

Analyse und Bewertung von Fusionsstrategien für Raster- und Punktdaten zur Detektion von Bodenbewegungen in Hessen

MAREN RIEMER¹, KATRIN KRZEPEK¹ & DOROTA IWASZCZUK¹

Zusammenfassung: Großflächige Bodenbewegungen bergen Risiken für Gebäude wie z.B. Setzungsschäden. Durch die fortlaufende Beobachtung mittels Satelliten über einen längeren Zeitraum lassen sich präzise Bewegungsdaten von Bauwerken und Strukturen in zeitlichen Abständen von wenigen Tagen ableiten. Daten dieser Art stellt der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) zur Verfügung. Mit dem Ziel, eine umfassendere Bodenbewegungskarte zu erstellen, wird angestrebt, die BBD-Daten mit einer ALS-Differenzkarte zu fusionieren, welche ebenfalls Informationen über Bodenbewegungen enthält, jedoch den ländlichen Raum besser abdeckt. Untersucht wird, inwieweit beide Datensätze sich für die Fusion eignen. Neben der Überwindung datenspezifischer Herausforderungen wie den unterschiedlich großen Fehlerbereichen, erweist sich die Skalierung der Daten auf gleichgroße Referenzflächen als zielführend. Bei der Analyse von Bodenbewegungen innerhalb des Fehlerbereichs der ALS-Differenzkarten können Korrelationskoeffizienten von bis zu 0.89 zwischen beiden Datensätzen festgestellt werden.

1 Einleitung

Bodenbewegungen werden oft im Zusammenhang mit Katastrophenereignissen untersucht, deren Haupteigenschaft ist, dass schnell große Veränderungen der Erdoberfläche auftreten. Bodenbewegungen können aber auch in geringerem Maß großflächig über längere Zeiträume stattfinden. Mögliche Gründe können hierbei z.B. die Entnahme von Grundwasser, Bohrungen oder die unterirdische Lagerung von Gas oder Flüssigkeiten sein. Bereits leichte Hebungen und Setzungen des Bodens können sich negativ auf Bauwerke auswirken. Eine rechtzeitige Detektion solcher Bewegungen kann somit zur Vermeidung größerer Schäden führen, indem ggf. frühzeitig notwendige Maßnahmen eingeleitet werden. Die Fernerkundung bietet verschiedene Methoden zur Detektion von Bodenbewegungen. Eine Möglichkeit ist die Anwendung von Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Eine Weiterentwicklung dieser Methode ist die differentielle Radarinterferometrie (DInSAR), die von GABRIEL et al. (1989) vorgeschlagen wurde und seitdem häufig zur Detektion von Deformationen der Erdoberfläche eingesetzt wird. Mögliche Anwendungen sind hier die Detektion natürlicher Verformungen, wie sie z.B. nach Erdbeben oder bei Gletschern zu beobachten sind (MASSONET et al. 1993; GOLDSTEIN et al. 1993) aber auch menschengemachte Bodenbewegungen, wie beispielsweise durch Bergbau verursacht, können mit DInSAR detektiert werden (CARNEC & DELACOURT 2000). Ein Problem dieser Methode stellt die zeitliche Dekorrelation dar, da bei längerem zeitlichem Abstand zwischen den Aufnahmen Vegetationsbereiche unbrauchbar werden. Eine weitere Methode zur Detektion von kleinen Bodenbewegungen im Millimeterbereich stellt die von FERRETTI et al. (1999) vorgeschlagene Methode der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) dar. Hierbei wer-

¹ Technische Universität Darmstadt, Institut für Geodäsie,
Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse, Franziska-Braun-Str. 7, D-64287 Darmstadt,
E-Mail: [maren.riemer, katrin.krzepek, dorota.iwaszczuk]@tu-darmstadt.de

den in den Radarbildern stabil reflektierende Objekte, die in ihrer Position und Reflexionseigenschaften über lange Zeiträume unverändert bleiben, extrahiert und deren Phaseninformationen analysiert. Dies ermöglicht eine präzise Überwachung von Bodenbewegungen im Millimeterbereich über längere Zeiträume. Durch die Identifikation dieser sogenannten Persistent Scatterer (PS) können Veränderungen in der Erdoberfläche, wie Setzungen oder Hebungen, kontinuierlich und genau verfolgt werden. Bodenbewegungen werden bei der PSI durch Zeitreihen ausgedrückt, was einen Vorteil gegenüber DInSAR bietet. Der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) stellt Bodenbewegungen für ganz Deutschland bereit, die durch PSI gewonnen wurden. Die PS werden dabei als Punktdaten in einer Web-App zur Verfügung gestellt. Dabei fällt allerdings auf, dass hauptsächlich Daten für urbane Gebiete vorliegen, was mit der Art der Prozessierung zusammenhängt. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Fusion mit einem weiteren Datensatz sinnvoll, der in nicht durch PSI-Daten abgedeckten Gebieten Bodenbewegungen enthält, um so eine flächendeckende Bewegungskarte zu erstellen.

Im Folgenden wird untersucht, inwiefern sich für diesen Zweck ALS-Differenzkarten eignen, die Bewegungen zwischen zwei digitalen Geländemodellen (DGM) unterschiedlicher Zeitpunkte abbilden. Die beiden zu fusionierenden Datensätze fallen in die Kategorie der kooperativen Daten, da beide Informationen über Bodenbewegungen enthalten, deren Lage sich vor allem in urbanen Gebieten überschneidet. Die Datenfusion ermöglicht es, diese Redundanz zu nutzen, um die Daten über ihre räumlichen Eigenschaften miteinander in Verbindung zu setzen. Herausforderungen, die bei der Fusion dieser Daten entstehen, sind die unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Abdeckungen sowie unterschiedlich große Werte- und Fehlerbereiche. Vorprozessierungsschritte, die diesen Herausforderungen begegnen, werden anhand eines Untersuchungsgebietes vorgestellt und diskutiert. Außerdem werden drei verschiedene Fusionsstrategien angewandt und ausgewertet.

2 Methodik

2.1 Daten

Für die Fusion stehen wie bereits beschrieben Raster- und Punktdatensätze zur Verfügung. Die Punktdaten werden dabei vom BBD bereitgestellt. Die Datengrundlage bilden SAR-Daten der Copernicus Sentinel-1-Mission mit einer Wiederholungsrate von sechs Tagen und Abtastung im C-Band mit einer Wellenlänge von 5,6 cm. Der Startpunkt der Aufzeichnung liegt für alle PS des BBD im Jahr 2015 und reicht aktuell bis zum Ende des Jahres 2021 (KALIA et al. 2021). Verwendet wurden nur die vertikalen PS, die Hebungen und Setzungen des Bodens im Millimeterbereich anzeigen. Dieser Datensatz wird beim BBD auf ein Grid der Größe 50x50 m aggregiert und gemittelt, so dass nur ein PS pro Bereich vorliegt (KALIA et al. 2021). Die zur Berechnung der Differenzkarten verwendeten DGMs stammen von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG). Sie basieren auf dreidimensionalen Messpunkten, die mit Hilfe von ALS aufgenommen wurden. Verwendet wurde das Produkt DGM1 mit einer Gitterweite von 1 m und einer Genauigkeit von +/- 15 cm. Daraus können die Differenzen zwischen der 1. Messepoche von 2007-2014 und der 2. Messepoche von 2015-2021 berechnet werden. (HESSISCHE VERWALTUNG FÜR BODENMANAGEMENT UND GEOINFORMATION 2023). Das DGM der älteren Epoche wurde zur Vergleichbarkeit auf das aktuelle Höhenbezugssystem der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (ADV 2017), welches

beim DGM der neueren Epoche Anwendung fand, angepasst. Um aus diesen Daten Bodenbewegungen ableiten zu können, wurden sog. Differenzenkarten erzeugt. Diese wurden nach der folgenden Formel berechnet:

$$Diff = DGM_{2. Epoche} - DGM_{1. Epoche} \quad (1)$$

Das Ergebnis-Raster beinhaltet sämtliche Veränderungen der Erdoberfläche, die im Zeitraum zwischen den beiden Messungen stattgefunden haben.

Herausforderungen für eine Fusion der beiden Datensätze ergeben sich vor allem durch die unterschiedlichen Messzeiträume und Wertebereiche, sowie die eingeschränkte räumliche Vergleichbarkeit durch die Aggregation der PS-Daten. Eine generelle Schwierigkeit besteht außerdem in den sehr unterschiedlichen Aufnahmeverfahren, mit denen die Daten gewonnen wurden. Daher gilt es zu untersuchen, ob die Daten trotz dieser Herausforderungen fusioniert werden können.

2.2 Untersuchungsgebiete

Um der Problematik Wertebereich zu begegnen, wurden Untersuchungsgebiete gewählt, die eine möglichst große Bewegung aufwiesen. Je näher diese am Fehlertoleranzbereich der DGMs von ± 15 cm liegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Bewegung auch in den ALS-Daten enthalten ist. Ausgewählt wurden daher die Orte Motzfeld, Fischbach und der Solarpark Dreieich, die laut BBD über die größten Setzungen innerhalb Hessens verfügen. Die ALS-Daten der ersten Epoche wurden für diese Gebiete im Jahr 2011 aufgenommen, die der zweiten Epoche im Jahr 2019.

2.3 Anpassung der Zeiträume

Für eine Fusion sind gleiche Zeiträume erforderlich, auf die die Bodenbewegungen sich beziehen, da die Datensätze ansonsten nicht korrekt miteinander in Verbindung gebracht werden können. Zu diesem Zweck ist eine Retrodiktion der PS-Zeitreihen notwendig, mit deren Hilfe Aussagen über den Verlauf in der Vergangenheit getroffen werden können. Die Setzungen in den untersuchten Gebieten verlaufen weitestgehend linear, was eine einfache Extrapolation zur Retrodiktion erlaubt. Zusätzlich dazu muss der Ausgangspunkt der Messungen verschoben werden, um eine Vergleichbarkeit zu garantieren. Im BBD liegt der Startpunkt der Messungen im Jahr 2015. Darauf aufbauend wurden alle sechs Tage Bewegungen relativ zu diesem Referenzzeitpunkt aufgezeichnet. Nach der Extrapolation in das Jahr 2011, in dem die DGMs der ersten Epoche aufgezeichnet wurden, musste also der Referenzzeitpunkt, auf den die Messungen sich beziehen, ebenfalls in dieses Jahr verschoben werden.

Durch die Extrapolation der PS-Zeitreihen in die Vergangenheit konnte ein vergleichbarer Startpunkt der Punkt- und Rastermessreihen erreicht werden. Eine weitere Herausforderung bestand darin, im nächsten Schritt auch die Endzeitpunkte anzugleichen. Der verwendete PS-Datensatz lieferte Messungen bis zum Ende des Jahres 2021. Die zweite Überfliegung der ausgewählten Regionen fand im Jahr 2019 statt. Es ist also nicht nur eine Extrapolation der PS nötig, sondern die gleiche Methodik muss ebenfalls auf die Differenzenkarten angewendet werden, wie die nachfolgende Abbildung zeigt. Hier dargestellt ist ein einzelnes Pixel einer Differenzenkarte, das unter einem vertikalen PS liegt. Da nur zwei Messungen vorliegen, wurden diese jeweils als Punkte in der Abbildung markiert. Weil der genaue Verlauf der Bewegungen zwischen den beiden Messzeitpunkten unbekannt ist, wurde die Gerade gestrichelt dargestellt.

Es ist anzunehmen, dass ein linearer Verlauf vorliegt, da die PS in allen Untersuchungsgebieten eine großflächige Senkung anzeigen und diese linear verläuft.

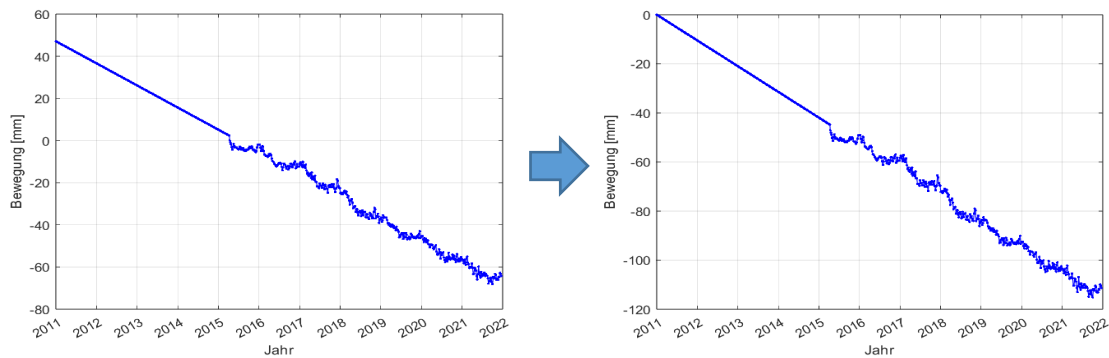


Abb. 1: Extrapolation eines exemplarischen PS sowie Verschiebung des Referenzzeitpunktes. Messungen liegen lediglich für den Zeitraum zwischen 2015 und 2021 vor, die Gerade von 2011 bis 2015 stellt den geschätzten Verlauf vor Startpunkt der Messungen dar

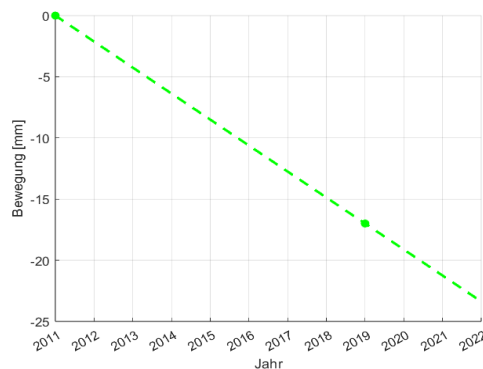


Abb. 2: Extrapolation eines exemplarischen Pixels einer Differenzkarte: Als Punkte dargestellt sind die Zeitpunkte, zu denen die DGMs aufgezeichnet wurden, aus denen die Differenzkarten berechnet wurden. Da der Bewegungsverlauf zwischen diesen Zeitpunkten nur geschätzt wurde, wird dieser als gestrichelte Linie dargestellt

2.4 Bildung des Mittelwertes aus Referenzflächen

Die Extraktion der Pixelwerte direkt unter den PS stellt einen wesentlichen Schritt bei der Fusion der beiden Datensätze dar, da somit eine erste Verbindung hergestellt und geprüft werden kann, inwieweit die Daten zusammenpassen. Allerdings bilden die PS den Mittelwert der berechneten vertikalen Bewegungswerte aller Punkte ab, die in ascending und descending Line of Sight (LOS) innerhalb eines 50×50 m großen Bereichs gemessen wurden. Vergleicht man die PS also mit den direkt darunter liegenden Pixeln ist es naheliegend, dass keine große Übereinstimmung der gemessenen Bewegungen herrscht, da es sich nicht um die Standorte handelt, an denen tatsächlich gemessen wurde. Diese sind zwar bekannt, konnten allerdings nicht verwendet werden, da keine Zeitreihen für die tatsächlichen Messstandorte vorliegen. Eine mögliche Herangehensweise an diese Problematik besteht darin, für die Pixel unter den PS ebenfalls den Mittelwert aller Pixelwerte in einem vergleichbaren Referenzbereich zu bilden. Da mit dem DGM1 Produkt der HVBG gearbeitet wurde, entspricht ein Pixel einem 1×1 m Bereich auf der Erdoberfläche. Für die Pixel unter den jeweiligen PS wird daher der Mittelwert der 49×49 darum liegenden Pixel berechnet und anschließend mit den PS verglichen. Auch in anderen Arbeiten, in denen eine Fusion von Raster- und Punktdaten angestrebt wird, erfolgt in

den meisten Fällen eine Mittelwertbildung verschiedener Referenzflächen von Pixeln vor dem eigentlichen Fusionsschritt. HEUEL (2004) sowie CAO et al. (2015) bilden vor der Fusion den Mittelwert des Neunerfeldes (3×3 Pixel) um die Punktdaten. Die ESF NACHWUCHSFORSCHUNGSGRUPPE EXTRUSO (2018) bildet bei ihrer Methodik zwar keinen Mittelwert, sucht aber nachdem am besten passenden Pixelwert innerhalb eines vorgegebenen Referenzbereichs. Anstatt des Neunerfeldes wird dabei ein 5×5 Pixel-Referenzbereich verwendet. WEIGL et al. (2004) suchen ebenfalls nach dem besten Pixelwert und verwenden dabei einen Referenzbereich von 3×3 Pixeln. Um verschiedene Vorgehensweisen auf deren Tauglichkeit für eine Fusion der speziellen Datensätze zu untersuchen, wurden alle oben genannten Referenzbereiche verwendet, um Mittelwerte zu bilden.

2.5 Fusionsmethoden

2.5.1 Direkte Fusion

Eine Methode zur Fusion der PSI-Daten und Differenzkarten ist die direkte Fusion. Hierfür wurden die Pixelwerte direkt unter den PS, sowie die Mittelwerte aus Referenzflächen verwendet, nachdem eine Anpassung der Zeiträume beider Datensätze mittels Extrapolation stattgefunden hat. Somit konnte direkt festgestellt werden, ob die von den beiden Datensätzen angezeigten Bodenbewegungsinformationen sich bereits ähneln. Zu diesem Zweck wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson zwischen PS und darunterliegenden bzw. gemittelten Pixelwerten berechnet. Liegt der Korrelationskoeffizient r nahe dem Wert Eins kann davon ausgegangen werden, dass die Datensätze für eine direkte Fusion geeignet sind. In diesem Fall sind weitere Schritte zur Angleichung der Daten nicht notwendig. Um die Bodenbewegungen anschließend flächendeckend für ganz Hessen darzustellen, bietet es sich an, weiterhin die genaueren PSI-Daten zu verwenden, diese als Raster darzustellen und Lücken im unbebauten ländlichen Raum durch die Differenzkarten zu schließen.

2.5.2 Korrektur der Rasterdaten mit genaueren Punktwerten

Die Fusion in Form von Korrektur der Rasterdaten mit genaueren Punktwerten wird in vergleichbaren Arbeiten aufgegriffen. CAO et al. (2015) zeigen in ihrer Arbeit, dass die Kombination von verschiedenen Datenquellen und die Integration von in situ Punktdaten und Fernerkundungsdaten in Form von Rastern eine effektive Methode zur Generierung von täglichen Schneehöhen mit höherer Genauigkeit und räumlicher Auflösung darstellt. WEIGL et al. (2004) fusionieren in ihrer Arbeit Regenradardaten mit in situ Bodenniederschlagsdaten, indem die ungenaueren Rasterdaten mit den in situ Punktmessungen korrigiert werden. Das genaue Vorgehen bei der Fusion unterscheidet sich allerdings in beiden Arbeiten. Während CAO et al. (2015) vor der Fusion den Mittelwert der Pixel einer 3×3 Referenzfläche berechnen, verwenden WEIGL et al. (2004) den Pixelwert innerhalb der Referenzfläche, der am meisten dem Punktwert ähnelt und führen die Fusion mit diesem durch. Anschließend werden in beiden Arbeiten Korrekturraster berechnet, mit denen das ursprüngliche Raster korrigiert wird. Bei CAO et al. (2015) wird dieses Korrekturraster durch Interpolation der Differenzen zwischen Punkt- und Rasterwerten sowie Interpolation der Punktdaten und anschließende Differenzbildung beider Raster erzeugt. Als Interpolationsmethoden wurden hierbei für die vorliegenden Datensätze sowohl die Verwendung von Inverse Distance Weighting (IDW) als auch Kriging untersucht. Die daraus abgeleitete Fusionsgleichung lautet folgendermaßen:

$$BBW_{korrr} = BBW_R + \overline{(BBW_{PS} - BBW_{Diff})} \quad (2)$$

BBW_{korrr} ist dabei das durch die in den PS gespeicherten Bodenbewegungen korrigierte Raster. BBW_R steht für die Differenzenkarte. BBW_{PS} bezeichnet das Raster, das dadurch entsteht, das die PS interpoliert werden. BBW_{Diff} steht für das Raster, das durch die Interpolation der Differenzen zwischen PS- und Pixelwert entsteht. Das folgende Ablaufdiagramm stellt den gesamten Prozess bei der Fusion angelehnt an die von CAO et al. (2015) vorgestellte Methode für die vorliegenden Datensätze dar.

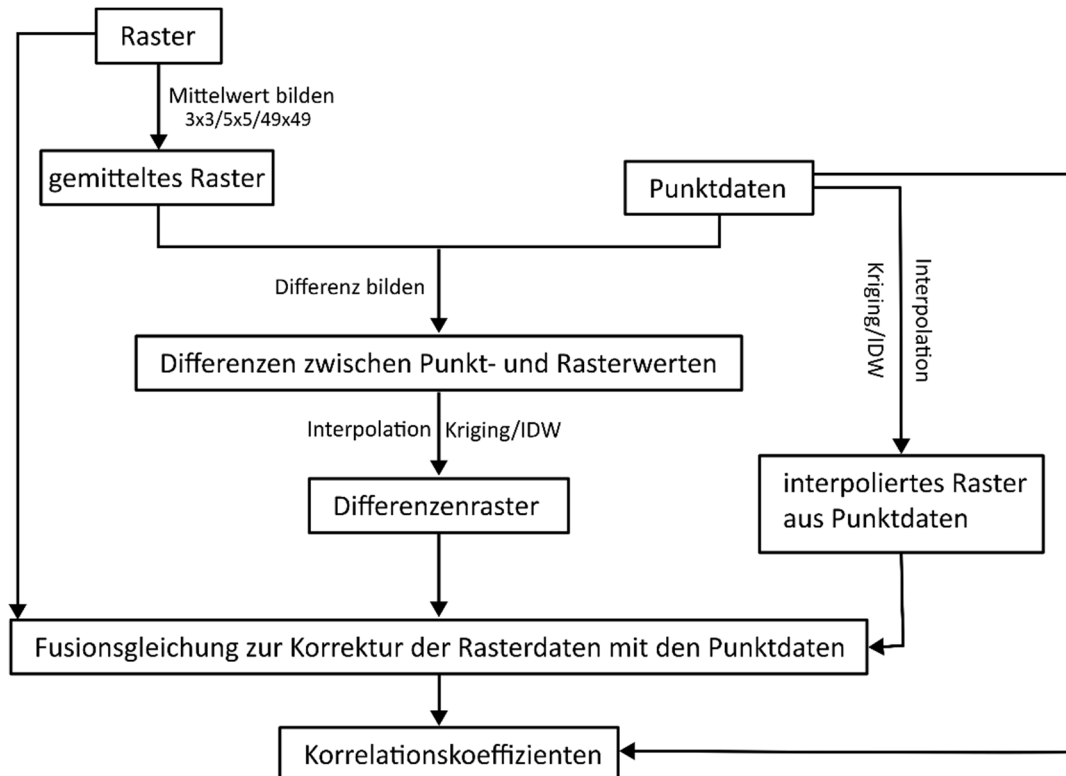


Abb. 3: Ablaufdiagramm zur Verdeutlichung der notwendigen Arbeitsschritte bei der Fusion angelehnt an die von CAO et al. (2015) vorgestellte Fusionsmethode

Bei WEIGL et al. (2004) erfolgt die Berechnung des Korrekturrasters durch Interpolation der sog. Aneichfaktoren. Diese beschreiben den Quotienten zwischen PS- und bestem Pixelwert innerhalb des verwendeten Referenzbereiches um den PS. Als Interpolationsmethoden wurden erneut IDW und Kriging untersucht. Die Fusion erfolgt anschließend durch Multiplikation der Differenzenkarte mit dem interpolierten Aneichfaktoren raster. Um den Prozess bei der Fusion von Raster- und Punktdaten angelehnt an die von WEIGL et al. (2004) vorgeschlagene Methode zu verdeutlichen, wird nachfolgend ein entsprechendes Ablaufdiagramm gezeigt.

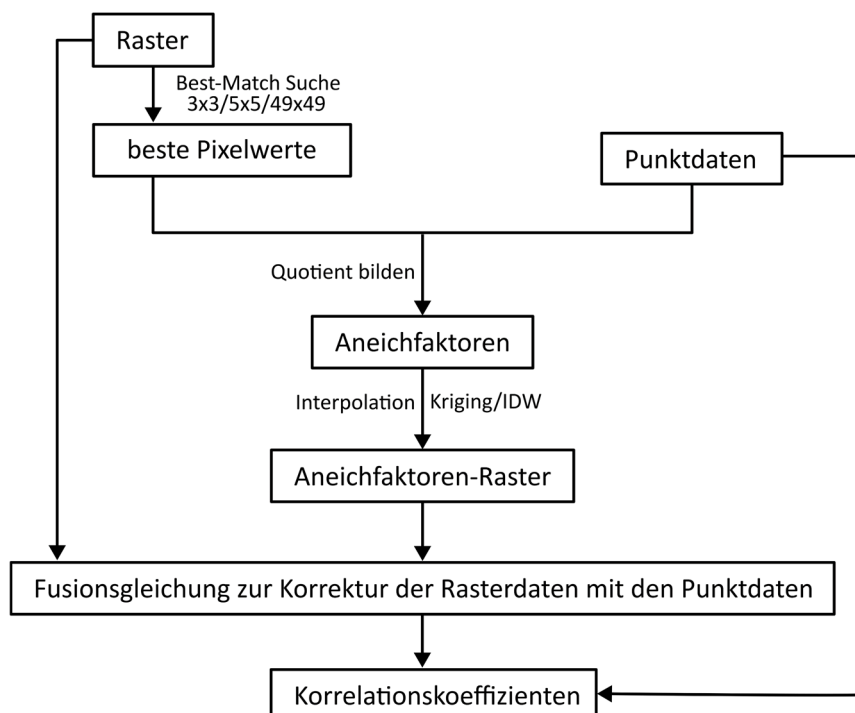


Abb. 4: Ablaufdiagramm zur Verdeutlichung der notwendigen Arbeitsschritte bei der Fusion angelehnt an die von WEIGL et al. (2004) vorgestellte Fusionsmethode

Beide oben beschriebenen Methoden wurden jeweils für die vorliegenden Datensätze angewandt und ausgewertet. Um Aussagen über die Qualität der Fusionen tätigen zu können, wurde erneut der Korrelationskoeffizient nach Pearson herangezogen.

3 Ergebnisse & Diskussion

Zur Qualifizierung der Fusionsmethoden im Vergleich zu einer Referenz wurden Korrelationskoeffizienten nach Pearson berechnet. Als Referenz diente dabei der r-Wert, der durch eine direkte Fusion der Raster- und Punktdatensätze bestimmt wurde. Untersucht wurde anschließend, wie der r-Wert sich im Vergleich dazu verändert, wenn die Fusion angelehnt an die von CAO et al. (2015) bzw. nach WEIGL et al. (2004) vorgeschlagenen Fusionsmethoden auf die Daten angewendet werden. Zusätzlich wurde untersucht, wie der r-Wert sich verändert, wenn das Pixel direkt unter dem PS verwendet wird (1×1 Pixel), sowie der Mittelwert bzw. der beste Wert der 3×3/5×5/49×49 Pixel um den PS. Außerdem wurden die jeweiligen Interpolationsschritte einmal mit Kriging und einmal mit IDW durchgeführt, um herauszufinden, ob eine der beiden Interpolationsmethoden zu genaueren Fusionsergebnissen beitragen kann. Um keine scheinbar sehr hohen Korrelationen nach der Fusion zu erhalten, weil die Pixel direkt unter den PS genau auf deren Wert angepasst wurden, wurden die Fusionen nach CAO et al. (2015) und WEIGL et al. (2004) jeweils nur mit einer Teilmenge der PS durchgeführt. Dadurch konnte hinterher überprüft werden, wie die übrigen PS mit den fusionierten Pixeln darunter korrelieren. Nur durch dieses Vorgehen kann eine aussagekräftige Bewertung davon erfolgen, wie sehr sich die Genauigkeit der Rasterdaten durch die Fusionsmethoden im Gegensatz zur direkten Fusion verändert hat. Für die direkte Fusion wurden alle in den Untersuchungsgebieten verfügbaren PS verwendet. Als Verbesserung der Genauigkeit wurde der Zustand definiert, dass der r-Wert nach der Fusion nach CAO et al. (2015) oder WEIGL et al. (2004) näher eins liegt als bei der

direkten Fusion. Das bedeutet, dass das Pixel näher am Wert der als genauer erachteten PS liegt. Für jedes Untersuchungsgebiet wurden 16 Korrelationskoeffizienten berechnet. Die folgenden Tabellen enthalten die Korrelationskoeffizienten, die für die einzelnen Untersuchungsgebiete errechnet wurden.

Tab. 1: Korrelationskoeffizienten für Motzfeld, unterteilt nach Fusions- und Interpolationsmethoden.

Referenz-be-reich	Direkte Fusion	Fusion angelehnt an CAO et al. (2015)		Fusion angelehnt an WEIGL et al. (2004)	
		Kriging	IDW	Kriging	IDW
1×1	-0,07	0,50	0,41	0,01	0,01
3×3	0,12	0,51	0,49	0,17	0,17
5×5	-0,28	0,52	0,52	0,04	0,04
49×49	-0,21	0,17	0,12	0,02	0,02

Wie in Tabelle 1 dargestellt, ließ sich für Motzfeld durch eine direkte Fusion mit den Korrelationskoeffizienten kein Zusammenhang zwischen PS und Pixelwert nachweisen. Der r-Wert ist in drei von vier Fällen sogar leicht negativ, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass die von den PS angezeigte Bewegung zu weit unter dem Fehlertoleranzbereich der Differenzenkarten lag. Die jeweils besten Ergebnisse für die Pixel direkt unter den vertikalen PS (1×1), und die Mittelwerte der 3×3/5×5/49×49 Pixel um die PS wurden durch eine Fusion nach CAO et al. (2015) erreicht. Hinsichtlich der Interpolationsmethode ist festzustellen, dass in allen vier Fällen Kriging die höchsten Ergebnisse geliefert hat. Das insgesamt beste Ergebnis wurde durch die Verwendung des 5×5 Mittelwertes in Kombination mit der Fusion nach CAO et al. (2015) erzielt. Die beiden Interpolationsmethoden Kriging und IDW lieferten dabei denselben r-Wert.

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten für Fischbach, unterteilt nach Fusions- und Interpolationsmethoden.

Referenz-be-reich	Direkte Fusion	Fusion angelehnt an CAO et al. (2015)		Fusion angelehnt an WEIGL et al. (2004)	
		Kriging	IDW	Kriging	IDW
1×1	0,21	0,25	-0,09	0,38	0,05
3×3	0,19	0,17	-0,07	0,23	0,28
5×5	0,08	0,23	-0,05	0,30	0,30
49×49	0,21	0,25	0,08	0,14	0,26

Wie in Tabelle 2 zu sehen, sind die r-Werte für das Untersuchungsgebiet Fischbach bei der direkten Fusion nahe Null, was darauf hindeutet, dass nur wenige Werte annähernd vergleichbar sind. Ebenfalls zu sehen ist, dass nicht alle getesteten Szenarien zu einer Verbesserung der Korrelationsergebnisse führten. Bei der Verwendung von IDW bei der Fusion nach CAO et al. (2015) ist eine deutliche Verschlechterung aller Werte zu beobachten, in drei von vier Fällen wird der r-Wert sogar negativ. Bei der Verwendung von Kriging verbesserten sich die r-Werte hingegen in drei von vier Fällen. Die insgesamt besten Werte lieferte für dieses Untersuchungsgebiet aber die Fusion nach WEIGL et al. (2004). Dabei führte in zwei von vier Fällen die Verwendung von IDW zur Interpolation zu den genaueren Ergebnissen und in einem Fall Kriging. Das insgesamt beste Ergebnis wurde durch die Berechnung der Fusion nach WEIGL et al. (2004) unter Verwendung des Pixels direkt unter dem PS und Interpolation mit Kriging erzielt.

Tab. 3: Korrelationskoeffizienten für Solarpark Dreieich, unterteilt nach Fusions- und Interpolationsmethoden

Referenz-be-reich	Direkte Fusion	Fusion angelehnt an CAO et al. (2015)		Fusion angelehnt an WEIGL et al. (2004)	
		Kriging	IDW	Kriging	IDW
1×1	0,53	0,41	0,52	0,32	0,35
3×3	0,65	0,40	0,51	0,56	0,56
5×5	0,68	0,48	0,51	0,11	0,11
49×49	0,89	0,47	0,51	0,03	0,03

Tabelle 3 zeigt, dass der Solarpark Dreieich von allen Untersuchungsgebieten die höchsten r-Werte durch die direkte Fusion aufweist. Diese sind gleichzeitig auch die höchsten Ergebnisse für dieses Untersuchungsgebiet. Durch keine Fusionsmethode wurden höhere r-Werte erreicht. Das insgesamt beste Korrelationsergebnis wurde durch die Berechnung des Mittelwertes von 49×49 Pixeln erreicht.

Die folgende Tabelle fasst für die vier Untersuchungsgebiete zusammen, mit welchen Komponenten jeweils der höchste r-Wert erzielt werden konnte. Außerdem wird aufgezeigt, wie viele PS dafür insgesamt untersucht wurden und welche durchschnittliche Setzung diese über den extrapolierten Zeitraum anzeigen.

Tab. 4: Übersicht über alle Komponenten, mit denen für die Untersuchungsgebiete die höchsten Korrelationskoeffizienten erzielt wurden, sowie die durchschnittliche von den PS im BBD angezeigte Bewegung und die Anzahl der PS, die für die Berechnungen verwendet wurden

Untersuchungs-gebiet	Referenz-bereich	Fusions-methode	Interpolations-methode	Höchster r-Wert	Ø Bewe-gung PS [cm]	Anzahl un-tersuchter PS
Motzfeld	5×5	CAO et al. (2015)	Kriging + IDW	0,52	-8,8	51
Fischbach	1×1	WEIGL et al. (2004)	Kriging	0,38	-11,5	16
Solarpark Dreieich	49×49	Direkte Fusion	keine	0,89	-12,5	59

Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass weder bezüglich des Referenzbereichs, der Fusionsmethode noch der Interpolationsmethode eine klare Empfehlung zur Anwendung auf die Datensätze gegeben werden kann.

4 Fazit & Ausblick

Die erfolgreiche Extrapolation der PSI-Daten auf den Zeitraum der DGMs sowie umgekehrt ermöglicht eine konsistente Analyse über einen Zeitraum von 2011 bis 2021. Dies bildet die Grundlage für eine zuverlässige Fusion der Daten. Die Qualität der Fusion hängt stark von der Wahl des Untersuchungsgebietes ab. In Gebieten mit Bodenbewegungen im Bereich von ± 15 cm, wie beispielsweise im Solarpark Dreieich, korrelieren die Daten bereits beim direkten Vergleich stark ohne weitere Bemühungen, die ungenaueren Rasterdaten mit den Punktwerten zu korrigieren. Der Solarpark Dreieich weist mit einem r-Wert von 0,89 die insgesamt höchste

Korrelation mit den PS-Werten auf. Dieser Wert tritt bei der direkten Fusion mit vorher berechnetem Mittelwert der 49×49 Pixel um die jeweiligen PS auf, der dem Bereich entspricht, auf den die vertikalen PS aggregiert wurden. Daher ist es wichtig, bei der Fusion von PSI-Daten und Differenzkarten darauf zu achten, dass nur Bewegungen in der Größenordnung des Fehlertoleranzbereiches in den Differenzkarten sichtbar sind und nur dann eine zuverlässige Fusion erfolgen kann.

Um aussagekräftigere Ergebnisse hinsichtlich der Frage nach der am besten geeigneten Fusionsmethode zu produzieren, müssen in Zukunft weitere Gebiete untersucht werden. Es ist allerdings fraglich, ob mit dem aktuellen Rasterdatensatz überhaupt ein eindeutiges Ergebnis erzielt werden kann. Die DGMs, aus denen die Differenzkarten berechnet wurden, können bis zu +/- 15 cm von einer Kontrollfläche abweichen, weshalb kleinere Bodenbewegungen in den Differenzkarten nicht nachweisbar sind. Da die ausgewählten Untersuchungsgebiete aber schon die größten Bodenbewegungen innerhalb Hessens aufweisen, ist es schwierig, weitere geeignete Untersuchungsgebiete zu finden. Für eine effektive Fusion der Daten werden aber Gebiete mit Bewegungen im Rahmen des Fehlertoleranzbereichs als sinnvoll erachtet, wie am Beispiel des Solarpark Dreieich zu sehen ist.

Die Problematik mit dem hohen Fehlertoleranzbereich wird sich wahrscheinlich in Zukunft verbessern, da aktuell eine dritte Befliegung von Hessen im Auftrag der HVBG durchgeführt wird. Für diese wird trotz gleichbleibendem Toleranzbereich eine deutlich höhere Genauigkeit erwartet. Differenzkarten, die dann aus der zweiten und dritten Messkampagne erstellt werden, werden demnach auch deutlich kleinere Bodenbewegungen abbilden können als die bisherigen Daten, da größere Abweichungen nahe am Fehlertoleranzbereich vor allem bei der ersten Messkampagne zu finden sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Fusion von Differenzkarten und PSI-Daten eine vielversprechende Methode zur großflächigen Detektion und Darstellung von Bodenbewegungen ist. Mit einer sorgfältigen Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten können qualitativ hochwertige Ergebnisse und ein Mehrwert an Informationen erzielt werden, wenn die datenspezifischen Herausforderungen beachtet und die Vorgehensweise bei der Fusion darauf angepasst wird. Mit der Bereitstellung der DGMs der dritten Messepoche wird sich die Qualität der Fusion weiter verbessern, da durch genauere ALS-Daten auch kleinere Bewegungen in den Differenzkarten abgebildet werden können.

5 Danksagung

Wir danken Herrn Carsten Dorn von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) für seine Unterstützung und die ausführlichen Erläuterungen bezüglich der technischen Hintergründe der Erhebung.

Wir danken außerdem den Mitarbeitenden des Projektes „Umwelt 4.0: Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten“, an das sich diese Arbeit anlehnt.

6 Literaturverzeichnis

- ADV, 2017: Richtlinie für den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in der Bundesrepublik Deutschland. <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Integrierter-geodaetischer-Raumbezug/binarywriterservlet?imgUid=59770a88-3739-b261-4b34-98951fa2e0c9&uBasVariant=11111111-1111-1111-1111-111111111111>, letzter Zugriff 03.02.24.
- BOLEN, S., BRINGI, V. N. & CHANDRASEKAR, V., 1998: An Optimal Area Approach to Inter-comparing Polarimetric Radar Rain-Rate Algorithms with Gauge Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**(3) 605-623.
- CAO, G., HOU, P., ZHENG, Z. & TANG, S., 2015: Generation of daily snow depth from multi-source satellite images and in situ observations. *Journal of Geographical Sciences*, **25**(10), 1235-1246.
- CARNEC, C. & DELACOURT, C., 2000: Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics*, **43**(1), 43-54.
- ESF NACHWUCHSFORSCHUNGSGRUPPE EXTRUSO, 2018: Zwischenbericht Mai 2018. https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/geoinformatik/ressourcen/dateien/forschung/projekte/extruso/180530_EXTRUSO_Zwischenbericht_c.pdf?lang=de, letzter Zugriff 03.02.24.
- FERRETTI, A., PRATI, C. & ROCCA, F., 1999: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**(1), 8-20.
- GABRIEL, A. K., GOLDSTEIN, R. M. & ZEBKER, H. A., 1989: Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **94**(B7), 9183-9191.
- GOLDSTEIN, R. M., ENGELHARDT, H., KAMB, B. & FROLICH, R. M., 1993: Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream. *Science*, **262**(5139), 1525-1530.
- HESSISCHE VERWALTUNG FÜR BODENMANAGEMENT UND GEOINFORMATION, 2023: Digitale Geländemodelle. <https://hvbg.hessen.de/landesvermessung/geotopographie/3d-daten/digitale-gelaendemodelle>, letzter Zugriff 03.02.24.
- HEUEL, E.-M., 2004: Quantitative Niederschlagsbestimmung aus Radardaten - Ein Vergleich von unterschiedlichen Verfahren unter Einbeziehung der Statistischen Objektiven Analyse. Doktorarbeit, Universitäts- und Landesbibliothek Bonn.
- KALIA, A. C., FREI, M. & LEGE, T., 2021: BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, zfv 4/2021, 273-279.
- MASSONNET, D., ROSSI, M., CARMONA, C., ADRAGNA, F., PELTZER, G., FEIGL, K. & RABAUTE, T., 1993: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**(3895), 138-142.
- WEIGL, E., REICH, T., LANG, P., WAGNER, A., KOHLER, O. & GERLACH, N., 2004: Projekt RADOLAN - Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer), Zusammenfassender Abschlussbericht für die Projektlaufzeit von 1997 bis 2004. https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/abschlussbericht_pdf.pdf;jsessionid=93915EFC8EEFD08A685A67A887456C6.live21064?_blob=publicationFile&v=2, letzter Zugriff 03.02.24.