

Eine Nivellement gestützte Methode zur Erzeugung langer DInSAR Zeitreihen mittels B-Splines

JOËL KÖHLER, M.Sc., CHRISTINA ESCH, M.Sc., DR. DI KARLHEINZ GUTJAHR & PROF. WOLF-DIETER SCHUH

Die Erzeugung von DInSAR basierten Deformationszeitreihen, die mehrere Radarmissionen umfassen, stellt nach wie vor eine Herausforderung dar. Aufgrund des differentiellen Charakters der Beobachtungen ist es notwendig einen Bezugszeitpunkt für die Zeitreihen zu wählen, die aus radarinterferometrischen Auswertungen abgeleitet werden. Üblicherweise wird hier das Aufnahmedatum der ersten SAR-Szene gewählt. Werden nun Zeitreihen aus mehreren Satellitenmissionen (z.B. ERS-1/2, EnviSat usw.) betrachtet, entsteht das Problem, dass jede einen unterschiedlichen zeitlichen Referenzpunkt besitzt. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Missionen oftmals nicht zeitlich überlappen. Aus diesem Grund lassen sich missionsüberspannende Zeitreihen nicht ohne Weiteres erzeugen. Außerdem ist es aus verschiedenen Gründen (Aufnahmegeometrie, Auflösung, identifizierte Rückstreuer usw.) zunächst nicht möglich identische Punkte zu identifizieren, deren Bewegung gemeinsam betrachtet werden soll.

In diesem Beitrag wird ein mehrstufiges Verfahren präsentiert, mit dem es dennoch möglich ist, mehrere SBAS Einzelauswertungen der Satellitenmissionen ERS-1/2, EnviSat, TerraSAR-X und Sentinel-1 zu gemeinsamen Punktbewegungszeitreihen zu verknüpfen. Ausgangspunkt hierfür sind punktbasierete Höhenunterschiede (vor der zeitlichen Integration) sowie die amtlichen Leitnivelements von 1993 bis 2017 im Bereich der Niederrheinischen Bucht.

Unter der Annahme, dass sich nahe beieinander liegende Punkte ähnlich bewegen, werden Höhenunterschiede an den Koordinaten der Nivellementpunkte mittels inverser Distanzgewichtung der DInSAR Daten bestimmt. Für jeden Punkt mit einer „Zeitreihe“ von Höhenunterschieden wird ein B-Spline basiertes, zeitlich kontinuierliches Bewegungsmodell angesetzt. Die amtlichen Höhendaten werden zur zwangsfreien Lagerung verwendet. Somit ist es möglich über einen Ausgleich mit zusätzlichen Restriktionen punktbasierete, absolute Bewegungsmodelle aus unabhängigen DInSAR Auswertungen zu erzeugen.

Schlüsselwörter – B-Splines, Bodenbewegungen, Nivellement, DInSAR, SBAS, Multimissionsauswertung, ERS-1/2, EnviSat, TerraSAR-X, Sentinel-1

1. Einleitung

Die differentielle SAR-Interferometrie (DInSAR) ist eine moderne, satellitengestützte Methode zur Detektion von Deformationen der Erdoberfläche. Mit ihr ist es möglich Bewegungen verursacht durch natürliche Phänomene (z.B. Plattentektonik, Vulkanismus usw.) oder durch anthropogen Einflüsse, wie die Gewinnung von Rohstoffen, im mm-Bereich zu bestimmen. Im Gegensatz zum klassischen, terrestrischen Leitnivelement können Höhenänderungen mit einer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung bestimmt werden. Da die Erdoberfläche seit 1992 beginnend mit der ERS-1 (European

Remote-Sensing Satellite 1) Mission vielerorts nahezu kontinuierlich von Radarsatelliten aufgenommen wird, ist es möglich, Bewegungszeitreihen mit einer Länge von über 25 Jahre zu erzeugen.

Dass die Auswertung von radarinterferometrischen Zeitreihen großräumiger Bodenbewegungen heute schon zur wissenschaftlichen Praxis gehört, lässt sich durch eine Vielzahl von Veröffentlichungen belegen (CROSETTO ET AL. 2016). So gehört beispielsweise das Monitoring von vulkanisch aktiven Regionen zu den definierten Aufgaben der Sentinel-1 Mission der ESA (European Space Agency) (ESA 2018). Die Überwachung von Bodensenkungen und -hebungen durch anthropogene Einflüsse, wie den Kohleabbau, hat sich als eine Standardmethode durchgesetzt und wird in den Vermessungsverwaltungen einiger Länder genutzt (ENGEL & BUSCH 2018, KRICKEL 2018).

Mit der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) (FERRETTI ET AL. 2001) und der Small Baseline Subset (SBAS) Technik (BERARDINO ET AL. 2002, BERARDINO ET AL. 2002, PEPE & LANARI, 2006, PEPE ET AL. 2015) haben sich zwei Strategien für die multitemporale Auswertung von Interferogrammstapeln etabliert. Die SBAS Methode zeichnet sich gegenüber der auch weit verbreiteten PSI Methode dadurch aus, dass sie für die Detektion großräumiger Deformationen und nicht zur Auswertung individueller Rückstreuer ausgelegt ist.

All diese Verfahren haben es gemein, dass die Daten der einzelnen Radarmissionen gesondert ausgewertet werden müssen. Eine Ausnahme bilden PEPE ET AL. (2005), die eine gemeinsame Auswertung von ERS-1/2 und EnviSat (Environmental Satellite) Aufnahmen durchführen, indem ein zeitlicher Überlappungsbereich der Missionen genutzt wird. Dazu wird die ERS-1/2 Zeitreihe bis zum Mai 2004 verlängert, obwohl die Aufnahmen von ERS-2 seit 2001 aufgrund von defekten Gyroskopen nur noch bedingt für Radarinterferometrie nutzbar sind.

In diesem Beitrag wird eine Methode präsentiert, die externe Daten in Form von amtlichen Leitnivelements nutzt, um unabhängige SBAS Auswertungen zu einer zusammenhängenden Deformationszeitreihe zu verknüpfen. Dafür stehen amtliche Daten des Leitnivelements „Rheinbraun“ von 1993 bis 2017 zur Verfügung. Außerdem liegen die Ergebnisse von fünf unabhängigen SBAS Auswertungen aus vier Satellitenmissionen (ERS-1/2, EnviSat, TerraSAR-X und Sentinel-1A) vor, wobei es sich dabei um ungewrappte, zeitliche Phasengradienten handelt. Diese können für Punkte bestimmt werden, die über die Zeit eine stabile Rückstreucharakteristik aufweisen. Folglich unterscheiden sich die Lage und Anzahl der ausgewerteten Punkte für die verschiedenen Datensätze. Anschließend werden die Phasengradienten unter Verwendung der Wellenlänge, des Einfallswinkels und der Annahme, dass es keine horizontale Bewegungskomponenten gibt, in Höhenänderungen umgerechnet.

Nun müssen die Nivellement- und DInSAR Daten zunächst an den gleichen Koordinaten vorliegen. Um dies zu gewährleisten werden die Höhenänderungen mittels inverser Distanzgewichtung (IDW) an den Koordinaten der Höhenfestpunkte interpoliert. Dies geschieht unter der Annahme, dass sich die Höhenänderungen im Raum nur langsam ändern.

Anschließend wird durch die interpolierten Höhenänderungen ein B-Spline basiertes Deformationsmodell geschätzt. Dieses Modell ermöglicht es zum einen die zeitlichen Höhenänderungen in ein zeitlich kontinuierliches Bewegungsmodell zu überführen und zum anderen können durch die Wahl der Modellparameter bestimmte Frequenzen (z.B. atmosphärisch bedingte hochfrequente Störungen) herausgefiltert werden. Durch Einführung von Restriktionen wird dieses Modell zwangsfrei auf den amtlichen Höhen gelagert. Dies ist notwendig, da das funktionale Modell datumsdefekt ist, was darauf zurückzuführen ist, dass ein absolutes Modell aus Differenzen geschätzt wird. Außerdem überlappen sich einige Teilzeitreihen nicht, wodurch es zu mehreren Datumsdefekten kommt, die mit Restriktionen überwunden werden müssen.

Dieser Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im folgenden Abschnitt 2. wird kurz das Untersuchungsgebiet vorgestellt und die Vorprozessierung der Nivellement- und Radardaten umrissen. Anschließend wird in Abschnitt 3. die hier verwendete Methode zur Erzeugung langer DInSAR Zeitreihen mittels B-Splines

präsentiert. Die Ergebnisse der Anwendung dieser Methode im Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht wird in Abschnitt 4. analysiert und evaluiert. Abschließend wird in Abschnitt 5. das vorgestellte Verfahren zusammengefasst, zudem werden mögliche Erweiterungen der präsentierten Methode diskutiert.

2. Datengrundlage und Vorprozessierung

Das in diesem Beitrag betrachtete Untersuchungsgebiet ist die Niederrheinische Bucht, die durch den aktiven Braunkohletagebau (Hambach, Inden und Garzweiler) sowie den mittlerweile inaktiven Steinkohleuntertagebau (Aachener und Erkelenzer Revier) geprägt ist. Durch die damit verbundenen Sumpfungmaßnahmen bzw. Flutungen der stillgelegten Zechen kommt es in diesen Bereichen von NRW zu großräumigen Bodenbewegungen, die durch amtliche Leitnivellements in einem 4-Jahre Zyklus überwacht werden BOJE ET AL. (2008). Die beeinflusste Region ist in Abb. 1 mit einer gelben Schraffur hinterlegt. In diesem Gebiet werden ebenfalls die genannten Leitnivellements durchgeführt. Des Weiteren wird diese Region seit 1992 beinahe durchgängig von verschiedenen SAR-Missionen beobachtet. In Abb. 2 ist ein zeitlicher Überblick von Aufnahmedaten dargestellt, der lediglich Radarmissionen der ESA bzw. des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) umfasst.

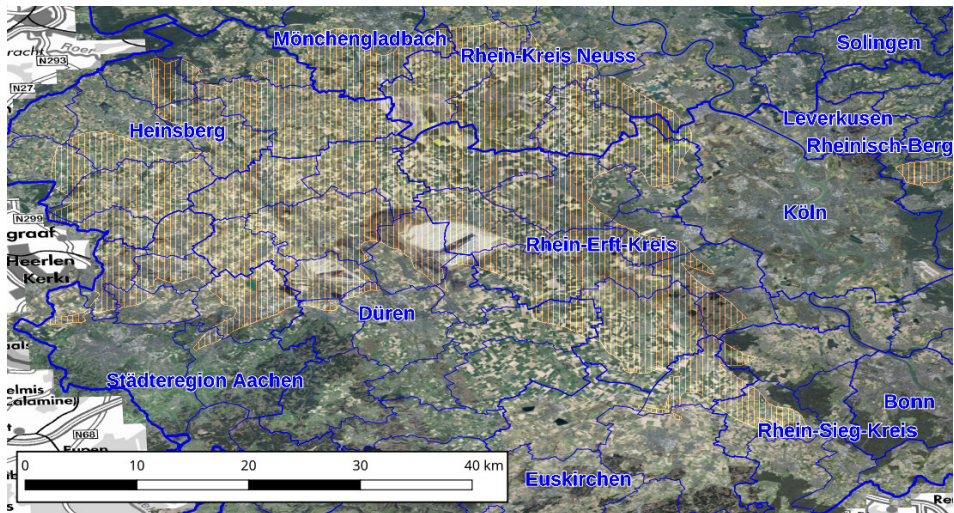


Abbildung 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet der Niederrheinischen Bucht mit Darstellung des vom Bergbau beeinflussten Gebiets (gelbe Schraffur). Quelle: WMS GEOportal.NRW

2.1. Leitnivellements

Es liegen die Beobachtungsdaten der sieben Nivellementskampagnen „Rheinbraun“ von 1993 bis 2017 vor. Diese werden in einem Einzelepochenausgleich ausgewertet (HALSIG ET AL. 2013). Zur Lagerung werden vier Datumspunkte gewählt, für die angenommen werden kann, dass sie keiner Deformation unterliegen, und die außerdem über das Gebiet verteilt sind (vgl. Tab. 1). Insgesamt werden die Höhen von 7708 Höhenpunkten ausgeglichen, wobei im Folgenden nur die 1801 Punkte betrachtet werden, die in allen sieben Epochen beobachtet wurden.

Tabelle 1: Datumpunkte der Nivellementsausgleichungen.

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

2.2. SBAS Analysen

Zur Detektion der Bodenbewegungen in der Niederrheinischen Bucht werden außerdem SAR-Aufnahmen aus 25 Jahren von vier verschiedenen Satellitenmissionen verwendet (vgl. Abb. 2). Es werden Daten der ERS-1/2 (European Remote-Sensing Satellites) Mission, von EnviSat (Environmental Satellite), von TerraSAR-X und von Sentinel-1A genutzt, wobei zur Abdeckung des Untersuchungsgebiets zwei Orbitstreifen der EnviSat Mission benötigt werden. Es liegen ausschließlich Daten von Descending Orbits vor. Alle weiteren Informationen, wie die Anzahl der verwendeten SAR Aufnahmen als auch den Anfang und das Ende der Zeitreihen, können Tab. 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Beschreibung der DInSAR Bildstapel und Gegenüberstellung mit den Nivellementdaten.

Mission	ERS-1/-2	Env337	Env380	TSX	S1A	Nivellement
SAR Szenen	64	66	71	65	33	7 Epochen
Erste Szene	09.05.92	18.12.03	21.12.03	09.01.15	20.11.15	1993
Letzte Szene	12.12.00	07.01.10	10.10.10	24.12.16	13.05.17	2017
Interferogramme	161	170	170	178	83	—
Rückstreuer	144.302	203.590	278.952	218.939	896.081	7708 NivP

Zur Auswertung wird die Small BAseline Subset (SBAS) Methode in Kombination mit dem Extended Minimum Cost Flow (EMCF) Algorithmus mit multitemporalem Phasenfilter genutzt, wie sie in BERARDINO ET AL. (2002), PEPE & LANARI (2006) und PEPE ET AL. (2015) beschrieben sind. Dafür wird die Remote Sensing Software Graz (RSG) in Version 7.50.13 genutzt.

Im Folgenden werden allerdings nicht die endgültigen Ergebnisse der SBAS Auswertungen verwendet, stattdessen wird die Auswertekette nach dem Phase Unwrapping abgebrochen. Die hier verwendeten Ergebnisse sind somit zeitliche Phasendifferenzen in Line-of-Sight (LOS), die noch atmosphärische Störsignale enthalten. Mit den entsprechenden Wellenlängen und Einfallswinkeln werden diese in Höhendifferenzen umgerechnet. Dies geschieht unter der gängigen Annahme, dass es keine horizontalen Bewegungskomponenten gibt. Diese Annahme ist notwendig, da mit Ausnahme von Sentinel-1 keine Daten von Ascending Orbits zur Verfügung stehen und somit eine korrekte Separation der vertikalen Komponente aus den LOS Bewegungen nicht möglich ist (YIN & BUSCH 2018).

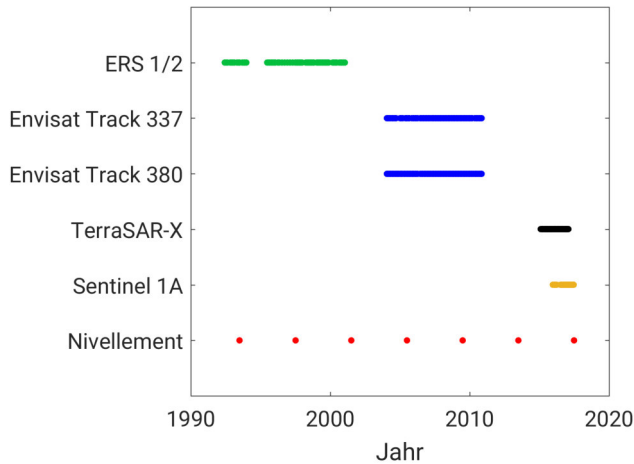


Abbildung 2: Zeitlicher Überblick über die verwendeten Daten.

3. Methodik

Bei der Erzeugung von zusammenhängenden DInSAR Zeitreihen bzw. deren Lagerung tritt zunächst das Problem auf, dass sowohl die stabilen Rückstreuer der unabhängigen SBAS Auswertungen als auch die amtlichen Höhenpunkte unterschiedliche Lagekoordinaten aufweisen. Die Nivellementdaten liegen in n_T Epochen mit jeweils n_X amtlichen Höhenfestpunkten $h_{\mathbf{x}_k, \text{niv}}^{T_j}$ an den Koordinaten $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{n_X}\}$ vor. Während die Koordinaten klar definiert sind, erstrecken sich die Messkampagnen $\mathbf{T} = [T_1, \dots, T_{n_T}]^T$ der Leitnivellements über mehrere Monaten. Hier wird angenommen, dass sich $T_j \in \mathbf{T}$ jeweils auf die Mitte des Jahres bezieht. Bei den DInSAR Daten verhält es sich genau umgekehrt. Die Aufnahmedaten der n_t SAR Bilder $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_{n_t}]^T$ sind eindeutig festgelegt, wohingegen sich die n_x Koordinaten der kohärenten Rückstreuer $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n_x}\}$ jeweils auf das Zentrum einer Auflösungszelle beziehen. Des Weiteren liegen die DInSAR Daten in Form von Höhendifferenzen $\Delta h_{\mathbf{x}_k}^{\Delta t_m}$ vor, wobei sich $\Delta t_m = M_m - S_m$ auf den Zeitraum bezieht, der zwischen den Aufnahmedaten $M_m \in \mathbf{t}$ und $S_m \in \mathbf{t}$ mit $M_m > S_m$ der Master- bzw. Slaveszene des m -ten Interferogramms liegt.

3.1. Erzeugung von gemeinsamen Punktzeitreihen

Unter der Annahme, dass sich die zeitlichen Höhenänderungen im Raum nur langsam ändern, werden die mit DInSAR bestimmten Höhendifferenzen $\Delta h_{\mathbf{x}_k}^{\Delta t_m}$ mittels inverser Distanzgewichtung (IDW) an den Koordinaten der Nivellementpunkte \mathbf{X} interpoliert. Hierfür wird lediglich die Menge \mathcal{V}_r^i der kohärenten Pixel \mathbf{x}_k herangezogen, die in einem Umkreis mit Radius $r = 200m$ um einen Nivellementpunkt

\mathbf{X}_i liegen, wobei es mindestens fünf sein müssen:

$$\Delta h_{\mathbf{X}_i, \text{DlnSAR}}^{\Delta t_m} = \frac{\sum_{\forall k \in \mathcal{V}_r^i} p_k \Delta h_{\mathbf{x}_k}^{\Delta t_m}}{\sum_{\forall k \in \mathcal{V}_r^i} p_k} \quad (1)$$

Die Gewichte p_k sind definiert als

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

wobei $\|\cdot\|$ für die euklidische Norm steht und die Potenz q festlegt, wie schnell die Gewichte mit zunehmender Entfernung abnehmen. Somit liegen nun an den Koordinaten der Höhenfestpunkte \mathbf{X}_i sowohl amtliche Absoluthöhen aus dem Einzelepochenausgleich als auch eine Höhendifferenz pro Interferogramm vor.

3.2. B-Spline Modell

Ziel ist es nun die Höhendifferenzen aus den unabhängigen SBAS Auswertungen in eine zusammenhängende (relative) Höhenzeitreihe zu konvertieren und dabei gleichzeitig das noch enthaltene atmosphärische Störsignal herauszufiltern. Dazu wird eine Linearkombination von gleichabständigen, kubischen B-Splines

$$f(t) = \sum_{j=-1}^{m+1} a_j B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t} - j\Delta\kappa) \quad \text{mit} \quad \bar{t} = t - \kappa_0 \quad (3)$$

genutzt, wobei $B_{\Delta\kappa}^3(t)$ der um $t = 0$ zentrierte, kubische B-Spline ist und $\Delta\kappa$ die Intervallbreite der Spline-Knotenpunkte darstellt (SCHOENBERG 1973, S. 11ff.). Hierfür wird im Untersuchungszeitraum eine regelmäßige, geordnete Reihe von Knoten $t_1 \geq \kappa_0 < \dots < \kappa_m \leq t_{n_t}$ mit Abstand $\Delta\kappa$ erzeugt. Die in Gl. (3) implizit enthaltenen Knoten κ_{-1} und κ_{m+1} sind nötig, um die Ränder der Zeitreihe durch ein vollständiges kubisches Polynom zu beschreiben.

Folgt man SÜNKEL (1985), lässt sich zeigen, dass Gl. (3) einem Tiefpassfilter entspricht, dessen Transferfunktion durch

$$H(\nu) = \frac{3}{2 + \cos(2\pi\nu\Delta\kappa)} \text{sinc}^4(\Delta\kappa\nu) \quad (4)$$

gegeben ist. Die B-Splines mit regelmäßig angeordneten Knoten bilden somit einen frequenzselektiven Tiefpassfilter mit der Cutoff-Frequenz ν_{cut} . Dabei ist die Cutoff-Frequenz ν_{cut} abhängig von der gewählten Knotenweite $\Delta\kappa$ und ergibt sich näherungsweise durch $\nu_{cut} \approx 1/(2\Delta\kappa)$, wie Abb. 3 entnommen werden kann. Die Cutoff-Frequenz ist als die Frequenz definiert, für die $H(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx -3dB$ gilt, was einem Leistungsabfall von 0.5 entspricht.

Die Auswertung der Basisfunktionen $B_{\Delta\kappa}^3(t)$ an den Aufnahmezeitpunkten der SAR Szenen t ergibt eine Matrix der Form

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_1 + 1\Delta\kappa) & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_1 - 0\Delta\kappa) & \dots & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_1 - (m+1)\Delta\kappa) \\ B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_2 + 1\Delta\kappa) & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_2 - 0\Delta\kappa) & \dots & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_2 - (m+1)\Delta\kappa) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_{n_t} + 1\Delta\kappa) & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_{n_t} - 0\Delta\kappa) & \dots & B_{\Delta\kappa}^3(\bar{t}_{n_t} - (m+1)\Delta\kappa) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Um die interpolierten Höhendifferenzen $\Delta h_{\mathbf{X}_i, \text{DlnSAR}}^{\Delta t_m}$ mit dem B-Spline Modell in Gl. (3) zu verknüpfen, wird zudem eine Differenzenmatrix \mathbf{A}_Δ benötigt. Jede Höhendifferenz ist einem Interferogramm

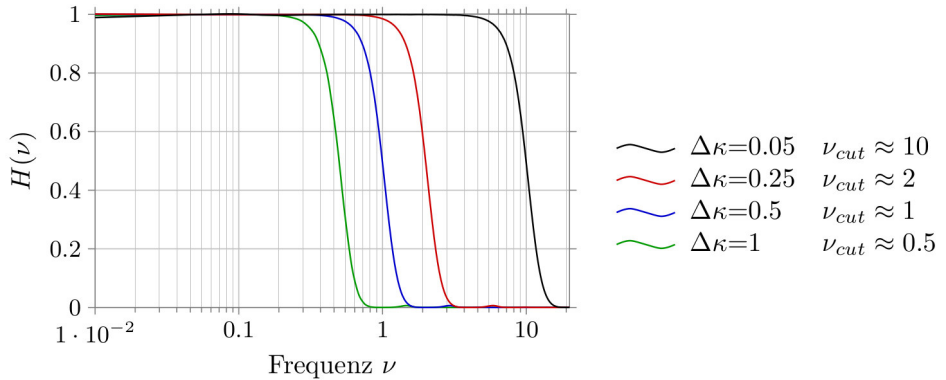


Abbildung 3: Transferfunktionen gleichabständiger, kubischer B-Spline Modelle für verschiedene Knotenabstände $\Delta\kappa$.

I_m zugeordnet. Entsprechend wird für den Aufnahmezeitpunkt der Masterszene M_m eine 1 bzw. eine -1 für den Aufnahmezeitpunkt der Slaveszene S_m in die Matrix \mathbf{A}_Δ eingetragen. Die Beobachtungsgleichungen zur Schätzung der Koeffizienten $\mathbf{a} = [a_{-1}, \dots, a_{m+1}]^T$ ergeben sich durch Multiplikation der beiden Modellmatrizen zu

$$\mathbf{I} + \mathbf{v} = \mathbf{A}_\Delta \mathbf{A}_t \mathbf{a} := \mathbf{A} \mathbf{a}, \tag{6}$$

wobei der Beobachtungsvektor \mathbf{I} die Höhendifferenzen $\Delta h_{\mathbf{X}_i, \text{DInSAR}}^{\Delta t_m}$ enthält.

3.3. Lagerung

Analog zur Ausgleichung von Höhenetzen weist die Modellmatrix \mathbf{A} mindestens einen Datumsdefekt auf, da in Gl. (6) versucht wird ein absolutes Modell aus differentiellen Beobachtungen zu schätzen. Es entsteht ein Datumsdefekt für jede zeitlich nicht zusammenhängende SBAS Auswertung. Zur Überwindung des Datumsdefekts wird die geschätzte Funktion $f(t)$ in Gl. (3) zwangsfrei auf den Nivellementdaten $h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^{T_j}$ gelagert. Dafür werden d Restriktionen der Form $\mathbf{B}^T \mathbf{a} = \mathbf{b}$ aufgestellt, die sich aus Bedingungen der Form

$$\sum_{\forall j \in \mathcal{V}^d} f(T_j) = \sum_{\forall j \in \mathcal{V}^d} h_{\mathbf{X}_i, \text{niv}}^{T_j} \tag{7}$$

ergeben, wobei \mathcal{V}^d die Menge der Nivellementepochen ist, auf die gelagert werden soll. Die Restriktionen können in einer Ausgleichung nach Parametern mit zusätzlichen Restriktionen berücksichtigt werden (Koch 1997, S. 184ff.).

3.4. Restriktionen zur numerischen Stabilisierung

Neben den Datumsdefekten, die sich aus den Beobachtungsdaten und dem gewählten Modell ergeben, kann die Designmatrix in Gl. (6) noch weitere Rangdefekte aufweisen oder zu einem schlecht konditionierten Normalgleichungssystem führen. Dies hängt maßgeblich vom gewählten Knotenabstand $\Delta\kappa$ sowie von der Größe der Datenlücken in bzw. zwischen den Zeitreihen ab. Des Weiteren sind die äußersten B-Splines, die den Rand beschreiben, in der Regel schlecht bestimmt.

Zur numerischen Stabilisierung der geschätzten Funktion an den Rändern werden an den Knoten κ_0 und κ_m Krümmungsrestriktionen $f''(\kappa_0) \stackrel{!}{=} 0$ bzw. $f''(\kappa_m) \stackrel{!}{=} 0$ eingeführt, woraus folgende Restriktionsgleichungen

$$\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{-1} \\ a_0 \\ \vdots \\ a_m \\ a_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

resultieren. Die schlecht bestimmten Knoten in Datenlücken bzw. an deren Rändern werden durch eine Analyse der Eigenwerte und -vektoren der Normalgleichungsmatrix $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ identifiziert. Anschließend werden diese eliminiert. Dies kann auf verschieden Weisen durchgeführt werden, entweder durch das erneute Aufstellen der Designmatrix \mathbf{A}_t unter Nicht-Berücksichtigung der zu eliminierenden Knoten oder durch das Anbringen sogenannter *Not-a-Knot* Restriktionen (DE BOOR 1978, S. 55–56).

Die Idee bei dieser Art von Restriktionen ist, an dem zu eliminierenden Knoten κ_j C^3 -Stetigkeit zu fordern. Somit ist die Funktion in den beiden angrenzenden Intervallen ein vollständiges Polynom dritten Grades und der Knoten dadurch ausgeschaltet. Durch Berechnung der dritten Ableitungen der Funktion $f(t)$ in diesen beiden Intervallen und anschließendem Gleichsetzen, ergeben sich Bedingungs-gleichungen der Form

$$a_{j-2} - 4a_{j-1} + 6a_j - 4a_{j+1} + a_{j+2} \stackrel{!}{=} 0. \quad (9)$$

Durch mehrfache Anwendung dieser Restriktionen können somit mehrere Knoten eliminiert werden, ohne die Normalgleichungen neu aufstellen zu müssen.

4. Anwendungsbeispiel in der Niederrheinischen Bucht

In Abschnitt 2. wurden zum einen das Untersuchungsgebiet der „Niederrheinische Bucht“ kurz vorgestellt, wie auch die zur Verfügung stehenden Daten, und zum anderen wurde die Vorprozessierung erläutert.

Im darauffolgenden Abschnitt 3. wurde ein Verfahren präsentiert, mit dem es möglich ist unabhängige SBAS Auswertungen gemeinsam auf Nivellementdaten zu lagern und somit zeitlich höher aufgelöste Punktzeitreihen zu erhalten.

Diese Methode wird nun auf die gegebenen Daten angewendet und die Ergebnisse kritisch analysiert, um die Vor- und Nachteile dieser Methode herauszuarbeiten. Dafür wird zunächst in Abschnitt 4.1. darauf eingegangen, wie die Parameter für das Modell gewählt wurden. Anschließend wird die Güte des geschätzten Modells betrachtet. Im darauffolgenden Abschnitt 4.2. wird anhand ausgewählter Punkte das Verhalten der hier präsentierten Methode genauer untersucht und bewertet.

Es sollte angemerkt werden, dass die Nivellementpunkte auf die Messepoche 1993 bezogen wurden, sodass es sich bei den Resultaten um relative Zeitreihen handelt, mit dem genannten Leitnivellement als Referenz. Diese Festlegung dient lediglich der späteren Darstellung und ist nicht zwingend notwendig.

4.1. Analyse der Güte des Modells

Für die Schätzung des Modells wird zunächst für alle Punkte ein identischer Set von Knoten angesetzt, wobei der Knotenabstand mit $\Delta\kappa = 0.8yr$ festgelegt wird. Unter Verwendung von Gl. (4) ergibt sich die Cutoff-Frequenz zu $\nu_{cut} \approx 0.55 \frac{1}{yr}$. Somit werden jährliche und halbjährliche Variationen herausgefiltert.

Mit dem gegebenen Knotengitter und den Aufnahmezeitpunkten kann mit Gl. (5) und Gl. (6) für jede Satellitenmission eine Designmatrix aufgestellt werden. Da sich die räumliche Abdeckung der verschiedenen Missionen unterscheidet, werden die Punkte anhand der verfügbaren Satellitendaten gruppiert und die zugehörigen Designmatrizen kombiniert. Für die weitere Auswertung werden nur solche Punkte betrachtet, für die zumindest Daten der ERS-1/2 Mission, von einem der beiden EnviSat Tracks und von Sentinel-1A vorliegen.

Für alle zulässigen Kombinationen wird nun das Knotengitter durch eine Eigenwertanalyse der Normalgleichungen unter Verwendung der Not-a-Knot Restriktionen aus Gl. (9) ausgedünnt. Zusätzlich wird das Modell an den Rändern durch die Krümmungsrestriktionen aus Gl. (8) stabilisiert. Zur Lagerung müssen drei Restriktionen eingeführt werden.

Zur ersten Analyse der Ergebnisse werden die geschätzten a posteriori Varianzen für jeden Punkt in Abb. 4 dargestellt. Die Varianz ist zum einen ein Maß für die Streuung der Beobachtungen, sagt jedoch auch aus, wie gut das geschätzte Modell zu den Beobachtungen passt bzw. welche Streuung durch das gefilterte Atmosphärenmodell verursacht wird.

Um die Interpretation zu erleichtern, wird für die Sentinel-1A Daten der mittlere Abstand einer Standard SBAS Auswertung zum geschätzten Modell berechnet und in Abb. 5 gezeigt. Dieses Bild entspricht näherungsweise der Höhenänderung zwischen der Referenzepoche 1993 und der ersten Sentinel-1A Aufnahme vom 20. Nov. 2015.

Der Vergleich der Bilder macht deutlich, dass die Stärke der Bodenbewegung keinen negativen Einfluss auf die Schätzung hat. Gerade im Bereich des Tagebaus Hambach mit den größten Höhenänderungen oder im Bereich von Köln, wo es zu keiner Bewegung kommt, treten die kleinsten Varianzen in Abb. 4 auf. Höhere Varianzen treten vermehrt im Erkelenzer und Aachener Revier auf, wo es im Zeitraum 1993 bis 2015 nominell eher kleinere Bewegungen gab.

Eine Betrachtung ausgewählter Punkte aus diesen Bereichen kann daher von Interesse sein. Aus diesem Grund werden die in Abb. 4 und 5 mit roten Dreiecken markierten Punkte im folgenden Abschnitt genauer untersucht.

4.2. Analyse der Zeitreihen von selektierten Punkten

Um das Verhalten des Modells sowie das Auftreten von höheren Varianzen in Abb. 4 genauer zu untersuchen, sind in Abb. 6 und 7 ausgewählte Zeitreihen für einzelne Punkte dargestellt.

Abbildung 6a zeigt das geschätzte Modell für einen Punkt in Wassenberg, nahe des Erkelenzer Reviers. Laut BOJE ET AL. (2008) wurde das Bergwerk im Jahr 1997 eingestellt und seitdem kommt es zur Flutung der Grubenstollen. Dies hat zur Folge, dass sich die Erdoberfläche in diesem Bereich hebt. Diese Hebung scheint jedoch erst zirka zwei Jahre später einzusetzen. Bis 1999 zeigen die ERS-1/2 Daten und entsprechend auch das Modell eine Senkung der Oberfläche, die in den Nivellementdaten nicht zu sehen ist. Außerdem ist eine Beschleunigung der Hebungsbewegung gegen Ende der ERS-1/2 Zeitreihe zu erkennen. Da die Nivellementdaten nur in einem Zyklus von vier Jahren vorliegen, scheint die Bewegung schon bereits 1997 einzusetzen. Durch die Datenlücke zwischen der ERS-1/2 und EnviSat Mission lässt sich das Bewegungsverhalten in dem interessanten Bereich zwischen Dez. 2000 und Dez. 2003 nicht genauer auflösen. Auffällig ist zudem das Ausschwingen des Modells am Ende der Zeitreihe, was durch die ungünstige Kombination einer Datenlücke von Okt. 2010 bis Nov. 2015 und der Kürze der Sentinel-1A Zeitreihe bedingt ist. Da der Rand bei der Approximation mit finiten Funktionen schlecht bestimmt ist, kann dies dort leicht zu genanntem Verhalten führen.

Im Aachener Revier wird ein Punkt in Aldenhoven näher betrachtet, dessen Bewegungsmodell in Abb. 6b zu sehen ist. Auch hier befand sich ein Steinkohleuntertagebau, der 1992 stillgelegt und ab 1993/94 geflutet wurde (BOJE ET AL. 2008). Die daraus resultierende Hebung fällt jedoch kleiner aus als im Erkelenzer Revier, wobei das genaue Einsetzen auch nicht mit den DInSAR Daten zu bestimmen ist, da es scheinbar in der Datenlücke zwischen der ERS-1/2 und EnviSat Mission liegt. Jedoch ist es durch die höhere zeitliche Auflösung in den radarinterferometrischen Daten eher zu sehen. Des Weiteren deuten die EnviSat Daten an, dass zunächst eine stärkere Hebungsbewegung erfolgt, die dann ab zirka 2008 abflacht. Dies ist ebenfalls nicht in den Nivellementdaten zu sehen. Abschließend werden zwei Punkte nahe des Tagebaus Hambach untersucht. Der Tagebau ist heute

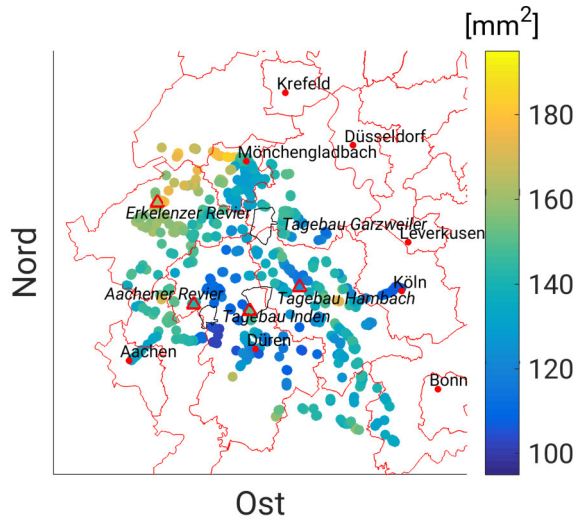


Abbildung 4: A posteriori Varianzfaktor als Gütekriterium für das geschätzte Lagerungsmodell in den auswertbaren Punkten. Die roten Dreiecke markieren die Lage der Punkte, die in Abschnitt 4.2. genauer untersucht werden und deren geschätzte Modelle in Abb. 6 und 7 dargestellt sind.

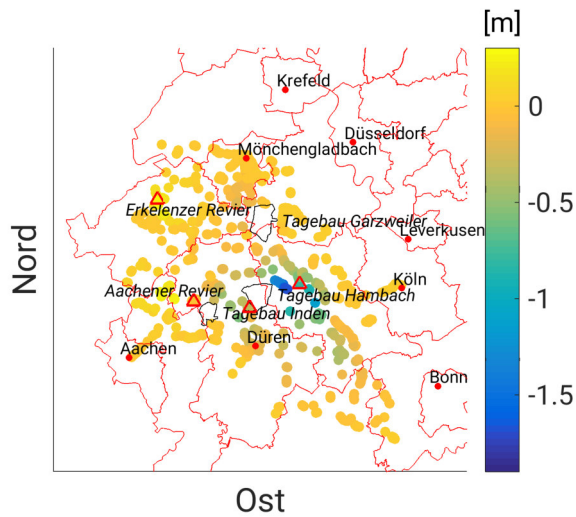
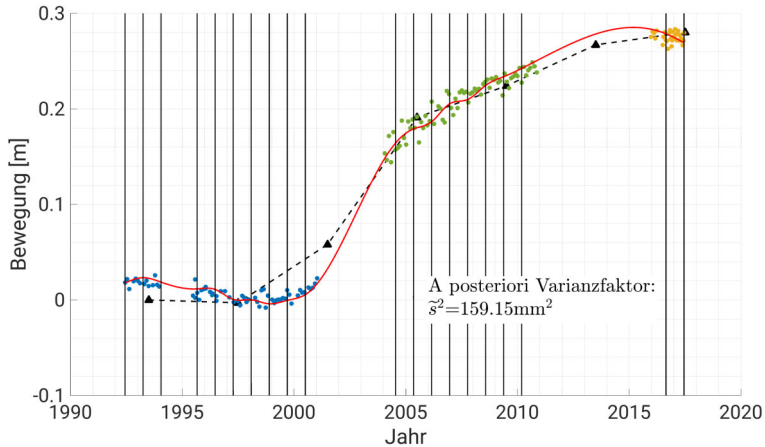
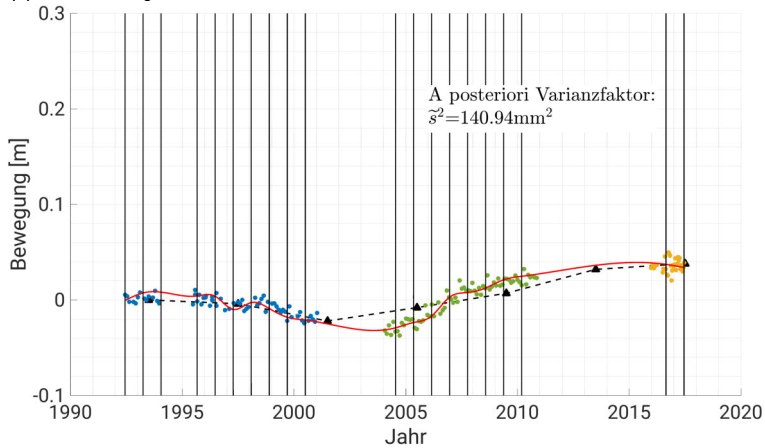


Abbildung 5: Mittlerer Abstand der SBAS Auswertung der Sentinel-1 Daten zum geschätzten Modell. Die roten Dreiecke markieren die Lage der Punkte, die in Abschnitt 4.2. genauer untersucht werden und deren geschätzte Modelle in Abb. 6 und 7 dargestellt sind.

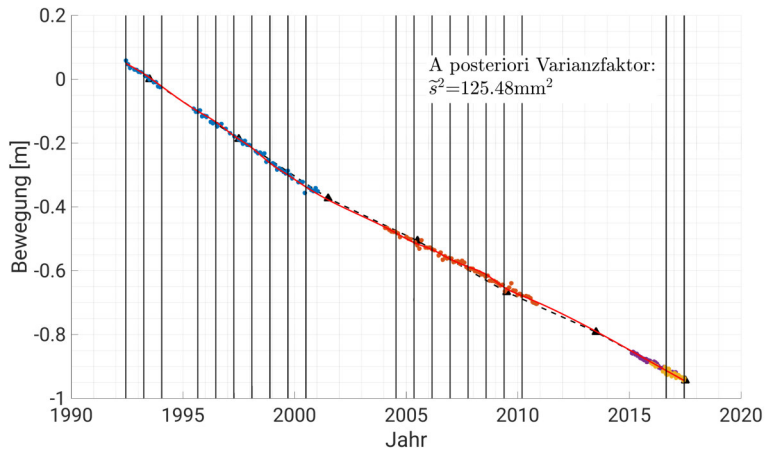


(a) Wassenberg, nahe des Erkelenzer Reviers.

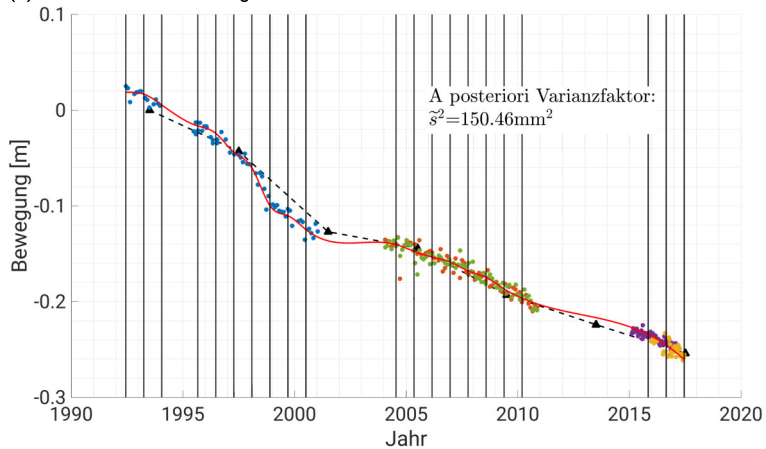


(b) Aldenhoven, nahe des Aachener Reviers.

Abbildung 6: Geschätztes Bewegungsmodell für ausgewählte Punkte im Bereich der stillgelegten Steinkohlereviere. Die Nivellementergebnisse sind als schwarze Dreiecke markiert und mit einer gestrichelten Linie verbunden, die einer stückweise linearen Bewegung entsprechen würde. Die rote Linie entspricht dem geschätzten B-Spline Modell, wobei die Positionen der Knoten κ durch vertikale Linien gekennzeichnet sind. Die farbigen Punkte stammen aus den SBAS Auswertungen, enthalten jedoch noch das atmosphärische Störsignal. Die Missionen sind wie folgt gekennzeichnet ERS-1/2 (blau), EnviSat Track 337 (rot), EnviSat Track 380 (grün), TerraSAR-X (lila), Sentinel-1A (gelb).



(a) Thorr, östlich des Tagebaus Hambach.



(b) Niederzier, südlich des Tagebaus Hambach.

Abbildung 7: Geschätztes Bewegungsmodell für ausgewählte Punkte im Bereich des Tagebaus Hambach. Für eine Erläuterung der Darstellung siehe Abb. 6.

noch aktiv und es kommt durch die Sumpfung zu großflächigen Senkungen in der Region. In Abb. 7a ist ein Punkt in Thorr dargestellt, der über die Jahre ein nahezu konstantes, lineares Bewegungsverhalten aufweist. Hier passen das geschätzte Bewegungsmodell und die amtlichen Nivellementdaten sehr gut zusammen. Schließlich ist in Abb. 7b die Bewegung eines Punktes in Niederzier, südlich von Hambach, zu sehen. Die Abweichungen zwischen dem geschätzten Modell und den Lagerungspunkten fällt wieder relativ klein aus. Allerdings zeigt ERS-1/2 zwischen den Nivellementepochen ein stark nicht lineares Verhalten.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren präsentiert, mit dem es möglich ist, mehrere unabhängige SBAS Auswertungen verschiedener Satellitenmissionen zu einer zusammenhängenden Zeitreihe zu verknüpfen. Dazu wurden Höhendifferenzen als Ergebnis des Phase Unwrappings verwendet, die noch das atmosphärische Störsignal enthalten. Zur Erzeugung der Zeitreihen wurden die DInSAR Daten zunächst an den Koordinaten von amtlichen Höhenfestpunkten mittels inverser Distanzgewichtung interpoliert. Anschließend wurden die verschiedenen Missionsauswertungen über die Schätzung eines B-Spline Modells, das auf den Nivellementdaten gelagert wurde, zu einer Zeitreihe zusammengefügt. Das Modell hat dabei mehrere Aufgaben: i) die Überführung der Höhendifferenzen in (zeitlich) absolute Werte, ii) die flexible Lagerung und Verknüpfung der DInSAR Daten ohne die Annahme von stückweise linearen Bewegungen und iii) die Filterung des atmosphärischen Störsignals.

Die Nachteile dieses Verfahrens liegen dabei in der räumlichen Interpolation. Dadurch ist die Auswertung momentan auf die Nivellementpunkte beschränkt, was zum Verlust der höheren Auflösung der DInSAR Daten führt. Dennoch können die zeitlich höher aufgelösten Zeitreihen an den amtlichen Höhenfestpunkten durchaus von Interesse sein.

Dieser Nachteil ließe sich umgehen, wenn auf eine vollständige raum-zeitliche Modellierung übergegangen würde. Anstatt die DInSAR Punkte lokal zu interpolieren, könnte das zeitliche B-Spline Modell mit einem räumlichen Modell verknüpft werden. Dazu könnten ebenfalls B-Splines verwendet werden. Dadurch würde sich die Möglichkeiten der Filterung im Raum eröffnen. Allerdings geschähe dies unter bestimmten Glattheitsannahmen des Deformationssignals, die bei abrupten Änderungen verletzt werden. Ist die Lage solcher schnellen Höhenänderungen bekannt, wäre die Modellierung mit finiten Elementen eine Alternative.

Danksagung

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-1 Daten der ESA, abgerufen 2017 vom Copernicus Open Access Hub.

Die Autoren möchten sich ferner beim Austrian Space Application Programme (ASAP) der österreichischen Forschungsgesellschaft bedanken, das mit dem Projekt 844386 – *Sentinel-1 InSAR* ein Teil dieser Arbeit gefördert und finanziert hat. Ebenso wurde ein Teil dieser Arbeit gefördert und finanziert durch das Projekt *HPC-TerrSYS* des Geoverbunds ABC/J.

Literatur

- 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, Heft 1. S. 2375 – 2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- BOJE, R., GSTIRNER, W., SCHULER, D. & SPATA, M. (2008): Leitnivelements in Bodenbewegungsgebieten des Bergbaus - eine langjährige Kernaufgabe der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen. *NÖV NRW* 3/2008. S. 33 – 42.
- CROSETTO, M., MONSERRAT, O., CUEVAS-GONZÁLEZ, M., NÚRIA, D. & CRIPPA, B. (2016): Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115. S. 78 – 89. DOI: 10.1016/j.isprs.2015.10.011.
- DE BOOR, C. (1978): *A Practical Guide to Splines*. 3. Auflage. Applied Mathematical Sciences 27. Springer, New York.
- ENGEL, T. & BUSCH, W. (2018): Landesweite, radarinterferometrische Bodenbewegungserfassung auf Grundlage von Sentinel-1-Daten – Verfahrensweise und Ergebnisse am Beispiel des Saarlandes. Tagungsband: GeoMonitoring 2018. Clausthal-Zellerfeld. S. 11 – 25.
- ESA (2018): Sentinel-1 Observation Scenario. <https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>, letzter Aufruf am 14.12.2018.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39, Heft 1. S. 8 – 20. DOI: 10.1109/36.898661.
- 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* 138, Heft 4/2013. S. 288 – 296.
- KOCH, K.-R. (1997): *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. Dümmler, Bonn.
- KRICKEL, W. (2018): Bodenbewegungskataster NRW - ein Werkstattbericht. Tagungsband: GeoMonitoring 2018. Clausthal-Zellerfeld. S. 27 – 37.
- 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, Heft 9. S. 2374 – 2383. 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, Heft 3. S. 265 – 269. DOI: 10.1109/LGRS.2005.848497.
- PEPE, A., YANG, Y., MANZO, M. & LANARI, R. (2015): Improved EMCF-SBAS Processing Chain Based on Advanced Techniques for the Noise-Filtering and Selection of Small Baseline Multi-Look DInSAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 53, Heft 8. S. 4394 – 4417. DOI: 10.1109/TGRS.2015.2396875.
- SCHOENBERG, I. J. (1973): Cardinal Spline Interpolation. *CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics* 12. SIAM, Philadelphia. DOI: 10.1137/1.9781611970555.

SÜNKELE, H. (1985): Fourier Analysis of Geodetic Networks. Optimization and Design of Geodetic Networks. Springer Berlin Heidelberg. S. 257 – 300. DOI: 10.1007/978-3-642-70659-2_12.

YIN, X. & BUSCH, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahmekonfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. Tagungsband: GeoMonitoring 2018. Clausthal-Zellerfeld. S. 119 – 138.