter der Annahme, dass sich die Bewegungen zwischen den Nivellementepochen linear verhalten, werden die D-InSAR-Zeitreihen in einem zweiten Schritt auf den Nivellementpunkten gelagert. Im Gegensatz zu Caro Cuenca et al. (2010) wird kein globales Polynom zur Verknüpfung der unabhängigen D-InSAR-Auswertungen geschätzt. Neben den ERS-1/-2- und Envisat-Daten werden noch zwei weitere Satellitenmissionen (TerraSAR-X und Sentinel-1A) hinzugenommen. Größere Datenlücken und eine geringe Anzahl an Daten am Rand würden für numerische Instabilitäten bei der Schätzung globaler Polynome sorgen. In diesem Ansatz wird vielmehr das von den Nivellementpunkten gegebene stückweise lineare Bewegungsmodell zur Lagerung genutzt. Daher unterscheidet sich die Zielsetzung dieser Arbeit deutlich von der oben genannten Arbeit und Fuhrmann et al. (2015).

Der Artikel ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt 2 wird kurz das hier betrachtete Untersuchungsgebiet vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 3 die beiden

Familien von multitemporalen D-InSAR-Auswertetechniken, die SBAS und PSI (Persistent Scatterer Interferometry) Methode, gegenübergestellt. Im darauffolgenden Abschnitt 4 wird zunächst die Datengrundlage präsentiert und anschließend werden die Prozessierungsschritte zur Erzeugung der verschiedenen Höhenzeitreihen erläutert. Die Methode zur gemeinsamen Lagerung der D-InSAR-Auswertungen wird in Abschnitt 5 vorgestellt. Darauffolgend werden die Ergebnisse dieses Verfahrens in Abschnitt 6 analysiert und evaluiert. Abschließend wird in Abschnitt 7 nochmals zusammengefasst und es werden mögliche Erweiterungen der präsentierten Methode diskutiert.

2 Niederrheinische Bucht

Das hier betrachtete Untersuchungsgebiet ist die Niederrheinische Bucht, deren Ausdehnung durch die Städte Köln, Mönchengladbach, Aachen und Euskirchen begrenzt wird. Dieses Gebiet von Nordrhein-Westfalen (NRW) ist stark durch den Braunkohletagebau geprägt, denn hier liegen die drei noch aktiven Tagebaue Garzweiler, Hambach und Inden. In Abb. 1 ist das vom Bergbau beeinflusste Gebiet mit einer gelben Schraffur hinterlegt. Dieser Teil von NRW wird alle vier Jahre durch Leitnivelllements überwacht und seit 1992 nahezu kontinuierlich von verschiedenen SAR-Satelliten beobachtet (vgl. Abb. 2).

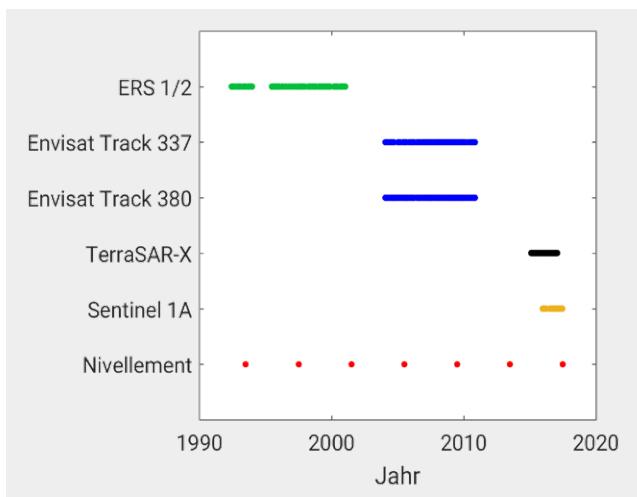


Abb. 2: Zeitlicher Überblick der genutzten Nivellement und SAR-Daten

Das Luftbild spiegelt den deutlich hohen Anteil an agrar- und forstwirtschaftlichen Flächen in dieser Region wider. Diese vegetativen Flächen führen in der radarinterferometrischen Auswertung zu Dekorrelationseffekten. Die Ergebnisse weisen daher, trotz der flächenhaften Abtastung durch die Radarsatelliten, eine unregelmäßige Punktverteilung auf (vgl. Abb. 6).

3 Methodik der D-InSAR-Auswertung

Die differentielle SAR Interferometrie (D-InSAR) ist eine bewährte Methode zur Detektion von Bodensenkungen (Solari et al. 2017) und Erdrutschüberwachungen (Wasowski und Bovenga 2014). Anfänglich wurde die D-InSAR-Auswertung lediglich zur Untersuchung einzelner Interferogramme genutzt (Massonnet und Feigl 1998). Seit der Jahrtausendwende ist es auch möglich, die stattfindenden Deformationen über einen längeren Zeitraum zu detektieren, indem Daten aus mehreren Jahren in einem sogenannten multitemporalen D-InSAR-Stapel gemeinsam prozessiert werden. Die Auswertetechniken können dabei in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: 1. Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) und 2. Small Baseline Subset (SBAS) Technik.

Erstere basiert auf der Auswertung individueller Rückstreuer, die in einer Auflösungszelle dominieren. Dazu gehören hauptsächlich Pixel in urbanen Gebieten, wie Gebäude oder Brücken. Diese Pixel weisen sehr geringe Dekorrelationseffekte auf, sodass die Interferogramme

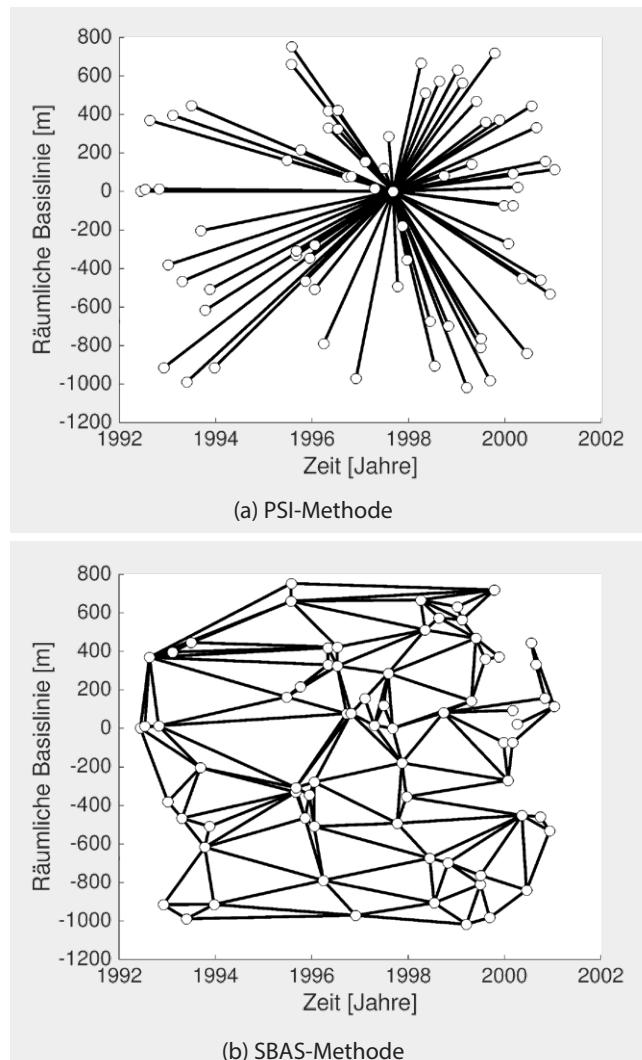


Abb. 3: Raum-Zeitliches Basisliniennetz: Die Punkte stellen die einzelnen SAR-Aufnahmen dar. Eine Kante repräsentiert ein differentielles Interferogramm.

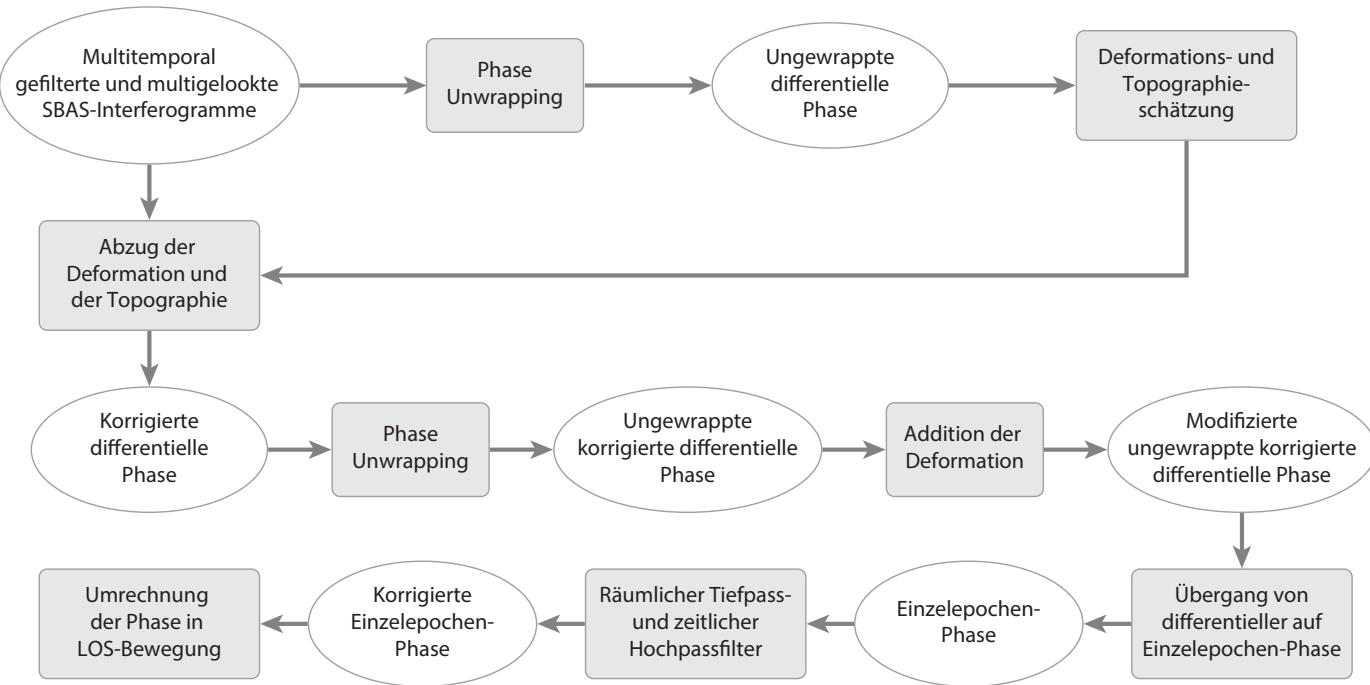


Abb. 4: SBAS-Workflow nach Pepe et al. (2015) ausgehend von multitemporal gefilterten Interferogrammen. Das Phase Unwrapping wird in zwei Iterationen durchgeführt. Die ungewrappten Interferogramme werden um den atmosphärischen Störanteil korrigiert. Aus den korrigierten Phasen werden Bewegungen in LOS abgeleitet.

unabhängig von der Größe der zeitlichen und räumlichen Basislinie auf eine Masterszene bezogen werden (Ferretti et al. 2001). Dadurch entsteht das in Abb. 3a dargestellte sternförmige Basisliniennetz.

Die SBAS-Methode hingegen erlaubt mehrere Masterszenen, um möglichst kleine Basislinien zwischen den SAR-Bildern zu erhalten (Berardino et al. 2002, Lauknes et al. 2011). Dadurch entsteht das in Abb. 3b dargestellte Basisliniennetz. Die Begrenzung der Basislinienlänge ermöglicht die Auswertung zusätzlicher Pixel, die von größeren Dekorrelationseffekten beeinflusst sind. Im Gegensatz zur PSI-Methode, die zur Auswertung individueller Rückstreuer geeignet ist, dient die SBAS-Methode zur Detektion großräumiger Deformationen.

Sowohl für die SBAS- als auch für die PSI-Methode existieren verschiedene Algorithmen. Ein Vergleich und Überblick der verschiedenen Verfahren findet sich beispielweise in Osmanoğlu et al. (2016) oder Sousa et al. (2011). Für beide Methoden stehen sowohl kommerzielle, beispielsweise die SARscape¹ oder Gamma² Software, als auch Open Source Softwarepakete, wie die ESA Toolbox STEP³ oder die ESA Grid Processing On Demand (G-POD) Platform⁴, zur Verfügung.

Wie bereits erwähnt, ist das hier betrachtete Untersuchungsgebiet durch einen hohen Anteil an agrar- und forstwirtschaftlichen Flächen gekennzeichnet. Zur groß-

räumigen und flächenhaften Detektion der stattfindenden Deformationen wird die SBAS-Methode zur multitemporalen D-InSAR-Auswertung verwendet. Ein Überblick des Workflows ist in Abb. 4 dargestellt.

4 Datenprozessierung

4.1 Datengrundlage

Zur Detektion der Bodenbewegungen innerhalb der Niederrheinischen Bucht werden Daten der letzten 25 Jahre genutzt. Grundlage dafür sind insgesamt vier Satellitenmissionen: ERS-1/-2, Envisat, TerraSAR-X und Sentinel-1A. Eine zeitliche Übersicht aller verwendeten Daten befindet sich in Abb. 2. Die Zeitreihe der ERS-1/-2-Daten reicht mit 64 Szenen von Mai 1992 bis Dezember 2000. Auf die Verwendung der Daten nach Dezember 2000 wird verzichtet, da durch das defekte Gyroskop eine spezielle Auswertung dieser Aufnahmen nötig ist. Die Nachfolgemission Envisat liefert Daten von Dezember 2003 bis Oktober 2010. Frühere Aufnahmen stehen nicht zur Verfügung, sodass keine zeitliche Überlappung zwischen ERS-1/-2 und Envisat erreicht werden kann. Zur Abdeckung des Testgebiets sind zwei Orbitstreifen notwendig. Der Envisat Track 380 (Env380) deckt das Gebiet westlich des Tagebaus Hambach ab und umfasst 71 Szenen. Ergänzend erfasst der Envisat Track 337 (Env337) mit 66 Szenen das Gebiet östlich des Tagebaus Hambach. Als weitere Grundlage werden 65 Szenen der TerraSAR-X (TSX) Mission von Januar 2015 bis Dezember 2016 bereitgestellt. Letztendlich schließen die 33 Szenen der

1 www.sarmap.ch/wp/index.php/software/sarscape (letzter Zugriff 05.03.2019)

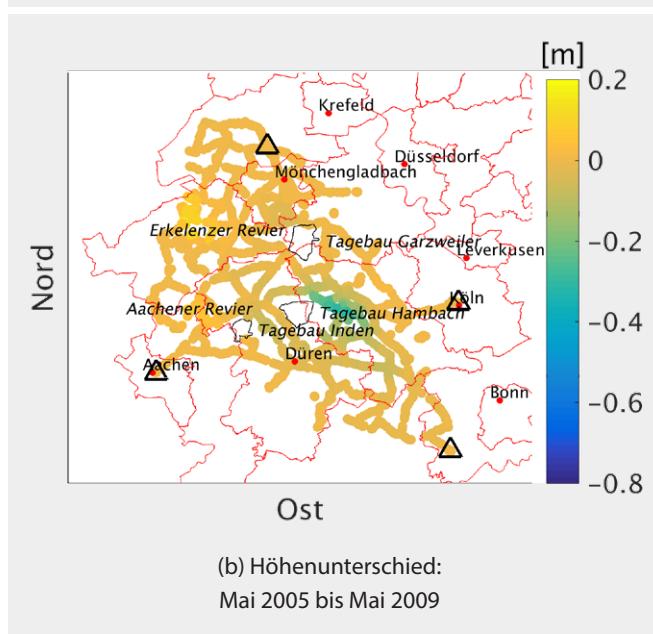
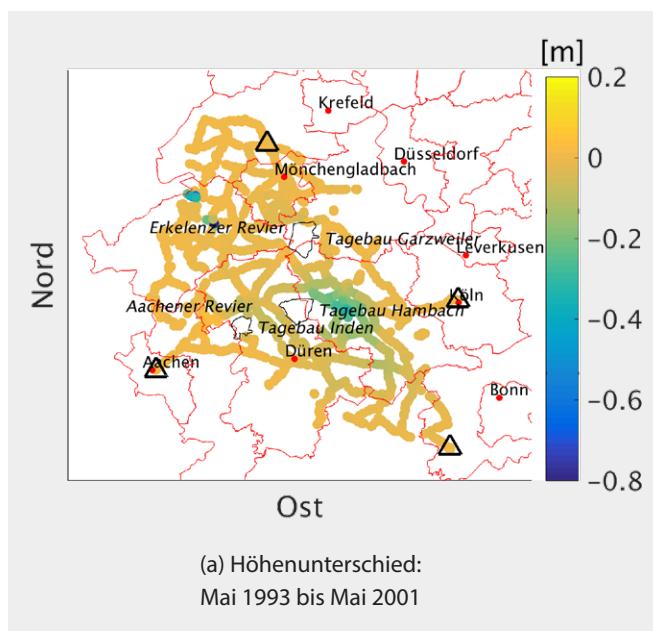
2 www.gamma-rs.ch/no_cache/software.html (letzter Zugriff 05.03.2019)

3 <http://step.esa.int/main> (letzter Zugriff 05.03.2019)

4 <https://gpod.eo.esa.int> (letzter Zugriff 05.03.2019)

Sentinel-1A (S1A) Mission von November 2015 bis Mai 2017 die Zeitreihe der SAR-Daten ab. Bei allen verwendeten Szenen handelt es sich um Aufnahmen absteigender Orbits. Korrekterweise müssten auch Aufnahmen von aufsteigenden Orbits verwendet werden, um aus den Line-Of-Sight (LOS) Beobachtungen Höhenänderungen zu extrahieren. Da diese Aufnahmen für die hier präsentierte Arbeit nicht zur Verfügung standen, muss zwangsläufig die Annahme getroffen werden, dass die detektierten Bewegungen keine horizontale Komponente haben.

Zu Vergleichszwecken werden zusätzlich die im Vierjahreszyklus gemessenen Nivellementkampagnen von GeoBasis NRW ausgewertet. Auf dessen Grundlage werden Bodenbewegungen von insgesamt 7708 Nivellementpunkten von 1993 bis 2017 detektiert. Das Datum der letzten Vergleichsepoke begründet, warum auf eine mögliche Verlängerung der S1A-Zeitreihe verzichtet wird.

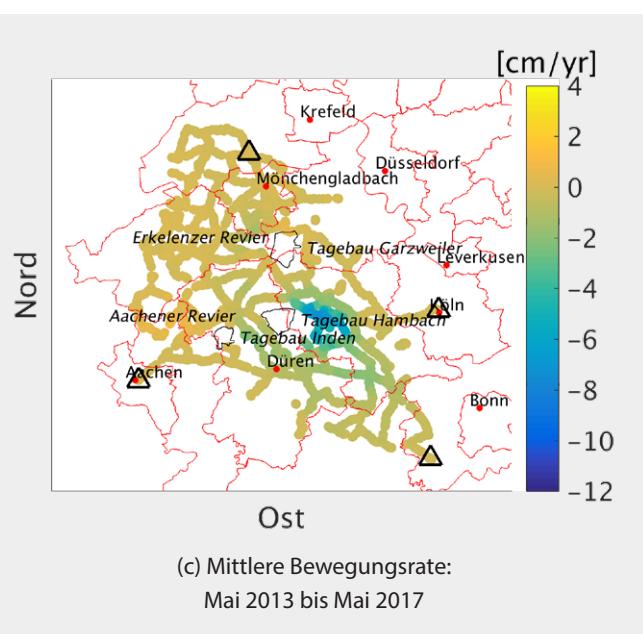


4.2 Nivellement – Einzelepochenausgleich

Jede der insgesamt sieben Nivellementkampagnen wird in einem Einzelepochenausgleich ausgewertet (Halsig et al. 2013). Dazu wird ein Gauß-Markoff-Modell (GMM) mit Restriktionen (Koch 1999, Kap. 3.2.7) verwendet. Da es sich bei den Beobachtungen um relative Höhenänderungen handelt, weist das System einen Rangdefekt auf. Eine Lösung zur Behebung dieser Datumsproblematik ist die Lagerung auf mindestens einen Höhenfestpunkt. In dieser Auswertung wird das System auf insgesamt vier Datumspunkte gelagert und unter Zwang ausgeglichen. Die Datumspunkte sollten möglichst nicht in einem Deformationsgebiet liegen und über das Gebiet verteilt sein. Die in dieser Auswertung verwendeten Datumspunkte sind in Tab. 1 aufgelistet. Als Ergebnis resultiert eine Punkttabelle mit den ausgeglichenen Normalhöhen für die jeweilige Epoche. Zur weiteren Untersuchung werden lediglich die Punkte betrachtet, die in allen der sieben Epochen gemessen wurden. Dies trifft für insgesamt 1801 Nivellementpunkte zu.

Abb. 5 zeigt Höhenänderungen dieser Nivellementpunkte. Die Zeitspannen sind dabei so gewählt, dass sie sich in etwa mit den Auswertungen der Satellitenmissionen decken.

Abb. 5:
Ergebnis der Nivellementausgleichung. Die vier Datumspunkte sind mit schwarzen Dreiecken gekennzeichnet. Zum besseren Vergleich mit Abb. 6 wird für die letzte Epoche (2013–2017) eine mittlere Bewegungsrate anstelle von Höhendifferenzen dargestellt.



Tab. 1: Datumspunkte der Nivellementausgleichungen mit den entsprechenden Höhen. Diese Höhen werden bei jedem Epochenausgleich festgehalten.

Nr.	Name	Höhe [m]
4704900022	Viersen, Remigiuskirche	42,945
5007900012	Köln	54,500
5202900001	Aachen, Adalbertkirche	166,160
5307900008	Rheinbach, Bahnhof	175,027

4.3 D-InSAR-Prozessierung

Die SBAS-Auswertung der verschiedenen Datensätze (vgl. Abschnitt 4.1) wird mit der Remote Sensing Software Graz (RSG) in der Version 7.50.13 durchgeführt. Die wichtigsten Auswerteparameter für die einzelnen Missionen sind in Tab. 2 aufgelistet.

In den ersten drei Zeilen werden die Kenndaten der eingehenden Bildstapel genannt. Hierbei handelt es sich um die Anzahl der verwendeten SAR-Aufnahmen pro Satellitenmission sowie die Aufnahmedaten der ersten und letzten Szene.

Darauffolgend sind die Anzahl der erzeugten Interferogramme sowie die Schwellwerte verzeichnet, die eingehalten werden müssen, damit ein Interferogramm als Small Baseline Interferogramm zulässig ist. Dabei handelt es sich um die maximale orthogonale Basislinie B^\perp zwischen den Aufnahmepositionen und die maximale Differenz zwischen den Aufnahmepunkten B^Δ .

Die folgenden drei Einträge legen fest, für welche Punkte das Phase Unwrapping und die anschließende

finale SBAS-Analyse durchgeführt werden. Hier werden nur Punkte verwendet, die als stabile Rückstreuer angesehen werden. Ein Pixel muss hierfür den Kohärenzschwellwert θ_p in mindestens P_{Valid} Prozent der Interferogramme überschreiten.

Der letzte Parameter gibt die Länge des Hochpassfilters an, der für die zeitliche Filterung des atmosphärischen Störsignals verwendet wird.

Für das Phase Unwrapping (vgl. Abb. 4) wird in RSG der Extended Minimum Cost Flow (EMCF) Algorithmus (Pepe und Lanari 2006) mit multitemporalem Phasenfilter (Pepe et al. 2015) genutzt. Da das Phase Unwrapping räumliche und zeitliche Gradienten, also Doppeldifferenzen, nutzt, müssen Referenzpunkte gewählt werden, um »absolute« Werte zu erhalten. Als räumlicher Bezug wird ein Referenzpixel festgelegt, von dem angenommen werden kann, dass es keiner Bewegung unterliegt. Der Referenzpunkt ist in den Abb. 6a bis 6e mit einem Dreieck gekennzeichnet. Als zeitlicher Bezug wird das Aufnahmedatum der ersten SAR-Szene eines Bildstapels gewählt.

In Abb. 6 sind die Ergebnisse in solcher Weise aufgearbeitet, dass ein Vergleich zu den Auswertungen der Leitnivelllements (vgl. Abb. 5) möglich ist. Für die ERS-1/-2- und Envisat-Daten werden Höhenunterschiede zwischen Aufnahmepunkten berechnet, die etwa mit den Epochen 1993 und 2001 (vgl. Abb. 5a) bzw. den Epochen 2005 und 2009 (vgl. Abb. 5b) übereinstimmen. Für die TerraSAR-X- und die Sentinel-1A-Daten sind die Zeitspannen zu kurz, um den direkten Vergleich zu zwei Nivellementepochen durchzuführen. Stattdessen wird eine mittlere Bewegungsrate für den beobachteten Zeitraum berechnet (Abb. 6d und 6e), die mit Abb. 5c verglichen werden kann.

Tab. 2: Gegenüberstellung der einzelnen D-InSAR-Auswertungen mit Beschreibung der Inputdaten sowie der wichtigsten SBAS-Auswerteparameter, die in der Prozessierung mit RSG (Ver. 7.50.13) benutzt wurden.

Mission	ERS-1/-2	Envisat (Track 337)	Envisat (Track 380)	TerraSAR-X	Sentinel-1A
SAR-Szenen	64	66	71	65	33
Erste Szene	9. Mai 1992	18. Dez. 2003	21. Dez. 2003	9. Jan. 2015	20. Nov. 2015
Letzte Szene	12. Dez. 2000	7. Okt. 2010	10. Okt. 2010	24. Dez. 2016	13. Mai 2017
Interferogramme	161	173	170	178	83
max B^\perp [m]	400	220	140	150	50
max B^Δ [yr]	5	5	5	3	2
Rückstreuer	144.302	155.745	278.952	218.939	897.860
θ_p [-]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
min P_{valid} [%]	80	80	80	80	80
Hochpassfilter [d]	300	300	300	300	200

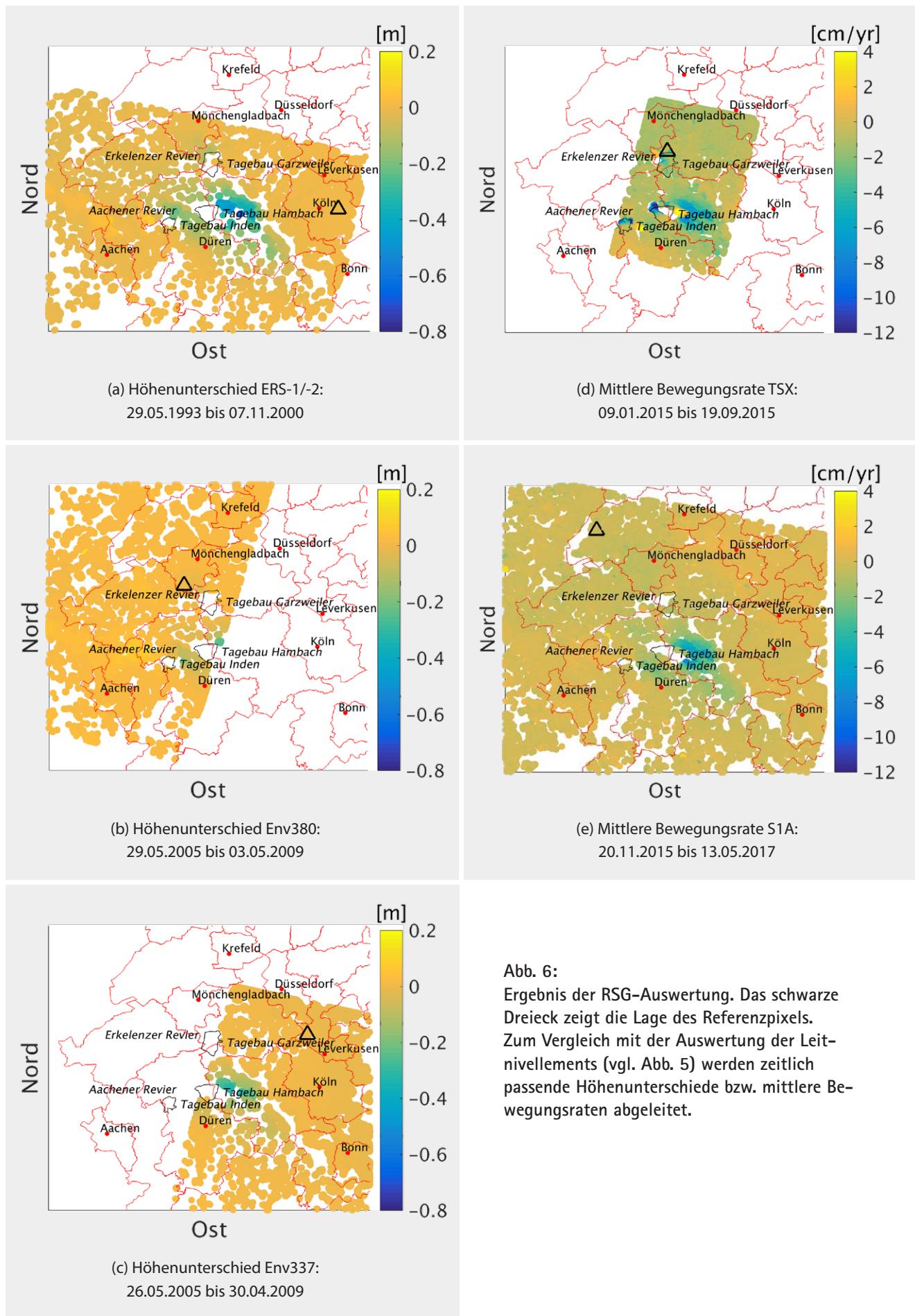


Abb. 6:
Ergebnis der RSG-Auswertung. Das schwarze Dreieck zeigt die Lage des Referenzpixels.
Zum Vergleich mit der Auswertung der Leitnivelllements (vgl. Abb. 5) werden zeitlich passende Höhenunterschiede bzw. mittlere Bewegungsraten abgeleitet.

5 Gemeinsame Lagerung

Nach einer Georeferenzierung liegen die interferometrischen Daten analog zu den Nivellementdaten in UTM (Universal Transverse Mercator) Koordinaten der Zone 32 vor. Beim Vergleich der beiden Daten tritt das Problem der unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie das Problem der unterschiedlichen Lagerung auf. Angenommen es liegen insgesamt n_X Nivellementhöhen $h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^{T_j}$ in einer Messkampagne T_j vor. Diese beziehen sich auf eindeutig definierte Punkte $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{n_X}\}$, wohingegen die insgesamt n_T Aufnahmezeitpunkte weniger gut definiert sind. Die Dauer der Messkampagnen $\mathbf{T} = [T_1, \dots, T_{n_T}]^T$ beträgt mehrere Monate. Die interferometrischen Daten $h_{\mathbf{x}_k, \text{dinsar}}^{t_l}$ werden hingegen durch insgesamt n_X georeferenzierte kohärente Pixel $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n_X}\}$ zu n_t speziellen Zeitpunkten $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_{n_t}]^T$ repräsentiert. Die aus den D-InSAR-Daten abgeleiteten Bewegungen beziehen sich dabei auf die erste SAR-Szene. Um das Problem der unterschiedlichen Lagerung zu lösen, werden die interferometrischen Daten zwangsfrei auf den Nivellementdaten gelagert. Dazu wird pro Mission ein Offset $d_{\mathbf{x}_i}$ für jeden einzelnen Punkt \mathbf{X}_i geschätzt.

Da beide Messverfahren eine unterschiedliche räumliche Auflösung und Punktverteilung besitzen, werden die interferometrischen Daten mittels einer inversen Distanzgewichtung auf die Koordinaten der Nivellementpunkte \mathbf{X} interpoliert. Dazu wird für jeden Nivellementpunkt \mathbf{X}_i die Menge \mathcal{V}_r^i der kohärenten Pixel betrachtet, die in einem Umkreis mit Radius $r = 200$ m um den Punkt liegen. Liegen mindestens fünf kohärente Pixel im Umkreis, wird die inverse Distanzgewichtung angewendet. Somit ergeben sich die räumlich interpolierten, relativen, interferometrischen Höhen

$$\mathbf{h}_{\mathbf{X}_i, \text{dinsar}}^{\mathbf{t}} = \frac{\sum_{\forall k \in \mathcal{V}_r^i} p_k \mathbf{h}_{\mathbf{x}_k, \text{dinsar}}^{\mathbf{t}}}{\sum_{\forall k \in \mathcal{V}_r^i} p_k} \quad \forall \mathbf{X}_i \in \mathcal{V}_X \quad (1)$$

an den Nivellementpunkten \mathbf{X}_i zu allen Zeitpunkten \mathbf{t} . Hierbei steht \mathcal{V}_X für die Menge aller Nivellementpunkte \mathbf{X}_i , in deren Umkreis mindestens fünf kohärente Pixel liegen. Die Gewichte sind definiert als

$$p_k = \frac{1}{(\|\mathbf{X}_i - \mathbf{x}_k\|)^m}, \quad (2)$$

wobei sich mit der Variablen m der Einfluss der Nachbarn festlegen lässt. Für $m > 1$ nimmt das Gewicht mit zunehmender Distanz zum Interpolationspunkt desto schneller ab, je größer m gewählt wird. Die Potenz wird mit $m = 2$ gewählt, sodass die Gewichte mit zunehmender Distanz quadratisch abnehmen. Die Interpolation geschieht stets unter der Annahme, dass das Bewegungsmuster in einem definierten Umkreis räumlich glatt ist, sich also nicht abrupt ändert. Die Wahl der Parameter beruht dabei auf empirischen Untersuchungen, bei denen jeder D-InSAR-

Punkt von allen anderen Punkten zurückgerechnet und mit dem Sollwert verglichen wird. Tab. 3 zeigt die Ergebnisse dieser Kreuzvalidierung auf Grundlage der ERS-1/-2-Daten. Es zeigt sich, dass die inverse Distanzgewichtung gegenüber der Wahl der Potenz m relativ unsensibel ist, siehe dazu auch die in Schuh (1987) durchgeführten Studien. Bei der Mindestanzahl an kohärenten Pixeln ist zu beachten, dass eine sehr hohe Zahl zwar eine stabilere Schätzung ermöglicht, dadurch jedoch die Anzahl an auswertbaren Punkten verringert wird, da diese Bedingung für weniger Punkte zutrifft. Ähnliches gilt für den Umkreis r . Je geringer der Umkreis gewählt wird, desto ähnlicher ist das Bewegungsmuster der sich darin befindlichen Pixel. Dadurch wird die Interpolation zuverlässiger, jedoch sinkt die Anzahl der Punkte, die diese Bedingung erfüllen. Bei einem zu großen Umkreis steigt zwar die Anzahl der auswertbaren Punkte, jedoch wächst die Gefahr, dass Punkte mit einem anderen Bewegungsverhalten in die inverse Distanzgewichtung einfließen und die Interpolation somit unzuverlässig wird. Für die Menge an gültigen Punkten \mathcal{V}_X liegen jetzt sowohl Nivellement als auch D-InSAR-Höhen vor. Nun besteht noch die Problematik der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung. Um diese zu lösen, werden die Nivellementhöhen in der Zeit stückweise linear auf die Aufnahmezeitpunkte der Radarbilder \mathbf{t} interpoliert. Unter der Annahme einer linearen Bewegung zwischen den Messkampagnen ergeben sich somit interpolierte Nivellementhöhen $h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^{t_l}$ für jeden Nivellementpunkt $\mathbf{X}_i \in \mathcal{V}_X$ zu jedem SAR-Aufnahmezeitpunkt $t_l \in \mathbf{t}$. Für jedes Pixel wird über ein gewogenes Mittel ein lokaler Offset

$$d_{\mathbf{x}_i} = \frac{\sum_{\forall t_l \in \mathcal{V}_t} p_l (h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^{t_l} - h_{\mathbf{X}_i, \text{dinsar}}^{t_l})}{\sum_{\forall t_l \in \mathcal{V}_t} p_l} \quad (3)$$

pro Satellitenmission berechnet, wobei \mathcal{V}_t die Menge aller Aufnahmezeitpunkte aus \mathbf{t} umfasst, die dieser Mission zuzuordnen sind. Die Gewichte p_l werden so gewählt, dass Höhen, die zeitlich nahe der Nivellementdaten liegen, stärker gewichtet werden und die Gewichte zwischen zwei Epochen abnehmen. Angenommen, es werden alle D-InSAR-Zeitpunkte t_l zwischen den Messepochen T_j und T_{j+1} betrachtet, so ergeben sich die zugehörigen Gewichte p_l über

$$p_l = p_{\min} + (1 - p_{\min}) \frac{|T_{j+1} - t_l - 2^n|}{2^n}, \quad (4)$$

wobei p_{\min} das minimale Gewicht ist und n die Potenz, mit der die Gewichte zur Mitte zwischen zwei Epochen T_j und T_{j+1} abnehmen.

Um abzuschätzen, wie gut das Lagerungsmodell der D-InSAR-Daten zu der als linear angenommenen Bewegung zwischen den Nivellementepochen passt, wird der erwartungstreue Varianzschätzer

Tab. 3: Empirische Untersuchungen zur Wahl der Potenz m , der Mindestanzahl k an kohärenten Pixeln und des Umkreises r mittels Kreuzvalidierung. Die Differenz zwischen interpoliertem und Sollwert wird als Klaffung bezeichnet.

Variation der Potenz m mit $k = 5$ und $r = 200$ m				
Potenz m	0,5	1	2	3
Varianz der Klaffungen [m]	0,0018	0,0018	0,0017	0,0018
Klaffungen > 1 cm [%]	0,20	0,19	0,19	0,18
Anzahl an auswertbaren Punkten	141.252	141.252	141.252	141.252
Variation der Mindestanzahl k an kohärenten Pixeln mit $m = 2$ und $r = 200$ m				
Mindestanzahl k	1	3	5	10
Varianz der Klaffungen [m]	0,0019	0,0018	0,0017	0,0016
Klaffungen > 1 cm [%]	0,23	0,21	0,19	0,14
Anzahl an auswertbaren Punkten	144.033	143.013	141.252	129.209
Variation des Umkreises r mit $m = 2$ und $k = 5$				
Umkreis r [m]	100	200	300	1000
Varianz der Klaffungen [m]	0,0015	0,0017	0,0018	0,0021
Klaffungen > 1 cm [%]	0,11	0,19	0,22	0,41
Anzahl an auswertbaren Punkten	5.253	141.252	142.528	143.743

$$\tilde{s}^2 = \frac{\sum_{\forall t_i \in \mathcal{V}_i} p_i (h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^t - h_{\mathbf{X}_i, \text{dinsar}}^t - d_{\mathbf{X}_i})^2}{|\mathcal{V}_i| - 1} \quad (5)$$

herangezogen. Dabei steht $|\mathcal{V}_i|$ für die Anzahl der Aufnahmezeitpunkte t_i , die in \mathcal{V}_i enthalten sind. Eine schlechte Anpassung der D-InSAR-Daten schlägt sich entsprechend in einer größeren Varianz nieder. Mögliche Gründe dafür werden im folgenden Abschnitt 6 ausführlicher anhand von einigen Beispielen diskutiert.

6 Analyse der Abweichungen

Im Abschnitt 4 wurde die hier verwendete Datengrundlage vorgestellt und deren Basisprozessierung beschrieben. Im Abschnitt 5 wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, unabhängige, relative D-InSAR-Höhenzeitreihen gemeinsam auf einer Nivellementzeitreihe zu lagern. Die Anwendung dieser Methode soll im Folgenden zunächst für die Lagerung der Einzelmissionen präsentiert werden (vgl. Abschnitt 6.1). Anschließend wird das hier vorgestellte Modell anhand einiger ausgewählter Einzelpunktauswertungen kritisch analysiert (vgl. Abschnitt 6.2). Bei allen Auswertungen wird das Leitnivelllement von 1993 als Referenz gewählt, sodass durchgehend Höhenänderungen im Bezug auf diese Messepoche betrachtet werden. Es handelt sich hierbei allerdings um keine zwingende Festlegung. Eine Lagerung auf den absoluten Nivellementhöhen ist ebenso möglich.

6.1 Bestimmung der Offsets und Güte der Lagerung

Für die gemeinsame Lagerung werden die lokalen Offsets für alle zulässigen Punkte \mathbf{X}_i und für alle D-InSAR-Einzelauswertungen mit den Gleichungen (1) bis (4) berechnet. Für die Berechnung der zeitlichen Gewichte p_i wird das minimale Gewicht mit $p_{\min} = 0,5$ gewählt und analog zur inversen räumlichen Interpolation ein quadratisches Abfallen ($n = 2$) der Gewichte mit zunehmenden zeitlichen Abstand von den Nivellementepochen.

Die Ergebnisse für die Schätzung der Offsets sind in Abb. 7 als Scatterplots dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Plots für die Auswertung der einzelnen Satellitenmissionen über unterschiedliche Farbskalen verfügen, da der Offset im Idealfall der Bodenbewegung zwischen dem Referenznivelllement und dem Referenzzeitpunkt der D-InSAR-Einzelauswertung entspricht. Für die ERS-1/-2-Daten sind die zu erwartenden Offsets sehr klein. Dies liegt daran, dass der Bezugszeitpunkt der ERS-1/-2-Zeitreihe der 09.05.1992 ist, wohingegen für die Lagerung als Bezugspunkt die erste Nivellementepoche im Mai 1993 gewählt wird. Es ist zu beachten, dass der Farbverlauf in Abb. 7a zu den anderen Abbildungen invertiert ist, weil das Aufnahmedatum der ersten ERS-1-Szene ein Jahr vor dem Referenznivelllement liegt. Für die beiden Envisat- sowie den TerraSAR-X- und Sentinel-1A-Stapel wird jeweils eine gemeinsame Farbskala gewählt, da sich die Referenzzeitpunkte (vgl. Tab. 2) zeitlich kaum unterscheiden.

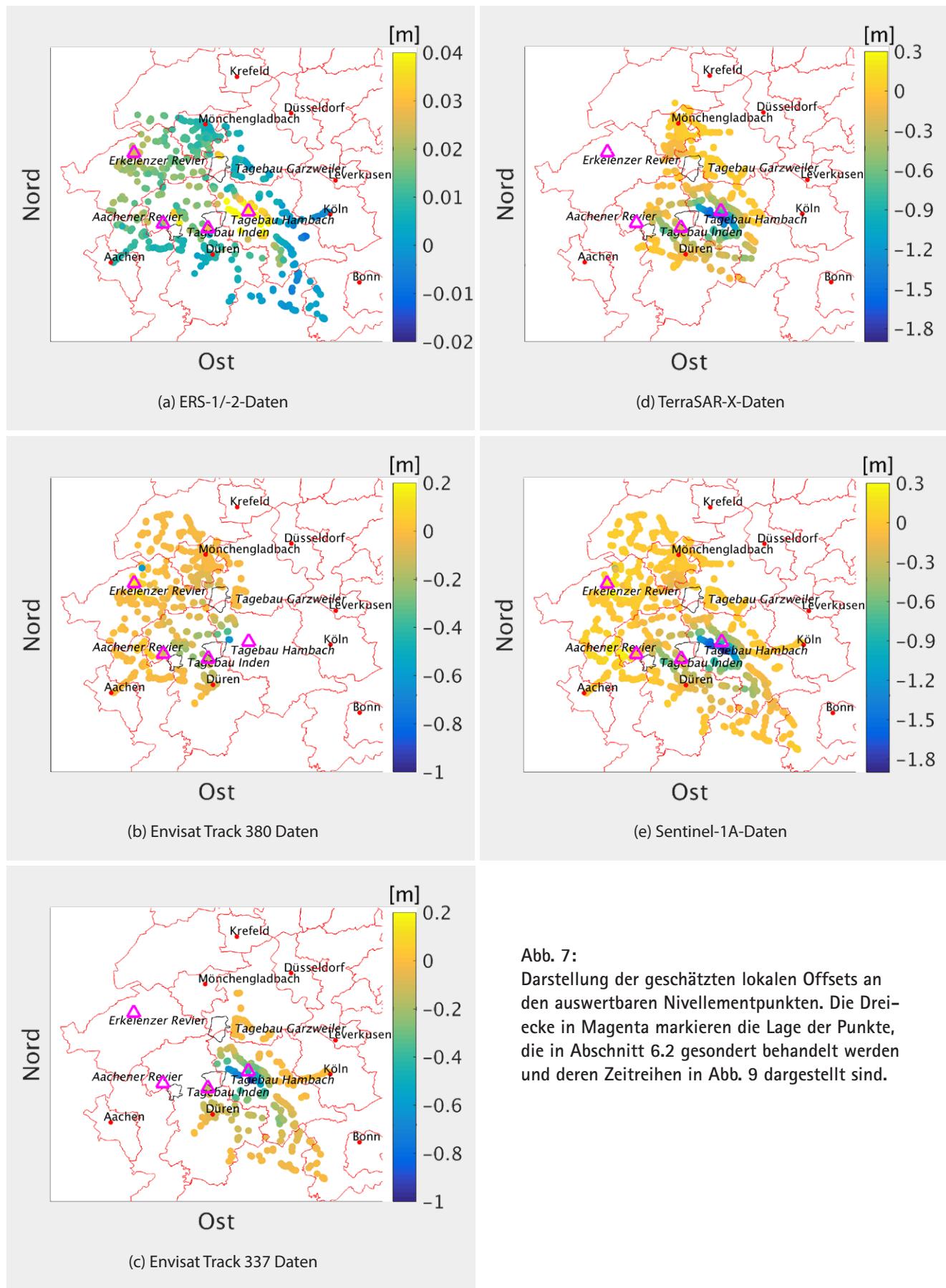


Abb. 7:
Darstellung der geschätzten lokalen Offsets an den auswertbaren Nivellementpunkten. Die Dreiecke in Magenta markieren die Lage der Punkte, die in Abschnitt 6.2 gesondert behandelt werden und deren Zeitreihen in Abb. 9 dargestellt sind.

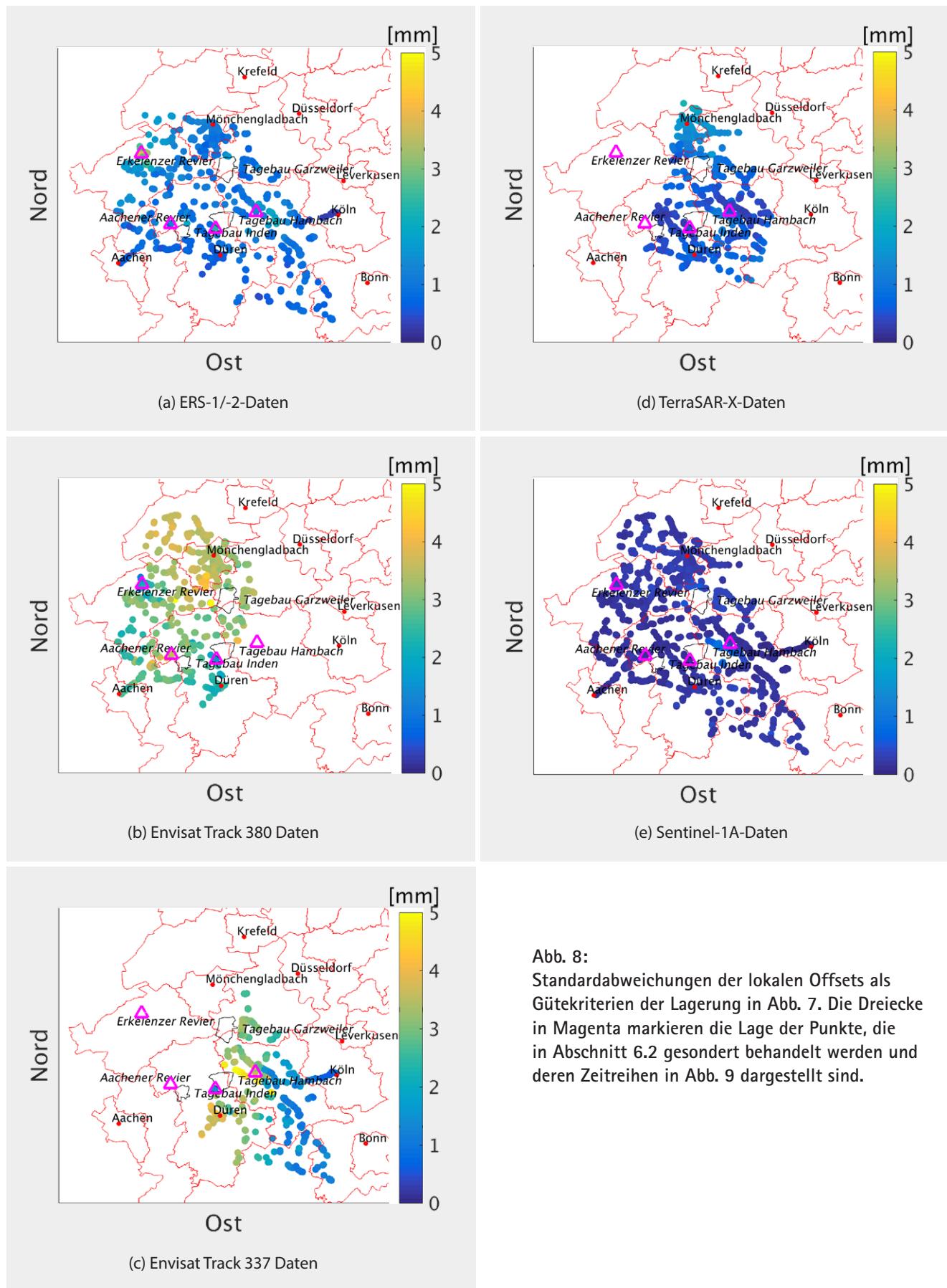


Abb. 8:
Standardabweichungen der lokalen Offsets als Gütekriterien der Lagerung in Abb. 7. Die Dreiecke in Magenta markieren die Lage der Punkte, die in Abschnitt 6.2 gesondert behandelt werden und deren Zeitreihen in Abb. 9 dargestellt sind.

In Abb. 8 sind die Standardabweichungen (vgl. Gleichung (5)) der Lagerung für jeden auswertbaren Punkt und für jede Satellitenmission dargestellt. Zunächst ist auffällig, dass große Standardabweichungen vor allem im Bereich der Bodenbewegungen um den Hambacher Tagebau und im Erkelenzer Revier auftreten. Dies bedeutet, dass die gelagerten D-InSAR-Höhen hier stärker um die stückweise linearen Bewegungen zwischen den Nivellementpunkten variieren. Gründe dafür können sein, dass entweder i) die Annahme von linearen Bewegungen unzulässig ist, ii) sich die Geschwindigkeit der Bewegung zwischen zwei Nivellementepochen ändert, iii) D-InSAR und Nivellement unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen oder iv) vereinzelt noch Phase Unwrapping Fehler enthalten sind. Unterschiedliche Geschwindigkeiten können auftreten, da die D-InSAR-Höhenänderungen unter der Annahme bestimmt wurden, dass detektierte Bodenbewegungen keine horizontale Komponente aufweisen. Dies ist nötig, da die komplementären Aufnahmen von aufsteigenden Orbits nicht zur Verfügung stehen.

Weiterhin ist auffällig, dass die Auswertung der Envisat-Stapel zu durchgängig höheren Varianzen führt als bei den anderen Satellitenmissionen. Dahingegen ist das Varianzniveau in Abb. 8d und 8e grundsätzlich niedriger. Die Ursachen können vielfältig sein und sowohl durch die SAR-Daten, die zeitliche Auflösung der Nivellementdaten oder nicht-lineare Bodenbewegungen bedingt sein. Lokale Analysen von Einzelpunkten weisen oft auf unterschiedliche Herkunft der Varianzerhöhung hin.

6.2 Analyse ausgewählter Punkt-Zeitreihen

Um die verschiedenen Effekte für höhere Varianzen des Lagerungsmodells genauer betrachten zu können, sind in Abb. 9 einige Zeitreihen für ausgewählte Punkte dargestellt.

In Abb. 9a ist die Bewegung eines Punktes in Wassenberg, nahe des Erkelenzer Reviers, aufgezeichnet. Aufgrund der Einstellung des Bergbaus 1997 kommt es zu einer Flutung der Grubenstollen (Boje et al. 2008). Das zuvor abgepumpte Grundwasser steigt wieder an und führt zu einer Hebung der Erdoberfläche. Dieser Effekt lässt sich in den ERS-1/-2-Daten wiederfinden. Bis Ende 1998 senkt sich der Punkt und zwischen 1998 und 1999 tritt eine Bodenhebung auf. Die Bewegung scheint sich gegen Ende der ERS-1/-2-Zeitreihe zu beschleunigen. Die Nivellementdaten liegen lediglich in einem Vierjahreszyklus vor und mit einer angenommenen stückweisen Linearität lässt sich der Eintritt der Bodenhebung nicht exakt bestimmen. Die Hebung scheint bereits 1997 einzutreten und weist keine konstante Geschwindigkeit auf. Die Annahme einer linearen Hebungsraten und das somit verwendete Lagerungsmodell ist in diesem Fall nicht zutreffend und bewirkt die hohen Standardabweichungen der ERS-1/-2-Zeitreihe. Die Bewegungsänderungen im Zeitraum der Envisat-Mission (Dez. 2003 bis Okt. 2010)

sowie der Sentinel-1A-Mission (Nov. 2015 bis Mai 2017) liegt hingegen zeitlich in der Nähe der Leitnivellelemente. Die Rate der Bodenhebung fällt ab und die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit trifft zu, womit die Lagerung gut funktioniert. Dies spiegelt sich auch in den entsprechenden Standardabweichungen wider.

In Abb. 9b ist die Bewegung eines Punktes in Aldenhoven, nahe des Aachener Reviers, aufgezeichnet. Bis 1992 befand sich in Aldenhoven ein Steinkohlebergwerk. Auch hier führt die allmähliche Flutung der Grubenstollen dazu, dass sich der Boden mit den Jahren um einige Zentimeter hebt. Jedoch setzt die Hebung versetzt zur beginnenden Flutung in den Jahren 1993/94 ein (Boje et al. 2008). Der genaue Beginn lässt sich allerdings auch nicht in den D-InSAR-Daten sehen, da dieser in der Datenlücke zwischen ERS-1/-2 und Envisat liegt. Dennoch ist die Hebung durch die höhere zeitliche Auflösung früher sichtbar als in den Nivellementen. Die mit Envisat detektierten Höhenänderungen sind etwas größer als die aus den amtlichen Leitnivellelementen. Um 2007 zeigt sich außerdem ein Knick in der Envisat-Zeitreihe. Dies lässt sich erneut in den größeren Standardabweichungen wiederfinden.

Zuletzt werden zwei Punkte nahe des Tagebaus Hambach untersucht. Der Tagebau Hambach ist bis heute aktiv und sorgt für Bodensenkungen in nahe gelegenen Gebieten. Abb. 9c zeigt die Bewegung eines Punktes in Thorr, östlich des Tagebaus Hambach. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen Nivellement und D-InSAR zu erkennen. Die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit trifft zu. Lediglich Envisat detektiert eine geringere Senkung als die amtlichen Daten, was erneut die höheren Standardabweichungen begründet. In Abb. 9d ist die Bewegung eines Punktes in Niederzier, südlich des Tagebaus Hambach, dargestellt. Dieser Punkt wurde so gewählt, dass er in allen fünf SAR-Datensätzen vorliegt. Auch hier liefert die Lagerung für alle Satellitenmissionen gute Ergebnisse. Trotz der nicht-linearen Bewegung zwischen 1997 und 2001 gelingt die Lagerung der ERS-1/-2-Zeitreihe, was vermutlich auf die Gewichtung in Gleichung (3) zurückzuführen ist. Ein Vergleich der jeweils überlappenden Zeitreihen zeigt, dass sowohl die beiden Envisat-Zeitreihen als auch die TerraSAR-X- und Sentinel-1A-Zeitreihen untereinander gut übereinstimmen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine einfache Methode präsentiert, mit der es möglich ist, unabhängige D-InSAR-Auswertungen von verschiedenen Satellitenmissionen zu einer gemeinsamen Zeitreihe zusammenzufügen. Die interferometrischen Daten werden dazu auf die Nivellementdaten gelagert. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es möglich ist, die D-InSAR-Daten zusammenzuführen, auch wenn keine zeitliche Überlappung zwischen den Satellitenmissionen vorhanden ist.

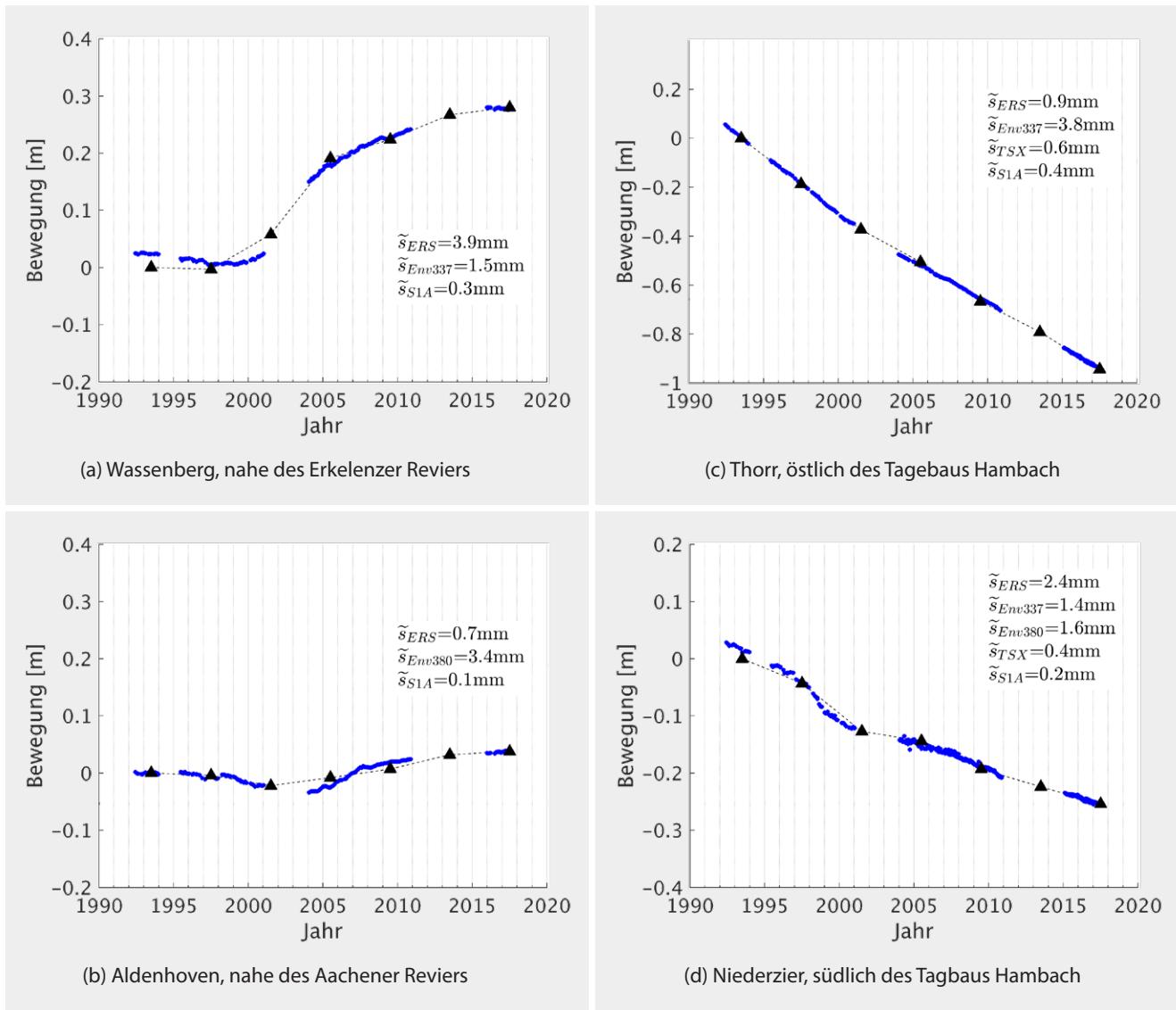


Abb. 9: Zeitreihe einzelner Punkte. Die Nivellementergebnisse sind mit Dreiecken markiert und die angenommene lineare Bewegung ist als gestrichelte Linie dargestellt. Darauf gelagert wurden die Ergebnisse der RSG-Analyse, die hier mit blauen Punkten gekennzeichnet sind. Als Gütekriterium der Passform zwischen D-InSAR-Daten und der als linear angenommenen Bewegung sind die Standardabweichungen der Lagerung pro Satellitenmission angegeben.

Ein Nachteil ist jedoch, dass die differentiellen, interferometrischen Daten auf die Nivellementpunkte interpoliert werden müssen, wodurch die höhere räumliche Abdeckung der Radardaten verloren geht.

Außerdem beruht das Verfahren auf zwei Annahmen, die zu Ungenauigkeiten in der Lagerung führen können. Zum einen wird davon ausgegangen, dass das räumliche Bewegungsmuster kontinuierlich ist. Dies würde bei Bruchkanten zu Fehlern führen. Zum anderen wird angenommen, dass die mit den amtlichen Leitnivellments bestimmten Höhenänderungen der Wahrheit entsprechen und dass die Bewegung zwischen den Messeperioden linear ist. Abweichungen von dieser Annahme können zu Unsicherheiten in der Lagerung führen, wie in Abschnitt 6.2 und Abb. 9 dargestellt wurde.

Durch eine Erweiterung des Modells ließe sich die Annahme der linearen Bewegung umgehen. Dafür könnte beispielsweise ein höher gradiges Spline-Modell durch

die räumlich interpolierten D-InSAR-Daten geschätzt werden, das dann zwangsfrei auf den Nivellementzeitpunkten gelagert werden kann. Würde dies wiederum mit einer räumlichen Modellierung gekoppelt, so wäre es theoretisch auch möglich, (geglättete) Multimissionszeitreihen für die D-InSAR-Punkte selbst zu generieren.

Dank

Ein herzlicher Dank gebührt der Bezirksregierung Köln, Abteilung 7 (GEOBasis NRW) für die Bereitstellung der Nivellementdaten von 1993 bis 2017. Die Daten der ERS-1/-2- sowie der Envisat-Mission sind gefördert durch das ESA Projekt 17055 – *Integrated Modelling of SAR Interferometry and Leveling*. Die TerraSAR-X-Daten sind im Rahmen des Principal Investigator Proposals MTH2430 – *Feasibility to Establish a Ground Motion Monitor Service Using Continuous TerraSAR-X Acquisitions*

vom deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt worden. Des Weiteren basiert ein Teil der Ergebnisse auf Copernicus Sentinel Daten der ESA, abgerufen 2017.

Die Autoren bedanken sich ferner bei der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft im Austrian Space Application Programme Projekt 844386 – *SENTINEL-1 INSAR* sowie beim HPC-TerrSYS Projekt des Geoverbunds ABC/J, die Teile der Arbeit gefördert und finanziert haben.

Die Hintergrunddaten (Kreisgrenzen, Städte, Bergbaugebiete) der Abbildungen 5 bis 8 wurden von Malwin Eichborn im Rahmen seiner Bachelorarbeit erarbeitet.

Literatur

- Berardino, P., Casu, F., Fornaro, G., Lanari, R., Manunta, M., Manzo, M., Sansosti, E. (2004): A Quantitative Analysis of the SBAS Algorithm Performance. *IGAR-SS 2004*. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol. 5, 3321–3324. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370414.
- 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. ISSN 0196–2892. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- Boje, R., Gstirner, W., Schuler, D., Spata, M. (2008): Leitnivelllements in Bodenbewegungsgebieten des Bergbaus – Eine Langjährige Kernaufgabe der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen. *NöV NRW*, 3:33–42.
- Caro Cuenca, M., Esfahany, S.S., Hanssen, R.F. (2010): A Least Square Approach for Joining Persistent Scatterer InSAR Time Series Acquired by Different Satellites. *ESA Living Planet Symposium*, Band 686, p. 155. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ESASP.686E.155C>.
- Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006): A Quantitative Assessment of the SBAS Algorithm Performance for Surface Deformation Retrieval from DInSAR Data. *Remote Sensing of Environment*, 102(3):195–210. ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.023. URL: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425706000526.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Perissin, D., Rocca, F. (2003): ERS-ENVISAT Permanent Scatterers Interferometry. *IGARSS 2003*. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477), vol. 2, 1130–1132. DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294034.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1):8–20. ISSN 0196–2892. DOI: 10.1109/36.898661.
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F.J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R.F., Heck, B. (2015): Estimation of Small Surface Displacements in the Upper Rhine Graben Area from a Combined Analysis of PS-InSAR, Levelling and GNSS Data. *Geophysical Journal International*, 203(1):614–631. ISSN 0956–540X. DOI: 10.1093/gji/ggv328.
- Haghghi, M.H., Motagh, M. (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-Scale Interferometry, Atmospheric Effects, and Ground Deformation Mapping. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, zfv 4/2017. ISSN 1618–8950. DOI: 10.12902/zfv-0174–2017. URL: <https://geodaeisie.info/zfv/zfv-42017/6880>.
- Halsig, S., Ernst, A., Schuh, W.-D. (2013): Ausgleichung von Höhennetzen aus mehreren Epochen unter Berücksichtigung von Bodenbewegungen. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, zfv 4/2013. ISSN 1618–8950. URL: <https://geodaeisie.info/zfv/heftbeitrag/1768>.
- Koch, K.-R. (1999): Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Auflage. ISBN 978-3-540-65257-1.
- Krickel, B. (2018): Bodenbewegungskataster NRW – Ein Werkstattbericht. In: Busch, W., (Hrsg.): Tagungsband: GeoMonitoring 2018, 27–37. Clausthal-Zellerfeld. ISBN 978-3-86948-627-7.
- Lauknes, T.R., Zebker, H.A., Larsen, Y. (2011): InSAR Deformation Time Series Using an L1-Norm Small-Baseline Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1):536–546. ISSN 0196–2892. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2051951.
- Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998): Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4):441–500. ISSN 87551209. DOI: 10.1029/97RG03139.
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. (2016): Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:90–102. ISSN 0924–2716. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.
- Pepe, A., Bonano, M., Yang, Y., Manunta, M., Lanari, R. (2011): New Improvements of the Extended Minimum Cost Flow Phase Unwrapping for Processing Multitemporal Full Resolution Interferograms. *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1349–1352. IEEE, Vancouver, BC, Canada. ISBN 978-1-4577-1003-2. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049315. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6049315>.
- Pepe, A., Lanari, R. (2006): On the Extension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9):2374–2383. ISSN 0196–2892. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873207.
- Pepe, A., Sansosti, E., Berardino, P., Lanari, R. (2005): On the Generation of ERS/ENVISAT DInSAR Time-Series Via the SBAS Technique. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3):265–269. ISSN 1545–598X. DOI: 10.1109/LGRS.2005.848497. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1468078>.
- Pepe, A., Yang, Y., Manzo, M., Lanari, R. (2015): Improved EMCF-SBAS Processing Chain Based on Advanced Techniques for the Noise-Filtrating and Selection of Small Baseline Multi-Look DInSAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(8):4394–4417. ISSN 0196–2892. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2396875.
- Schuh, W.-D. (1987): Punkttransformationen unter Berücksichtigung lokaler Klaffungsverhältnisse. *österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, 75(3):104–121.
- Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini, S., Monserrat, O., Béjar-Pizarro, M., Crosetto, M., Sarro, R., Moretti, S. (2017): Fast Detection of Ground Motions on Vulnerable Elements Using Sentinel-1 InSAR Data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1):152–174. ISSN 1947–5705. DOI: 10.1080/19475705.2017.1413013.
- Sousa, J.J., Hooper, A.J., Hanssen, R.F., Bastos, L.C., Ruiz, A.M. (2011): Persistent Scatterer InSAR: A Comparison of Methodologies Based on a Model of Temporal Deformation vs. Spatial Correlation Selection Criteria. *Remote Sensing of Environment*, 115:1652–2663. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.021.
- Spreckels, V. (2002): Untersuchung operationeller Aufnahmesysteme zur großflächigen Erfassung von Digitalen Geländemodellen und topographischen Veränderungen über Abbaubereichen der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG). *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 11:67–82.
- Spreckels, V., Wegmüller, U., Strozzi, T., Musiedlak, J., Wichlacz, H.-C. (2001): Nutzung von InSAR-Daten Zur Großflächigen Erfassung von Topographischen Veränderungen Über Abbaubereichen Der Deutschen Steinkohle AG (DSK). *Tagungsband Des Deutschen Markscheider Ver eins (DMV)*, 49–70. Trier.
- Wasowski, J., Bovenga, F. (2014): Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi Temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives. *Engineering Geology*, Band 174, 103–138. Elsevier. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003.

Kontakt

M.Sc. Christina Esch | M.Sc. Joël Köhler | Prof. Dr. techn. Wolf-Dieter Schuh
Institut für Geodäsie und Geoinformation, Universität Bonn
Nussallee 17, 53115 Bonn, Deutschland
esch@geod.uni-bonn.de | koehler@geod.uni-bonn.de | schuh@uni-bonn.de

DI Dr. Karlheinz Gutjahr

DIGITAL – Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH
Steyrergasse 17, 8010 Graz, Österreich
karlheinz.gutjahr@joanneum.at

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