

Abschlussbericht Umwelt 4.0

- Cluster I -

Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten

Projektjahr 2 & 3

Prof. Dr.-Ing. Dorota Iwaszczuk¹, Prof. Dr. Andreas Henk², Dr. Benjamin Homuth³, Maren Riemer¹, Dr. Michael Rudolf² & Katrin Krzepek¹

31. Dezember 2024

¹Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse

²Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Ingenieurgeologie

³Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Für eine lebenswerte Zukunft



HESSEN
Hessisches Ministerium für
Digitalisierung und Innovation



digitales.hessen

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	3
2 Kurze Darstellung	4
2.1 Aufgabenstellung	4
2.2 Planung und Ablauf Projektjahr 2023	5
2.2.1 AP 23-1: Datenanforderung und Datenaufbereitung LiDAR-Daten und Copernicus-Daten	5
2.2.2 AP 23-2: Erstellung eines LiDAR-Differenzenplanes	5
2.2.3 AP 23-3: Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der LiDAR-Differenzenpläne	6
2.2.4 AP 23-4: Plausibilitätsprüfungen neue Copernicus-Daten	6
2.2.5 AP 23-5: Darstellung und Analyse der Copernicus-Daten im zeitlichen Verlauf	7
2.2.6 AP 23-6: Zusammenführung der Datensätze und Integration weiterer Daten	7
2.2.7 AP 23-7: Implementierung in innerbehördliche Arbeitsprozesse	8
2.3 Planung und Ablauf Projektjahr 2024	9
2.3.1 AP 24-1: Erstellen eines Bewegungsatlas und einer Datenbank	9
2.3.2 AP 24-2: Öffentliche Bereitstellung über Geologie-Viewer	9
2.3.3 AP 24-3: Bereitstellung und Implementierung der Daten für Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter	10
2.3.4 AP 24-4: Bewertung SBAS-Verfahren zur Erweiterung des Bodenbewegungsdienstes	10
2.3.5 AP 24-5: Erstellung einer Webseite	10
2.3.6 AP 24-6: Berichterstellung und Datenabgabe	11
3 Eingehende Darstellung	12
3.1 Ergebnisse Projektjahr 2023	12
3.1.1 AP 23-1: Datenanforderung und Datenaufbereitung LiDAR-Daten und Copernicus-Daten	12
3.1.2 AP 23-2: Erstellung eines LiDAR-Differenzenplanes	17
3.1.3 AP 23-3: Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der LiDAR-Differenzenpläne	19
3.1.4 AP 23-4: Plausibilitätsprüfungen neue Copernicus-Daten	22
3.1.5 AP 23-5: Darstellung und Analyse der Copernicus-Daten im zeitlichen Verlauf	24
3.1.6 AP 23-6: Zusammenführung der Datensätze und Integration weiterer Daten	34
3.1.7 AP 23-7: Implementierung in innerbehördliche Arbeitsprozesse	38
3.2 Ergebnisse Projektjahr 2024	42
3.2.1 AP 24-1: Erstellen eines Bewegungsatlas und einer Datenbank	42
3.2.2 AP 24-2: Öffentliche Bereitstellung über Geologie-Viewer	45
3.2.3 AP 24-3: Bereitstellung und Implementierung der Daten für Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter	45
3.2.4 AP 24-4: Bewertung SBAS-Verfahren zur Erweiterung des Bodenbewegungsdienstes	45
3.2.5 AP 24-5: Erstellung einer Webseite	50
3.2.6 AP 24-6: Berichterstellung und Datenabgabe	52
3.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	53
4 Ausblick	54
Literatur	55

1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt Umwelt 4.0 Cluster I wurden Bodenbewegungen in Hessen analysiert um deren Ursachen zu identifizieren und die Ergebnisse für Behörden und die Öffentlichkeit aufzubereiten. Hierbei wurden verschiedene Datensätze aus flugzeuggestützten Laserabstandsmessungen (LiDAR) und satellitengestützten Radarmessungen (PS-InSAR) mit geowissenschaftlichen (Hydrogeologie, Geologie, Bodenkundlich) und kartographischen (Landnutzung, Infrastruktur, Bebauung) Datensätzen verschnitten. Somit konnten anomale Regionen mit erhöhten Bewegungsraten aus den Fernerkundungsdaten extrahiert und klassifiziert werden.

Im ersten Projektjahr (2022) wurde festgestellt, dass die ursprünglichen Differenzenpläne ungenau waren. Daher wurden in den darauffolgenden Projektjahren 2 und 3, neue hochauflösende LiDAR-Daten (DGM1/ DOM1) beschafft, konvertiert und systematische Fehler, wie Streifenanpassungen, korrigiert. Differenzenkarten wurden mithilfe eines MATLAB-Skripts erstellt und anschließend mit Python ausgewertet, um Bewegungsgebiete zu detektieren. Dabei wurde der Fokus auf Korrelationen mit geologischen Gegebenheiten wie Gipsvorkommen oder Bergbau sowie auf Effekte durch Bodensenkungen gelegt. Letztere entstehen vor allem durch Grundwasserentnahme oder Bodenschrumpfungen bei Trockenheit.

Zur Verbesserung der Effizienz wurden die als Jupyter-Notebook in arcpy vorliegenden Skripte auf reines Python umgestellt, was eine Nutzung ohne ArcGIS-Lizenz ermöglichte. Mit dem entwickelten Softwaremodul `ü4py` wurden die Daten prozessiert, infrastrukturelle Einflüsse herausgeschnitten und Bewegungsgebiete hinsichtlich Landnutzung, Geländeform und Volumenveränderungen klassifiziert. Die häufigsten Ursachen waren Baustellen und landwirtschaftliche Aktivitäten, während geologische Ursachen meist nicht eindeutig nachgewiesen werden konnten.

Ein weiterer Fortschritt war die Integration neuer Copernicus-PSI-Daten, die Bodenbewegungen über einen längeren Zeitraum dokumentierten. Diese wurden mit GNSS-Daten und weiteren Quellen wie dem SBAS-Verfahren verglichen. Für letzteres, wurde eine detailliertere Untersuchung des bekannten Absenkungsgebiets im Industriegebiet Höchst durchgeführt. Zudem wurden aus den punktförmigen PS-InSAR Daten, Rasterdaten erstellt, die sich in ArcGIS darstellen lassen. Die Visualisierung erfolgte durch Zerlegung der Zeitreihen in lineare, saisonale und transiente Komponenten, was Anomalien in Regionen wie Frankfurt und dem Ried aufdeckte. Unterschiede in der Berechnung der InSAR Daten, insbesondere bei nicht-linearen Bewegungen, sorgen für teilweise abweichende Ergebnisse für die unterschiedlichen InSAR Datensätze. Teilweise kann eine gute Korrelation mit Grundwasserspiegeländerungen nachgewiesen werden, insbesondere in Regionen mit geringem Grundwasserflurabstand.

Die im Projekt anfallenden Daten wurden für GIS-Anwendungen aufbereitet und in eine Geodatenbank integriert. Dies ermöglicht die Erstellung eines Bodenbewegungsatlas für Hessen, der geologische Gefahren und große Anomalien dokumentiert. Die Ergebnisse fließen in innerbehördliche Arbeitsprozesse ein und sollen über den Geologie-Viewer des HLNUG veröffentlicht werden. Parallel dazu laufen Vorbereitungen zur Integration der Daten in externe Geo-Portale. Eine projektbegleitende Webseite informiert die Öffentlichkeit transparent über Fortschritte.

2 Kurze Darstellung

2.1 Aufgabenstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem ersten Projektjahr in 2022 wurden in 2023 und 2024 vertiefende Analysen mit den bestehenden und neuen Datensätzen durchgeführt. Hierfür wurde das Projekt in verschiedene Arbeitspakete unterteilt welche im folgenden kurz dargestellt werden (Tabelle 1). Die Hauptaufgabe des Projekts ist die Identifikation von Regionen mit erhöhter Bodenbewegung aus PS-InSAR und LiDAR Daten. Hierbei lag der Fokus auf eine genauere Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Bewegungen, genauere Ursachenforschung, sowie der Anwendung anderer Methoden (SBAS-InSAR) auf das Untersuchungsgebiet.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete und deren Inhalt

Jahr 2 - 2023		
AP 23-1	Datenanforderung und -aufbereitung: LiDAR & Copernicus	Aufgrund unzureichender Genauigkeit der bisherigen Differenzenpläne werden neue Daten angefordert und aufbereitet, um einen verbesserten Differenzenplan nach den Methoden des ersten Projektjahres zu erstellen.
AP 23-2	LiDAR-Differenzenplan	Erstellung eines Höhenmodellen-Differenzenplans für Hessen auf Basis von LiDAR-Daten unter Anwendung des im ersten Projektjahr entwickelten Ansatzes, hierfür werden die neu erhaltenen Daten korrigiert und umgewandelt.
AP 23-3	Bewegungsgebiete-Beschreibung	Bodenbewegungsgebiete sollen hinsichtlich ihrer Ursachen klassifiziert und auf Korrelationen mit Gipsvorkommen, Bergbaugebieten, Fluidentnahmen im Untergrund sowie Bodenschumpfungen durch Austrocknung untersucht werden.
AP 23-4	Plausibilitätsprüfung Copernicus-Daten	Die neuen PS-InSAR Messdaten sollen auf ihre Plausibilität überprüft werden und potenzielle geologische Ursachen für die beobachteten Bodenbewegungen analysiert.
AP 23-5	Darstellung und Analyse der Copernicus-Daten	Visualisierung der Copernicus-Zeitreihen zur Erkennung von Periodizitäten und deren Korrelation mit Grundwasserstandsänderungen, einschließlich der Analyse von Saisonalität und möglichen Klimaeinflüssen wie Bodensetzungen infolge extremer Trockenperioden.
AP 23-6	Datensatzzusammenführung & Integration	Die unterschiedlichen Datensätze aus Copernicus- und DGM-Daten sollen zusammengeführt und durch weitere Datenquellen ergänzt werden, wobei zunächst Methoden zur zeitlichen Anpassung und Verschneidung im Projekt entwickelt und getestet werden müssen.
AP 23-7	Implementierung in Arbeitsprozesse	Am Ende von Projektjahr 2 sollen die bisherigen Projektergebnisse gemäß den Vorgaben des HLNUG aufbereitet und in die innerbehördlichen GIS-Anwendungen integriert werden.
Jahr 3 - 2024		
AP 24-1	Bewegungsatlas & Datenbank	Die Ergebnisse von 2023 sollen in einer Datenbank gespeichert werden, die Kernparameter und Klassifikationen der Bodenbewegungen enthält und als Grundlage für einen Bodenbewegungsatlas von Hessen dient.
AP 24-2	Öffentliche Bereitstellung (Geologie-Viewer)	Die Projektergebnisse sollen der Öffentlichkeit über den Geologie-Viewer des HLNUG zugänglich gemacht werden, indem die Daten gemäß der Infrastruktur des HLNUG aufbereitet und bereitgestellt werden.
AP 24-3	Bereitstellung für Geo-Daten-Portale Dritter	Damit die Daten in Geo-Daten-Portalen Dritter, wie beispielsweise von Kommunen, genutzt werden können, ist eine Aufbereitung gemäß den jeweiligen Datenstrukturen erforderlich.
AP 24-4	SBAS-Verfahren-Bewertung	Das SBAS-Verfahren soll anhand einer ausgewählten Testregion getestet werden, um seine Eignung zur Erweiterung des Bodenbewegungsdienstes in Hessen zu bewerten.
AP 24-5	Webseite-Erstellung	Es wird eine Webseite entwickelt, die die Projektergebnisse öffentlich präsentiert und die Arbeiten des Projekts transparent und für alle zugänglich macht.
AP 24-6	Bericht & Datenabgabe	Der Abschlussbericht soll erstellt und die erzielten Ergebnisse mit den Partnern geteilt sowie, wenn möglich, der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

2.2 Planung und Ablauf Projektjahr 2023

2.2.1 AP 23-1: Datenanforderung und Datenaufbereitung LiDAR-Daten und Copernicus-Daten

Beschreibung: Innerhalb des ersten Projektjahres (2022) musste festgestellt werden, dass die vom HLNUG bereitgestellten Differenzenpläne in ihrer Genauigkeit nicht ausreichend waren und zu viele Berechnungsfehler (systematische Datenfehler) beinhalteten. Daher muss ein neuer Differenzenplan berechnet werden. Es erfolgt eine Datenanforderung von DGM1/DOM1-LiDAR-Daten beim HLBG als ASCII-Dateien. Es ist damit zu rechnen, dass auch in 2023 ein neuer Copernicus-Sentinel1-Datensatz zur Verfügung steht. Dieser wird vom HLNUG bei der BGR angefordert und den Projektpartnern zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Diese neuen Daten sollen nach den Methoden aus Projektjahr 1 aufbereitet und dargestellt werden. Nach Anforderung der Daten, müssen die LiDAR-Daten im Hinblick auf die Berechnung eines Differenzenplanes der beiden Befliegungszeiträume aufbereitet werden. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Datenanforderung bei HLBG und BGR (Zeitaufwand: 1 Monat)
- Datenaufbereitung der LiDAR-Daten und der Copernicus-Daten, sowie Darstellung der Copernicus-Daten (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Digitale Gelände- und Oberflächenmodelle (DGM und DOM) wurden von der HVBG bereitgestellt. Das Datenformat der übergebenen Daten wurde konvertiert und die Höhenbezugssysteme der beiden Messepochen (DHHN92 und DHHN2016) wurden mithilfe eines Korrekturgitters angepasst. Systematische Abweichungen in den Differenzenkarten, beispielsweise durch Fehler bei der Streifenanpassung, wurden identifiziert und korrigiert. Vom Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) wurden neue Copernicus-PSI-Daten zur Verfügung gestellt, die Bodenbewegungen zwischen April 2015 und Dezember 2021 dokumentieren und einen längeren Analysezeitraum ermöglichen.

2.2.2 AP 23-2: Erstellung eines LiDAR-Differenzenplanes

Beschreibung: Berechnung eines Differenzenplanes der Höhenmodelle von Hessen (LiDAR-Daten) unter Anwendung des in Projektjahr 1 entwickelten Konzeptes. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Berechnung eines Differenzenplanes (Zeitaufwand: 3 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Differenzenkarten wurden mithilfe eines Matlab-Skriptes durch Subtraktion der DGMs zweier Epochen erstellt.

2.2.3 AP 23-3: Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der LiDAR-Differenzenpläne

Beschreibung: Die ermittelten Bodenbewegungsgebiete sollen auf ihre möglichen Ursachen hin klassifiziert werden. Dabei sollen mögliche Korrelationen u.a. mit Gips- (bzw. Anhydrit-) Vorkommen und Bergbaugebieten untersucht werden. Es sollen ebenfalls Bodensenkungsgebiete ermittelt werden, die sich infolge von Fluidentnahmen im Untergrund und/oder durch Schrumpfung entsprechend empfindlicher Böden durch Austrocknung, in den Datensätzen bemerkbar machen. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Ingenieurgeologie der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Klassifizierung von Bodenbewegungsgebieten (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Korrelationsbetrachtungen (Zeitaufwand: 1 Monat)
- Untersuchungen von Senkungsgebieten (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 4 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie TU Darmstadt

Zielerreichung: Der Ablauf zur Beschreibung von Bewegungsgebieten wurde durch Umstellung der Skripte auf alternative Python-Module verbessert, was eine Nutzung ohne ArcGIS-Lizenz, höhere Performance und vereinfachte Parallelisierung ermöglicht. Das Softwaremodul „u4py“ vereint die Prozessierung der Differenzenpläne und die PS-InSAR-Auswertung. Infrastruktur und Gebäudeumgebungen wurden ausgeschnitten, um Fehlklassifikationen zu reduzieren. Anschließend erfolgte die Berechnung und Gruppierung von Konturen größerer Hebungen und Senkungen. Die Bewegungsgebiete wurden automatisch hinsichtlich Eigenschaften wie Landnutzung, Geländeform und Volumenveränderungen klassifiziert. Die manuelle Klassifikation identifizierte Baustellen und landwirtschaftliche Aktivitäten als häufigste Ursachen. Eine eindeutige Verbindung zu geologischen Gefahren konnte nicht nachgewiesen werden, einzelne Anomalien blieben jedoch ungeklärt.

2.2.4 AP 23-4: Plausibilitätsprüfungen neue Copernicus-Daten

Beschreibung: In Arbeitspaket 4 sollen die Messdaten auf Plausibilität und mögliche geologische Ursachen für vorgefundene Bodenbewegungen geprüft werden. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Ingenieurgeologie der TU Darmstadt und dem HLNUG.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Plausibilitätsprüfungen (Zeitaufwand: 3 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie TU Darmstadt

Zielerreichung: Die neuen Copernicus-Daten wurden auf Plausibilität überprüft, wobei Unterschiede zwischen den Datensätzen und den erwarteten Ergebnissen festgestellt wurden. Dies liegt an unterschiedlichen Verarbeitungsansätzen bei der InSAR- und PSI-Prozessierung. Bei Vergleichen zwischen den BBD- und EGMS-Daten wurden teils signifikante Abweichungen in verschiedenen Zeiträumen festgestellt, insbesondere aufgrund unterschiedlicher Scatterer-Daten. Der Vergleich mit GNSS-Daten zeigt, dass die PSI-Daten im Mittel ähnliche Bewegungen wie die GNSS-Daten zeigen, obwohl saisonale Trends in den

GNSS-Daten stärker ausgeprägt sind. Zudem gibt es Unterschiede in der Modellierung von nicht-linearen Bewegungen, wobei die EGMS-Daten in einigen Fällen als plausibler eingeschätzt werden.

2.2.5 AP 23-5: Darstellung und Analyse der Copernicus-Daten im zeitlichen Verlauf

Beschreibung: Arbeitspaket 5 beinhaltet die Visualisierung der Zeitreihen der Copernicus-Daten zur Erkennung von Periodizitäten wie z.B. Jahresgängen. Die Datensätze sollen auf Korrelationen mit Änderungen des Grundwasserspiegels untersucht werden. Es soll darüber hinaus untersucht werden, ob in den Datensätzen eine Saisonalität oder Periodizität zu erkennen ist, als auch ein möglicher Einfluss des Klimawandels (z.B. vermehrt Setzungen in trockenen Sommermonaten). Es soll beispielsweise festgestellt werden, ob extreme Trockenperioden, mit besonders niedrigen Grundwasserständen, eine deutliche Setzung des Bodens nach sich ziehen (Schäden aus Kassel, Offenbach und Wiesbaden bereits bekannt aus den letzten Jahren). Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt. Es sind darüber hinaus Zusammenarbeiten mit RoSEN (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung) und PSDefoPat (Fraunhofer IOSB) bereits angestoßen worden.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Visualisierung der Zeitreihen der Copernicus-Daten (Zeitaufwand: 1 Monat)
- Korrelation mit Grundwasserspiegeländerungen (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Untersuchungen im Hinblick auf Saisonalität und Periodizität (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Die Visualisierung der Zeitreihen wurde mittels Zerlegung der Zeitreihe in einzelne Komponenten (linear, saisonal, transient) durchgeführt. Diese Ergebnisse können als Rasterdatensatz dargestellt werden und führten zur Entdeckung verschiedener Anomalien, beispielsweise in Frankfurt a.M. und im Ried. Darüber hinaus wurden die Punktmessungen der PSI-Daten in eine Rasterdarstellung mit verschiedenen Rasterweiten überführt. Diese lassen sich nun als zeitlich aufgelösten Datensatz in ArcGIS darstellen.

Die Korrelation mit Grundwasserspiegeländerungen ergab eine gute Korrelation für mehrere Messstellen im Oberrheingraben und nordhessischen Tertiär. Vor allem für Messstellen mit geringen Grundwasserflurabstand. Eine Abschlussarbeit wurde für diese Thematik angestossen, ist zum Abgabezeitpunkt dieses Berichts aber noch nicht abgeschlossen. Sie beschäftigt sich mit der Berechnung und dem Vergleich verschiedener hydrogeologischer Werte, welche sich aus den Daten ablesen lassen.

2.2.6 AP 23-6: Zusammenführung der Datensätze und Integration weiterer Daten

Beschreibung: Arbeitspaket 6 sieht die Zusammenführung der unterschiedlichen Datensätze (Verschnitt aus Copernicus-Daten und aus DGM-Daten), als auch die Integration weiterer Datenquellen vor. Wie dies genau durchgeführt werden kann, muss zuerst innerhalb des Projektes erforscht und getestet werden. Um die Datensätze miteinander vergleichen und eventuell verschneiden zu können, müssen die Zeitscheiben aus den DGM-Differenzplänen und den Copernicus-Daten angepasst werden. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Verschnitt der Datensätze (Zeitaufwand: 3 Monate)
- Integration weiterer Datenquellen (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Die Zeitscheiben der Differenzenpläne und der Copernicus-Daten wurden durch Extrapolation angeglichen. Die Fusion der Datensätze erfolgte durch Berechnung von Mittelwerten aus benachbarten Pixeln der Differenzenpläne, die mit der räumlichen Ausdehnung der PSI-Daten vergleichbar war. Weitere Datenquellen für InSAR-Anwendungen wurden geprüft, jedoch zeigten sich aufgrund der zeitlichen Verteilung und Bildanzahl Einschränkungen. Das SBAS-Verfahren wurde als ergänzende Methode zur Analyse großflächiger Bodenbewegungen betrachtet.

2.2.7 AP 23-7: Implementierung in innerbehördliche Arbeitsprozesse

Beschreibung: Die bisherigen Ergebnisse des Projektes sollen am Ende von Projektjahr 2 in die innerbehördlichen Arbeitsprozesse des HLNUG implementiert werden. Dafür sind die Daten entsprechend der Vorgaben des HLNUG aufzubereiten, um diese in interne GIS-Anwendungen einpflegen zu können. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Aufbereitung bisheriger Daten für HLNUG-interne GIS-Nutzung (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Implementierung innerhalb der Geodateninfrastruktur im HLNUG zur hausweiten Nutzung in GIS-Anwendungen (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 3 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Die Daten wurden in Abstimmung mit dem HLNUG in ein ArcGIS Projekt und eine ArcGIS Geodatenbank zusammengefasst. Ebenfalls wurden passende Metadaten hinzugefügt.

2.3 Planung und Ablauf Projektjahr 2024

2.3.1 AP 24-1: Erstellen eines Bewegungsatlas und einer Datenbank

Beschreibung: Die Ergebnisse aus dem Jahr 2023 sollen in einer Datenbank festgehalten werden und zur Erstellung eines Bodenbewegungsatlas von Hessen führen. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Ingenieurgeologie der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Erstellen einer Datenbank mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2023 (Zeitaufwand: 4 Monate)
- Erstellung eines Bodenbewegungsatlas von Hessen (Zeitaufwand: 4 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 4 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie TU Darmstadt

Zielerreichung: Die anomalen Bewegungsregionen wurden anhand ihrer Merkmale in 18 Kategorien wie Altlasten, Baustellen, Erosion oder Rutschungen eingeteilt. Bis zu drei Kategorien pro Anomalie sind möglich, Unklarheiten werden gekennzeichnet. Zwei reduzierte Datensätze konzentrieren sich auf große Anomalien ($\geq 20.000 m^3$) und auf Gebiete mit bekannten Geogefahren im Umkreis von 1 km. Hauptursachen der Anomalien sind anthropogen bedingt, insbesondere Baustellen, Artefakte und landwirtschaftliche Aktivitäten. Baustellen fehlen häufig in OSM-Daten und sind entlang von Autobahnen auffällig. Artefakte stammen meist aus Datenfehlern wie Koregistrierungsproblemen. Deponien und Steinbrüche sind oft nur unzureichend kartiert. Die Ergebnisse wurden in Geopackages gespeichert und mit automatischen Berichten mit Steckbriefen der Anomalien ergänzt. Die Daten fließen in AP 23-7 und AP 24-2 ein.

2.3.2 AP 24-2: Öffentliche Bereitstellung über Geologie-Viewer

Beschreibung: Die Ergebnisse des Projektes sollen der Öffentlichkeit über den Geologie-Viewer des HLNUG zur Verfügung gestellt werden. Dafür sind die Daten entsprechend der Dateninfrastruktur des HLNUG aufzubereiten und bereitzustellen. Dies erfolgt parallel in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Datenaufbereitung zur Nutzung im Geologie-Viewer des HLNUG (Zeitaufwand: 5 Monate)
- Implementierung in Geologie-Viewer des HLNUG (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 5 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Die Bereitstellung über den Geologie-Viewer ist aufgrund der großen Anzahl an noch nicht klassifizierten Anomalien noch nicht erfolgt. Dies soll im Jahr 2025 vorangetrieben werden.

2.3.3 AP 24-3: Bereitstellung und Implementierung der Daten für Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter

Beschreibung: Um die Daten in Geo-Daten-Portalen Dritter (z.B. Kommunen) zur weiteren Verwendung zur Verfügung zu stellen, müssen diese entsprechend der dortigen Datenstrukturen aufbereitet werden. Dies erfolgt parallel in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG und in enger Abstimmung mit dem Cluster II des Umwelt 4.0-Projektes.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Datenaufbereitung zur Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter (Zeitaufwand: 2 Monate)
- Implementierung in Geo-Daten-Portalen Dritter (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 4 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Die Daten wurden für externe Nutzungen vorbereitet. Eine explizite Implementierung der Daten in Geo-Daten-Portalen Dritter wurde bisher noch nicht angestoßen, da noch viele Anomalien klassifiziert werden müssen. Erste Gespräche mit der Cluster II-Projektleitung der Umwelt 4.0-Maßnahme haben stattgefunden und sollen in 2025 intensiviert werden.

2.3.4 AP 24-4: Bewertung SBAS-Verfahren zur Erweiterung des Bodenbewegungsdienstes

Beschreibung: Ziel des Arbeitspaketes 4 ist es, eine Bewertung des SBAS-Verfahrens zur Erweiterung des Datensatzes des Bodenbewegungsdienstes durchzuführen. Dies soll anhand einer geeigneten Testregion erprobt werden. Nach Auswahl dieser Region, erfolgt eine Berechnung der Bodenbewegungen anhand des SBAS-Verfahrens. Als Ergebnis wird eine Auswertung der Einsatzmöglichkeit des SBAS-Verfahrens auf den hessischen Datensatz angestrebt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Auswahl einer geeigneten Testregion (Zeitaufwand: 1 Monat)
- Berechnung der Bodenbewegung anhand des SBAS-Verfahrens für die ausgewählte Testregion (Zeitaufwand: 3 Monate)
- Auswertung der Einsatzmöglichkeit des SBAS-Verfahrens (Zeitaufwand: 2 Monate)

Zeitaufwand insgesamt: 5 Monate

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Es wurden geeignete Testregionen ausgewählt, die sowohl einen ländlichen als auch einen städtischen Bereich abdecken. Anschließend wurde für diese Testregionen das SBAS-Verfahren berechnet. Dabei wurden zwei verschiedene Softwares getestet und deren Ergebnisse analysiert und mit den Bodenbewegungen des BBD verglichen.

2.3.5 AP 24-5: Erstellung einer Webseite

Beschreibung: In Arbeitspaket 5 soll eine Webseite erstellt werden, mit der die Ergebnisse des Projektes öffentlichkeitswirksam und die Arbeiten innerhalb des Projektes transparent und für jeden zugänglich dargestellt werden. Diese Arbeiten werden vom HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Erstellung einer Webseite als Unterseite des Internetauftritts des HLNUG (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 1 Monat

Partner: HLNUG

Zielerreichung: Es wurde eine Webseite zu Bodenbewegungen und zum Umwelt 4.0 Cluster I - Projekt erfolgreich erstellt. Nach Freigabe wurden die Inhalte im Dezember 2024 veröffentlicht.

2.3.6 AP 24-6: Berichterstellung und Datenabgabe

Beschreibung: Im abschließenden Arbeitspaket 6 soll der Endbericht ausgearbeitet und die erstellten Ergebnisse zwischen den Partnern ausgetauscht und soweit möglich öffentlich zur Verfügung gestellt werden. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit den Fachgebieten Ingenieurgeologie und Fernerkundung und Bildanalyse der TU Darmstadt und dem HLNUG durchgeführt.

Einzelschritte und Zeitplanung:

- Berichterstellung und Zurverfügungstellung entsprechender Daten zur Veröffentlichung (Zeitaufwand: 1 Monat)

Zeitaufwand insgesamt: 1 Monat

Partner: HLNUG, Fachgebiet Ingenieurgeologie und Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse TU Darmstadt

Zielerreichung: Im Dezember 2024 wurde dieser Bericht erstellt und die prozessierten Daten zwischen den Projektpartnern ausgetauscht.

3 Eingehende Darstellung

3.1 Ergebnisse Projektjahr 2023

3.1.1 AP 23-1: Datenanforderung und Datenaufbereitung LiDAR-Daten und Copernicus-Daten

LiDAR-Daten

Beschreibung Von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) wurden digitale Oberflächenmodelle (DOM) und digitale Geländemodelle (DGM) für ganz Hessen bereitgestellt. Diese entstanden aus LiDAR-Daten, indem ein Laserscanner von einem Flugzeug aus Daten aufnahm. Aus den von der Geländeoberfläche zurückgesendeten Pulsen wurden Geländehöhen abgeleitet.

Die vom HVBG gewählten Flugstreifen hingen von der Geländetopografie ab. In den meisten Fällen erfolgte die Befliegung entlang von Flüssen. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass Flugfenster besser angepasst werden können, da z.B. Hoch- und Bodennebel vermieden werden konnten. Das führt aber auch dazu, dass die Flugstreifen nicht einheitlich sind. TB14 wurde beispielsweise in Nord-Süd Richtung überflogen, während die Befliegung von TB16 diagonal erfolgte. Es liegen auch Unterschiede bei den Trajektorien zwischen der ersten und zweiten Messkampagne vor. Grund dafür sind weniger Erfahrung und Ungenauigkeiten bei der ersten Befliegung. Damals wurden beispielsweise noch keine Querflüge durchgeführt. Eine Aufzeichnung aller Trajektorien liegt dem HVBG vor und kann bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden.

Das Ergebnis einer Überfliegung mit Laserscanner ist zunächst ein DOM, das sämtliche Objekte wie Vegetation und Bebauung oberhalb der Erdoberfläche abbildet. Um aus den Daten Bodenbewegungen ableiten zu können ist es daher notwendig, jene Objekte rechnerisch aus den Daten zu entfernen. Das Ergebnis ist ein DGM, das lediglich die Erdoberfläche abbildet.

Es liegen DGMs und DOMs zweier Epochen vor. Die ersten Überfliegungen fanden von 2007 bis 2014 statt. In diesem Zeitraum wurde ganz Hessen mit Laserscannern befliegen. Die zweiten Überfliegungen fand von 2015 bis 2021 statt. Aktuell wird das DGM der dritten Epoche erstellt.

Die Daten (insgesamt ca. 784 GB) wurden vom HVBG in folgender Form bereitgestellt: Hessen ist in 18 Teilbereiche (TB) aufgeteilt. Jeder TB besteht aus DGM-Kacheln in der Größe 1km x 1km (1001x1001 Pixel-Matrix mit Höhenwerten, Datengröße ca. 3.500 KB). 63 DGMs weichen von dieser Größe ab und haben z.B. die Größen 1000x1001 Pixel oder 1000x1000 Pixel oder 1001x1000 Pixel. In Summe liegen für die erste Epoche 22.252 DGMs vor und für die zweite Epoche 22.200 DGMs. Die Differenz erklärt sich durch die unterschiedliche Aufnahme an der Landesgrenze, die in der ersten Epoche großzügiger aufgenommen wurde. Außerdem betragen die Kachelgrößen bei der ersten Überfliegung noch 2km x 2km und nicht alle Nachbarländer lieferten vergleichbar gute Daten zur Harmonisierung an den Landesgrenzen. Eine dritte Befliegung ist bereits in Planung. Hierbei sollen die Landesgrenzen innerhalb von 1km² großen Kacheln erfasst werden, die die Landesgrenze in einem Puffer von ca. 150 m abdecken.

Die DGM-Kacheln sind nach dem folgenden Schema benannt: Beispiel: dgm1_32_456_5590_1_he_2010.xyz
32 steht für die Zone des UTM-Koordinatensystems. Verwendet wird das Referenzsystem ETRS89. Der erste Wert nach der Zone, im Beispiel die 456 steht für die ersten drei Ziffern des Ost-Wertes. Der zweite Wert nach der Zone, im Beispiel die 5590 steht für die ersten vier Ziffern des Nord-Wertes. Namensgebend ist jeweils die linke untere Ecke der Kachel.

Die Daten wurden als xyz-Dateien übergeben. Dies war bis Ende 2022 Standard bei den Vermessungsämtern. Im Jahr 2023 soll eine Umstellung auf eine Raster-Organisation der Höhenwerte erfolgen. Als Format wurde HöhenTIFF beschlossen. Da lediglich die Verpflichtung zur Bereitstellung einer aktuellen und flächendeckenden Produktausführung besteht, hat das HLBG die zweite ALS-Landesbefliegung für das DGM1 und DOM1 als HöhenTIFF-Aufbereitung neu prozessiert. Diese Daten stehen seit Anfang 2024

im OpenData-Download-Center der HVBG zur Verfügung.

Messgenauigkeit Die Überprüfung der Genauigkeit der LiDAR-Daten erfolgt beim HVBG über punktuelle Kontrollflächen. Zu diesem Zweck wurde über ganz Hessen ein Netz von Ground Control Points (GCP) eingerichtet. Insgesamt besteht das Netz aus ca. 41.000 Punkten, die alle 2-3 km vorliegen. In den meisten Fällen befinden die GCP sich über Sportplätzen oder großen Straßenkreuzungen. Eingemessen wurden sie mittels RTK (GNSS). Dadurch kann eine Höhengenaugkeit von 3-5 cm erreicht werden. Aus den GCP werden Kontrollflächen berechnet und mit den LiDAR-Datensätzen verglichen. Zulässig sind Abweichungen von ± 15 cm zwischen Datensatz und Kontrollfläche. Dieser Wert stammt noch aus Anforderungen des Hochwasserschutzes Anfang der 2000er Jahre. Liegt die Abweichung innerhalb dieser Vorgabe erfolgt keine Offset-Bereinigung. Aus diesem Fehlerbereich ergibt sich ein maximaler Fehler von 30 cm in den Differenzenkarten. Erfahrungsgemäß verfügen die Daten der ersten Befliegung über größere Abweichungen als die der zweiten Befliegung. Während beim älteren Datensatz oft 10-12 cm Abstand zwischen Datensatz und Kontrollfläche zu finden sind, sind es bei dem neueren Datensatz nur 2-3 cm. Um eine gleichbleibend hohe Genauigkeit der Kontrollfläche gewährleisten zu können, werden die GCP stetig aktualisiert. Schon durch kleine Veränderungen wie z.B. einen neuen Rasen auf den Sportplätzen oder neuen Asphalt auf Kreuzungen kann es zu Abweichungen kommen. Daher ist es wichtig, immer die Kontrollflächen aus dem passenden Zeitraum zu verwenden.

Herausforderung bei der Erstellung von Differenzenkarten Es können verschiedene Arten von Fehlern auftreten:

- Sprünge und Durchbiegungen durch fehlende Erfahrung beim Streifenausgleich/Streifenanpassung
- Systematische Messungenauigkeiten (z.B. durch alte Laserscanningsysteme)
- Schlechte Klassifikationsalgorithmen (heute wesentlich besser, teilweise KI). Die Klassifikation unterscheidet die Objektpunkte von den Bodenpunkten. Bei der geringeren Punktdichte in den alten Aufnahmen kann das zu Ungenauigkeiten führen
 - Erste Epoche: ca. 4 Punkte pro m^2
 - Zweite Epoche: 10-12 Punkte pro m^2 (min. 8)
 - Dritte Epoche: 15-16 Punkte pro m^2
- Systematische Abweichungen durch falsche Georeferenzierung (z.B. TB1)
 - Höhen- und Lageoffset
 - Bei TB1 hat die bauauftragte Firma vermutlich ein falsches Bezugssystem verwendet, einen halben Meter Verschiebung, was aber erst nach der zweiten Befliegung aufgefallen ist

Konvertierung des Datenformats Um die Daten in ein Geoinformationssystem laden zu können, war eine Konvertierung des xyz-Datenformats in das TIFF-Format notwendig. Zu diesem Zweck wurde ein Python Skript (Xyz2Tiff) verwendet. Dieses wurde von Philipp Kraft von der Universität Gießen zur Verfügung gestellt.

Anpassung der Höhenbezugssysteme Die Differenzenkarten werden durch Subtraktion der neueren Epoche vom DGM der älteren Epoche erstellt. Bei der Erstellung der Differenzenkarte muss mit verschiedenen Herausforderungen umgegangen werden. Die DGMs der älteren Epoche (2007-2014) beziehen sich auf das Höhenbezugssystem DHHN92, die DGMs der neuen Epoche (2015-2021) auf das DHHN2016. Mithilfe der HOETRA2016 App der Bezirksregierung Köln (<https://www.hoetra2016.nrw.de/>) können die Höhen transformiert werden.

Im ersten Schritt wird ein Korrekturgitter erstellt (siehe Matlab Skript HOETRAMatrix.mlx). Es wird eine Liste erstellt mit den Koordinatenmittelpunkten aller DGMs in Hessen. Diese Liste wird in die HOETRA App eingelesen und der Transformationswert ausgegeben. Jede 1km x 1km große DGM Kachel wird mit

einem festen Transformationswert korrigiert. Die Höhendifferenz zwischen den Bezugssystemen innerhalb einer Kachel ist nach Angaben des HVBG kleiner als der Fehler des Laserscannings, weshalb ein Wert für die gesamte Kachel genommen werden kann. Es wurde sich für den mittleren Punkt entschieden (siehe Abb. 1).

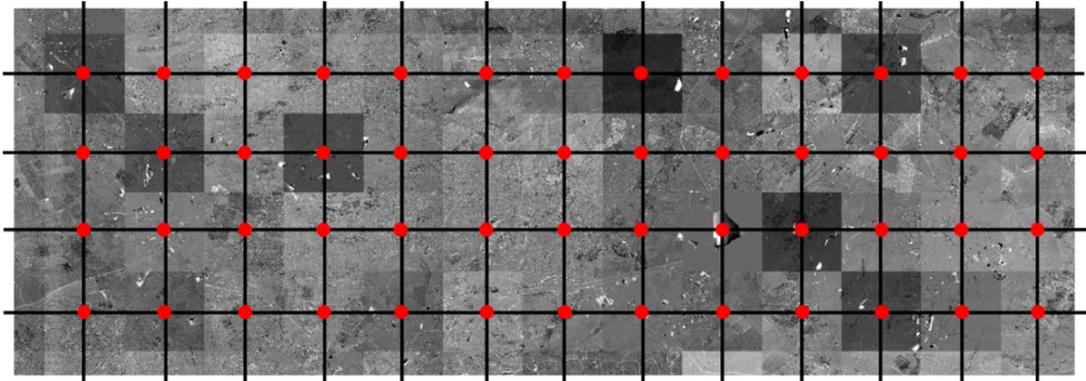


Abbildung 1: DGMs mit Korrekturgitter (schwarz). Die Korrekturwerte (rot) liegen jeweils in der Mitte der DGMs.

In Hessen liegen die Änderungen zwischen beiden Höhenbezugssystemen zwischen -6,6 und +3,5 cm (siehe Abb. 2).

Mittels des Korrekturgitters werden alle DGMs der älteren Epoche mithilfe eines MATLAB-Skriptes korrigiert und auf das Höhenbezugssystem der zweiten Epoche gebracht (siehe Höhenkorrektur_HOETRA.mlx). An den Dateinamen wurde die Endung „_Kor“ angehängt. Beim Speichern des Tiffs ist zu beachten, dass die Spalten von Norden aus starten und das richtige Koordinatensystem angegeben wird (ETRS89 / UTM zone 32N = coordRefSysCode = 25832). Bilder werden klassischerweise von der linken oberen Ecke aus ein- und ausgelesen. Probleme traten hier bei 63 DGMs mit abweichender Größe auf. Damit sie beim Speichern nicht verschoben werden, muss darauf geachtet werden, dass xlimits und ylimits des Geotiffs bezogen auf die Matrizengröße der Tiffs angepasst wird.

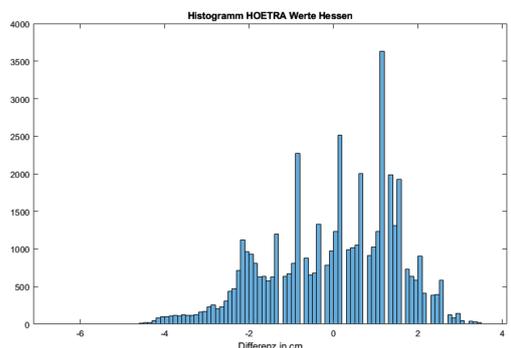


Abbildung 2: Histogramm HOETRA Werte Hessen

Korrektur systematischer Abweichungen

- Veränderte Punktdichte von der alten zur neuen Epoche
- Verarbeitungsalgorithmen und Klassifizierungssoftwares (Ergebnisse können sich durch unterschiedliche Strategien und individuell gesetzte Parametrisierung unterscheiden)
- Technische Möglichkeiten haben sich verändert
- Höhenunterschiede an den Flugstreifen (kommen durch unterschiedliche Strategien der Ausgleichung und Streifenanpassung zustande)

Zur Korrektur der systematischen Abweichungen wurden manuell Polygone erstellt, die diese Bereiche eingrenzen. Dazu wird im ersten Schritt eine Selektion der Differenzkarten durchgeführt (DetektionAuffaelligerDiffs.mlx). Alle Differenzkarten eines Teilbereichs werden auf ihren Mittelwert analysiert. Im Idealfall (ohne Bodenbewegung oder systematischen Abweichungen) sollte der Mittelwert bei null liegen:

Keine Veränderung zwischen den beiden Datenerhebungen. Da Orte mit extremer Bodenveränderung den Mittelwert stark verziehen können, werden alle Höhendifferenzen größer und kleiner als 1m aus der Betrachtung ausgeschlossen. Als auffällig werden DGMs mit einem Mittelwert kleiner -8 cm und größer als 8 cm bestimmt (empirisch festgelegt). Das Matlab-Skript erfasst nur die einzelnen DGMs und nicht die Umgebung. Die scharfe Abgrenzung zwischen den DGMs, die auf systematische Abweichungen schließen lassen oder die längliche Form, die an Flugstreifen erinnert, kann somit nicht erfasst werden. Die Bereiche müssen deshalb händisch überprüft werden. Die auffälligen Differenzenkarten geben jedoch eine geeignete Grundlage zum Erstellen der Polygone. Die folgende Abb. 3 zeigt beispielhaft Auffälligkeiten, die in den Differenzenkarten gefunden wurden.

A)



B)



Abbildung 3: A) Differenzenkarte zeigt eine starke Differenz an (dunkleres rosa). Der Bereich orientiert sich deutlich an der Kachelform der DGMs. Dies lässt auf eine systematische Abweichung schließen. B) Differenzenkarte mit starken Differenzen (rosa, blau). Die Form ähnelt den Flugstreifen der Vermessungsflüge.

In einigen Fällen ist die Abgrenzung der Bereiche herausfordernd. Eine klare Aussage über den Grund der Höhendifferenzen in den Differenzenkarten können hier nicht getroffen werden. Es wurden 43 auffällige Bereiche (AoI) identifiziert. Sie wurden als Tabelle mit den Koordinaten der linken oberen und der rechten unteren Ecke (sysKor_AoI.csv) gespeichert. Das Format der Koordinaten entspricht dem Format der Koordinaten der DGMs aus den Dateinamen.

Im Matlab-Skript Differenzenkarten_sysFehler_AoI.mlx wird für jeden Teilbereich zuerst die Ausdehnung der auffälligen Bereiche eingelesen und eine Liste der Differenzenkarten erstellt, die in diesen Bereichen liegen. Im Anschluss werden nacheinander die Differenzenkarten des aktuellen Teilbereichs aufgerufen. Sind sie in der Liste enthalten, müssen sie korrigiert werden. Es wird ein Mittelwert der Höhenwerte errechnet, der nur die Werte enthält, die zwischen dem festgelegten Extremwert von 1,5 m liegen. Hierbei liegt die Annahme zugrunde, dass höher als 1,5 m und unter -1,5 m keine natürliche Höhenänderung stattfand, sondern es sich hier um künstliche Gruben und Neubauten handelt. Der Mittelwert soll somit die systematischen Abweichungen widerspiegeln. Um das korrigierte Diff zu erstellen, wird der Mittelwert vom unkorrigierten Diff abgezogen. Das korrigierte Diff wird in einem neuen Ordner abgespeichert. An den Dateinamen wird die Endung „_sysKor“ angehängt. Liegt das betrachtete Diff nicht in einem auffälligen Bereich, wird es ohne Änderung in denselben Ordner abgespeichert und behält seinen ursprünglichen Namen.

Ausnahme Extremwert 1m: Bei der Krombachtalsperre liegt die Wasserpegeldifferenz bei ca. 1,20 m.

Für die beiden Kacheln der Differenzenkarte, die das betrifft, wurde als Grenzwert 1m gewählt, um die systematischen Abweichungen zu korrigieren (siehe Abb. 4).

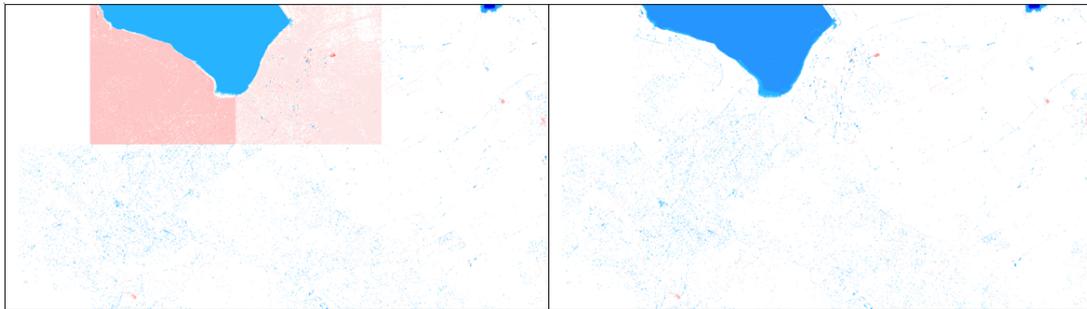


Abbildung 4: Korrektur der Differenzenkarte Krombachtalsperre. Links: vor der Korrektur, Rechts: nach der Korrektur.

In QGIS wurden die Differenzenkarten aller Teilbereiche zusammengefügt und ein einheitliches Farbschema gewählt. Die folgende Abb. 5 zeigt den Vergleich der Differenzenkarten vor und nach der Korrektur.

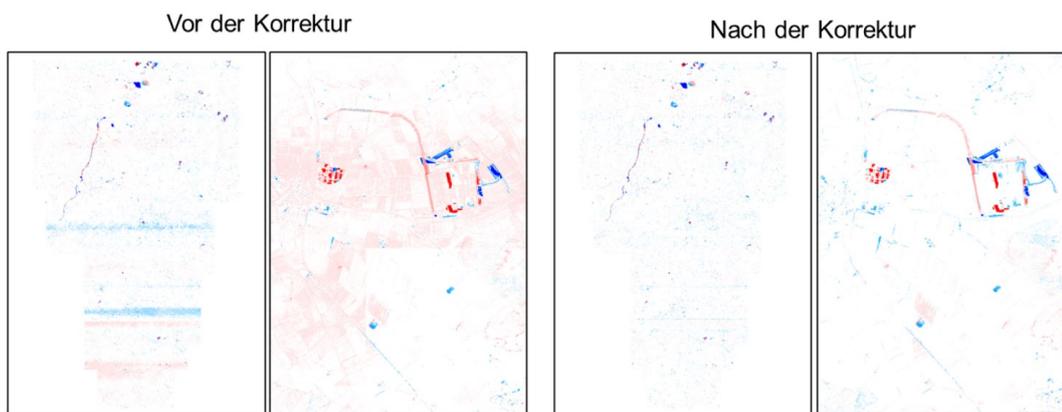


Abbildung 5: Vergleich vor und nach der Korrektur der Differenzenkarte von Teilbereich 5. Links: gesamter Teilbereich, der mehrere systematische Abweichungen enthält, rechts: nur ein Ausschnitt davon.

Copernicus-Daten Die Copernicus-Daten werden vom Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) bereitgestellt. Dieser wird von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) betrieben. Die Datengrundlage bieten SAR-Daten der Copernicus Sentinel-1-Mission. Diese wurde ausgewählt, da sie für einen langen Zeitraum ausgelegt ist und gerade für die Generierung von Daten für das ganze Bundesgebiet besonders vorteilhaft ist, da Europa mit hoher zeitlicher Auflösung vollständig abgedeckt wird. Die Sentinel-1 SAR-Satelliten tasten die Erdoberfläche mit einer Wiederholungsrate von sechs Tagen im C-Band mit einer Wellenlänge von 5,6 cm ab. Die räumliche Auflösung beträgt dabei ca. 5x20 m. Die Verarbeitung der Rohdaten zu bundesweiten Bodenbewegungsdaten erfolgt durch eine Persistent Scatterer Interferometrie (PSI)-Prozessierung. Die einzelnen Persistent Scatterer (PS) liegen dabei in Form von Punktdaten vor. Diese werden in vier verschiedene Datenlayer unterteilt: ascending und descending Line of Sight (LOS), sowie Deformationen der Erdoberfläche in vertikale und in Ost-West-Richtung. Mehrere Attribute sind zu den einzelnen Punkten einsehbar: neben x-, y- und z-Koordinate wird die mittlere Geschwindigkeit in mm/Jahr, die Varianz sowie Versatz und Geschwindigkeit der Bewegung in Zeitreihen

der Verschiebung angegeben. Messungen liegen alle sechs Tage vor (Kalia u. a. 2021). Der Anfangspunkt der Aufzeichnung liegt für alle PS im Jahr 2015. Mit der neuen Datenlieferung im zweiten Projektjahr reichen die Bodenbewegungszeitreihen bis zum Dezember 2021. Die Copernicus-PSI-Daten für Hessen wurden als Geopackage übergeben und können somit problemlos in gängige Geoinformationssysteme geladen werden.

3.1.2 AP 23-2: Erstellung eines LiDAR-Differenzenplanes

Berechnung der Differenzkarten Die Differenzkarten wurden mithilfe eines Matlabs Skriptes durch Subtraktion der DGMs der älteren Epoche von der neueren Epoche erstellt (siehe Differenzkarten.mlx). Herausforderungen hierbei: Die Differenzkarten konnten nicht pro Teilbereich (TB) gebildet werden, da sich die TB je Epoche geändert haben. Deshalb wurden die höhenkorrigierten Tiffs der ersten Epoche in einem Ordner gespeichert und jeweils für jeden TB der neuen Epoche dort nach den zugehörigen DGMs gesucht. Bei den oben beschriebenen 63 DGMs konnte die Differenzkarte nicht automatisch erzeugt werden, da die Matrizen Größen der beiden DGMs nicht übereinstimmten (z.B. $1000 \times 1001 - 1001 \times 1001$). Diese wurden händisch nachbereitet. Dabei verkleinert sich die Differenzkarte auf die Matrizen Größe der kleineren Matrix. Es entsteht dabei ein 1m x 1km langer leerer Streifen. Kam es zwischen den Epochen zu keiner Höhenänderung, so ist die Differenz null. Die Differenzen, die die Differenzkarten abbilden, haben verschiedene Ursprünge:

- Baugruben, Neubauten
- Pegeländerungen in Gewässern
- Landwirtschaft (z.B. durch Umpflügen), Vegetation
- Dichte von Wäldern, Wurzelteller etc.
- Bodenbewegungen (die gesuchten Hebungen und Setzungen)
- Fehler in den Daten

Eignung der Differenzkarten zur Detektion von Bodenbewegungen Differenzkarten sind generell zur Detektion von Bodenbewegungen geeignet, allerdings muss dabei eine Einschränkung beachtet werden. Um eine Bewegung detektieren zu können, sollte sie in etwa im Bereich von mehreren Zehner-Zentimetern oder darüber liegen. Ist dieses Kriterium aber erfüllt können kleinere, markantere Bewegungen wie Rutschungen oder Abbruchkanten, wie z.B. im Hinterland Rheingau, im Datensatz erkannt werden. Auch Auswaschungen kann man in den Schummerungen sehen. Das kann wichtig im Hinblick auf Prävention von Hangrutschungen sein, da Auswaschungen solche auslösen können.

Differenzkarten zwischen Epoche 3 und 2 Für zwei Teilbereiche liegen bereits DGMs der dritten Messkampagne vor und wurden von der HVBG zur Verfügung gestellt. Wie angekündigt wurden diese nicht mehr als xyz-Dateien, sondern als GeoTIFFs bereitgestellt. Damit geht die Problematik einher, dass die DGMs der dritten Epoche nicht mit den vom Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse berechneten TIFF-Dateien kompatibel sind. Durch das zur Verfügung gestellte Python Skript wurden TIFF-Dateien mit einer Größe von 1001×1001 Pixeln aus den xyz-Dateien berechnet. Die DGMs der dritten Messepoche wurden aber direkt aus der originalen Laserscan-Punktwolke prozessiert und haben eine Größe von 1000×1000 Pixeln. Dies führt zu unnatürlichen Trennlinien in den Daten, wie man in der folgenden Abb. 6 am Beispiel des Solarparks Dreieich sehen kann.

Eine Betrachtung der Ausdehnungen der zugrundeliegenden DGMs zeigt, dass diese um 0,5 Pixel versetzt zueinander liegen (siehe Abb. 7).

Die HVBG weist darauf hin, dass die Ableitung eines Raster-Datensatzes aus einem Sekundärprodukt, wie einem Gitter-DGM, stets mit Qualitätseinbußen verbunden ist. Zwar sind diese Einbußen in gleichförmigem Gelände ohne abrupte Höhenänderungen gering und erfüllen die AdV-Genauigkeitsanforderungen an ein DGM1, doch stellt ein gleichförmiger Geländeverlauf erfahrungsgemäß nicht die Regel dar. Daher

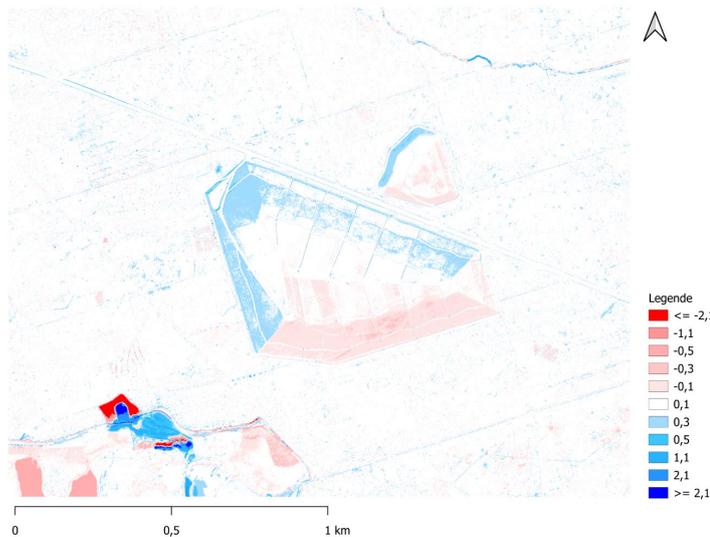


Abbildung 6: Differenzkarte zwischen Epoche 3 und 2 am Beispiel Solarpark Dreieich. Die unterschiedliche Lage der DGM-Pixel der beiden Epochen zueinander erzeugt eine unnatürliche Trennlinie, so dass die Differenzkarte für eine Hälfte des Solarparks eine Hebung (blau) und für die andere Hälfte eine Setzung (rot) anzeigt.

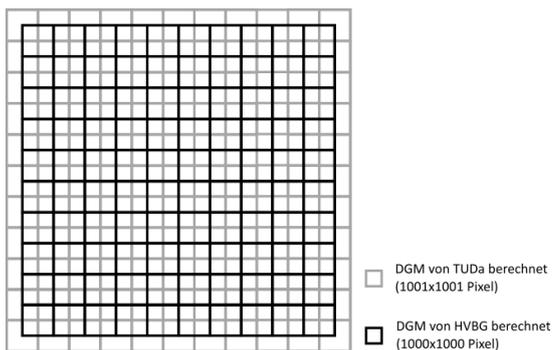


Abbildung 7: Schematische Darstellung der relativen Lage des vom Fachgebiet Fernerkundung und Bildanalyse berechneten DGMs (grau) im Vergleich zum von der HVBG berechneten DGM (schwarz).

empfiehlt die HVBG, dass Raster-Produkte wie DGM1 grundsätzlich als Neableitungen auf der Grundlage der Primärdaten erfolgen sollten.

Vergleiche zeigen zudem signifikante Diskrepanzen zwischen DGMs, die direkt aus Primärdaten berechnet wurden, und solchen, die durch Interpolation oder Ableitung aus Sekundärprodukten entstanden sind. Weiterhin bringt die Umstellung von Gitter- auf Raster-Daten einen Bezugsrahmenwechsel mit sich, der nicht ohne Genauigkeitsverluste durch einfaches Verschieben der Daten erfolgen kann. Um eine zuverlässige Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, müssten alle Datensätze auf eine einheitliche Modellierung bezogen und vollständig neu berechnet werden.

Diesem Ansatz folgend hat die HVBG im Rahmen der zweiten LiDAR-Landesbefliegung die gesamte Landesfläche auf das neue Datenmodell hin neu berechnet. Für den ersten LiDAR-Datensatz wurde hingegen keine Neuberechnung durchgeführt. Sobald die DGMs der dritten Epoche final verfügbar sind, können für die Berechnung der Differenzkarten die neu prozessierten DGMs der zweiten Epoche bei der HVBG angefragt werden. Dann basieren die DGMs der zweiten und Dritten Epoche wieder auf einer einheitlichen Prozessierung und sind miteinander kompatibel.

Ausblick Die Messungenauigkeiten der ersten Epoche führen zu einer eingeschränkten Nutzbarkeit der aktuellen Differenzkarten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass viel Potential in den Differenzkarten

liegt. Die zukünftigen Messkampagnen werden aufgrund von technischen Neuerungen und gewonnener Erfahrung bei den Befliegungsfirmen eine erheblich höhere Genauigkeit aufweisen. Trotzdem können großflächige Bodenbewegungen, wie sie z.B. durch Austrocknung entstehen, erst nach Jahrzehnten die Mindestbewegung von mehreren Zehner-Zentimetern erreichen, um in den Differenzenkarten sichtbar zu sein. Auf lange Sicht ist es aber möglich, Setzungen durch Austrocknung in den Differenzenkarten zu detektieren, sobald für eine ausreichende Zeitspanne Daten vorhanden sind. In den letzten Jahrzehnten wurde beispielsweise eine Senkung von ca. 30 cm durch Austrocknung in der Nähe von Mainz gemessen. Die Detektion von Austrocknungen kann wichtig sein, da diese zu Linseneffekten führen, an deren Grenzbereichen sich Setzungsrisse bilden können.

3.1.3 AP 23-3: Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der LiDAR-Differenzenpläne

Der in der ersten Projektphase entwickelte Ablauf zur Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der LiDAR-Differenzenplänen, wurde für die aktuelle Phase nochmals verbessert. Zum einen wurden die in ArcGIS, bzw. arcpy, implementierten Jupyter-Notebooks vollständig in Skripte überführt. Darüberhinaus konnte durch Verwendung alternativer Module (geopandas, GDAL, fiona, ...) auf arcpy verzichtet werden. Somit ist es auch möglich die Software auf Linux ohne ArcGIS Lizenz zu verwenden. Damit einher geht ein starker Performancezugewinn und einfachere Parallelisierung des Codes. Ebenfalls wurden verschiedene Änderungen beim Datenmanagement und der Datenverarbeitung vorgenommen. Das Softwaremodul `u4py` vereinigt sowohl die Prozessierung der Differenzenpläne, als auch die Auswertung der PS-InSAR Daten (Kap. 3.1.5).

Datengrundlage Für dieses Arbeitspaket werden die korrigierten Differenzenpläne (Kap. 3.1.2) mit folgenden Daten verschnitten und ausgewertet:

- Shapes von Gebäuden, Infrastruktur, Gewässer und Landnutzung von `openstreetmap`, Stand 17.08.2023
- Geologische Karte 1:25000, HLNUG
- Bodenkundliche Karte 1:50000, HLNUG
- Hydrogeologische Übersichtskarte 1:200000, HLNUG
- Digitales Geländemodell DGM 1 der Jahre 2014, 2019 und 2021, HVBG
- Geogefahren (Erdbeben, Gravitative Massenbewegungen, Setzungsempfindliche Schichten, Karsterscheinungen), HLNUG
- PS-InSAR Daten, BBD/BGR

Prozessierungsschritte Da viele anthropogen verursachte Bewegungen und Artefakte unmittelbar mit Infrastruktur und Gebäuden korrelieren, wurden diese Areale inklusive ihrer unmittelbaren Umgebung aus dem Differenzenplan ausgeschnitten (Abb. 8a-c). Tab. 2 zeigt eine Aufstellung der entfernten Flächen und die jeweils verwendeten Abstände, bzw. Buffergrößen. Dieser Schritt verringert die Anzahl der False Positives erheblich.

Tabelle 2: Features die aus den Differenzenplänen entfernt wurden und deren Buffergrößen.

Features	Buffergröße
Gebäude, Wasserwege und -flächen, Industriegebiete, Steinbrüche, Baustellen, Parkplätze	10 m
Hauptstraßen und Gleisanlagen	15 m
Nebenstraßen	5 m
Windkraftanlagen	150 m

In den so zugeschnittenen einzelnen Kacheln der Differenzenpläne werden nun die Konturen der Hebungen ≥ 0.5 m und Senkungen ≤ -0.5 m berechnet (Abb. 8d). Die so erhaltenen Polygone werden in einer Datenbank zusammengefasst, wobei überlappende Konturen vereint und Polygone mit einer Fläche ≤ 250 m² entfernt werden. Letzteres entspricht ungefähr einer typischen Baumkronenfläche mit einem Durchmesser von ca. 17.8 m. Vorwiegend in bewaldeten Gebieten sind Bewegungen in dieser Größe zu finden, welche vermutlich von umgestürzten Bäumen stammen. Auch dieser Schritt entfernt viel Rauschen aus dem Konturen Datensatz.

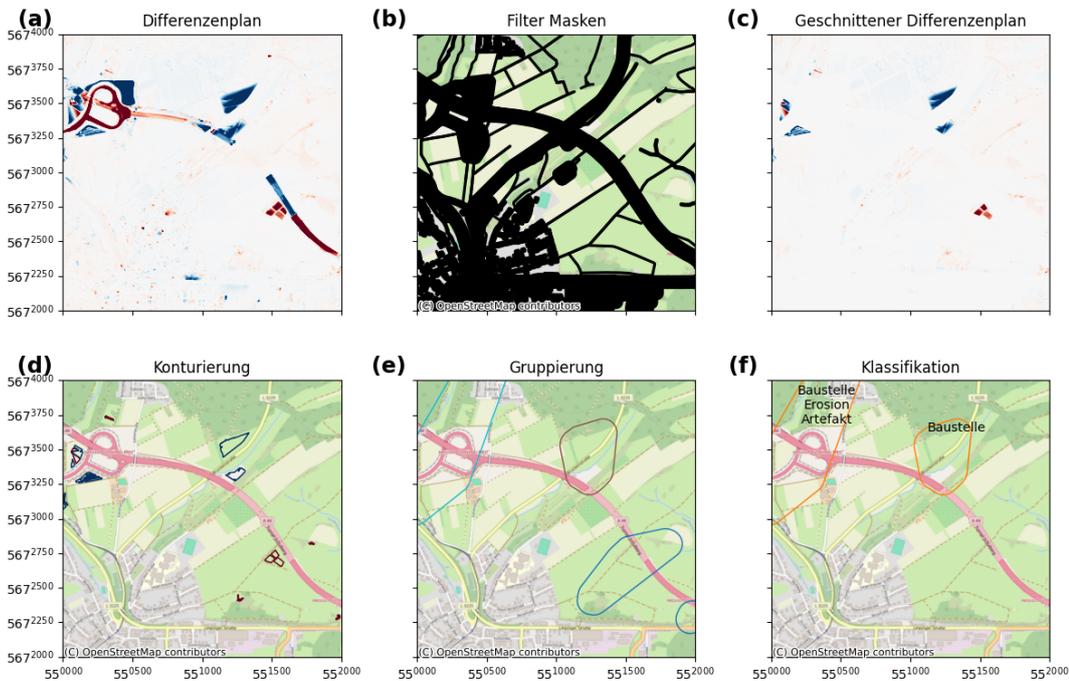


Abbildung 8: Die einzelnen Prozessierungsschritte zur Beschreibung von Bewegungsgebieten auf Basis der Differenzenpläne. Auswahl einer Region nordwestlich von Hessisch-Lichtenau. a) Ursprünglicher Differenzenplan; b) Aus OSM extrahierte Features mit den jeweiligen Buffern; c) mit Buffern verschnittener Differenzenplan; d) Konturierte Differenzen ± 0.5 m; e) Gruppierte Konturpolygone mit max. Abstand von 500 m; f) Ausgewählte klassifizierte Anomalien mit großen Bewegungsbeträgen.

Die so erhaltenen Konturpolygone werden basierend auf dem Abstand (max. 500 m) ihrer Mittelpunkte zu größeren zusammenhängenden Regionen gruppiert (Abb. 8e). Vor allem entlang von Autobahnen können so räumlich nah beieinander liegende Anomalien zusammengefasst werden. Um diese Gruppen wird erneut ein Buffer von 100 m gelegt, um einfacher die Eigenschaften des Geländes im Nahbereich der Anomalie erfassen zu können. Im Folgenden werden diese Gruppen „anomale Regionen“ genannt, während die eigentlichen Konturpolygone mit erhöhten Bewegungen nur „Anomalien“ genannt werden.

Automatische Klassifikation Für jede anomale Region, teilweise für jede Anomalie, werden nun automatisch verschiedene Werte oder Eigenschaften bestimmt, welche im Folgenden kurz dargestellt werden:

- Gesamtfläche der Region und der einzelnen Polygone
- Verteilung der Landnutzung absolut und anteilig (z.B. Gebäudebedeckung, Landwirtschaft, Straßen, Felder, Wiesen, Wasser ...).
- Steigung und Ausrichtung des Geländes in 2014, 2019 und 2021.

- Vorhandensein von Autobahnen, Haupt- und Nebenstraßen.
- Form der Polygone (Ellipsenform, Rundheit, Abflachung).
- Volumina die in Region und Anomalien hinzugefügt, entfernt und bewegt wurden.
- Durchschnittliche Zeitreihenparameter, falls vorhanden (siehe Kap. 3.1.5).
- Anzahl und von Geogefahren betroffene Fläche in der Region und im Umkreis von 1 km

Manuelle Klassifikation Die Bestimmung der vermuteten Ursache der Anomalien wurde wie in der vorherigen Projektphase manuell durchgeführt. Dies erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden im Rahmen der Masterarbeit von Michael Koubik die Anomalien in der Rhein-Main und der Werra-Kali Region klassifiziert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Verbesserung der Prozessierungsschritte verwendet. Dies führte zu einer Reduktion der erkannten Anomalien von 12000 Gruppen auf etwa 5700 Gruppen. Im Anschluss wurden zwei Teilmengen der anomalen Regionen getrennt manuell klassifiziert: 127 Regionen mit bekannten Geogefahren im Umkreis von 1 km, da hier ein möglicher Zusammenhang vermuten werden könnte, sowie 430 anomale Regionen mit einer Materialbewegung von mindestens 20000 m³, da diese als möglicherweise besonders schwerwiegend vermutet werden könnten (Abb. 8f).

Für die manuelle Klassifikation wurde für jede Gruppe ein Bilddatensatz erstellt, welcher mittels der eigens dafür entwickelten Software [U4App](#) ausgewertet wurde (Abb. 9). Die Software erlaubt einen schnellen Vergleich der unterschiedlichen Klassifikationsmerkmale und somit einfache, direkte Klassifizierung der Gruppen in der Geodatenbank. Neben den in den Datengrundlagen genannten Geodaten, wurden hier noch zusätzlich Luftbilder, Bing-Maps und Google-Maps Daten integriert. Für jede anomale Region können bis zu drei manuelle Klassen festgelegt werden. Dies soll zum einen ermöglichen dass für einzelne Anomalien einzelne Ursachen hinterlegt werden können und zum anderen eine Wertung möglicher Ursachen erlauben, falls die Ursache unklar ist. Darüberhinaus kann ein Freitextkommentar hinterlegt werden, in dem die Begründung für die Entscheidung dargelegt wird. Auch können einzelne Gruppen als „unklar“ und mit „weitere Untersuchungen notwendig“ markiert werden, sodass besonders interessante Kandidaten in der Datenbank hervorgehoben werden können. Die Ergebnisse der Klassifikation sind in Kap. 3.2.1 dargestellt.

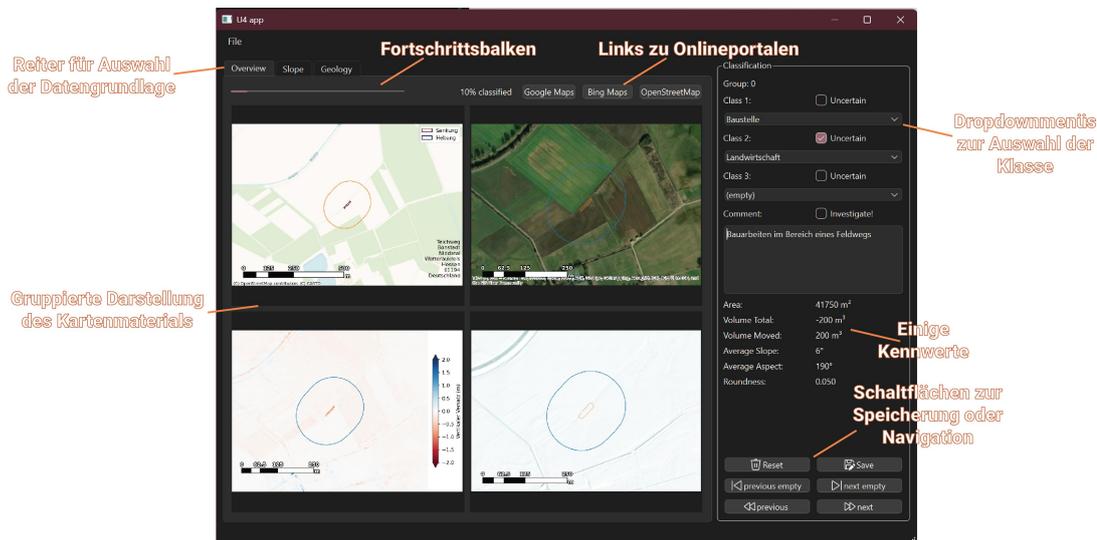


Abbildung 9: Screenshot von U4App und Erklärung der wichtigsten Elemente.

Ergebnisse der Manuellen Klassifizierung Der überwiegende Anteil der bestimmten Bewegungen sind unmittelbar anthropogenen Ursprungs. Vor allem handelt es sich um Baustellen und landwirtschaftliche Aktivitäten. Eine genauere Aufstellung findet sich in Abschnitt 3.2.1. Eine direkte Korrelation der Bewegungsgebiete in Regionen mit erhöhtem Risiko für geologische Ursachen, z.B. Karst oder Bergbau, konnte nicht nachgewiesen werden. Es fand sich lediglich eine Konzentration von Artefakten aufgrund einer fehlerhaften Prozessierung im Norden Hessens. Es ist unklar ob einzelne Cluster von Bewegungen im Zusammenhang mit geologischen Ursachen stehen, da die anthropogenen Aktivitäten diese überlagern.

3.1.4 AP 23-4: Plausibilitätsprüfungen neue Copernicus-Daten

Die neuen Copernicus-Daten wurden auf mehrere Arten überprüft, ob diese mit den Erwartungen aus der ersten Projektphase übereinstimmen. Bereits früh im Projekt stellte sich heraus, dass es in einigen Regionen teilweise sehr unterschiedliche Ergebnisse zwischen den einzelnen Datensätzen gibt. Dies wurde z.B. auch bei anderen Studien festgestellt und liegt daran, dass teilweise unterschiedliche Herangehensweisen für die InSAR und PSI-Prozessierung verwendet wurden (Even u. a. 2024).

Vergleich Unterschiedliche Perioden BBD und EGMS Jeder einzelne Punkt in den vertikalen und Ost-West PSI Daten setzt sich aus mehreren einzelnen Scatterern in einem bestimmten Gebiet um den Punkt (50×50 m für den BBD oder 100×100 m für den EGMS) und aus dem aufsteigenden oder absteigenden Umlauf der Satelliten zusammen. Ansonsten könnten keine einzelnen Bewegungskomponenten in vertikaler oder bodenparalleler Richtung berechnet werden. Da in den verschiedenen Messperioden (BBD – Jan. 2015 bis Dez. 2020 und Jan. 2015 bis Dez. 2021; EGMS Jan. 2016 bis Dez. 2021 und Jan. 2018 bis Dez. 2022) unterschiedliche Scatterer für die Berechnung eines Punktes berücksichtigt werden, kann es zwischen den Epochen und Datensätzen zu leichten Unterschieden kommen. Hierbei ändert sich zwar die Berechnungsgrundlage, aber nicht die Berechnungsweise. Daher sollten diese Abweichungen um einen konstanten Fehlerwert streuen. Ein exemplarisches Beispiel ist in Abb. 10 dargestellt. Dabei zeigt sich zumindest an dem gewählten PSI Punkt, dass es einen in etwa gleich bleibenden fixen Unterschied gibt. Auch zeigen beide Kurven einen sehr ähnlichen Verlauf.

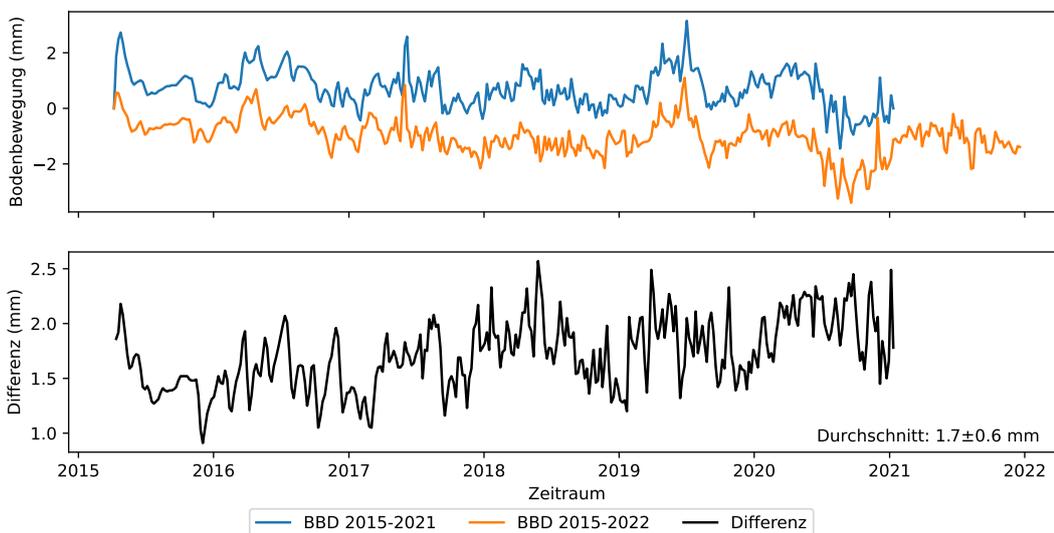


Abbildung 10: Vergleich der beiden vorhandenen BBD Datensätze anhand eines Punktes in der Nähe des Instituts für Angewandte Geowissenschaften Darmstadt. Der ältere Datensatz ist hierbei um 1.7 ± 0.6 mm konstant verschoben. In beiden sind die Kurvenverläufe nahezu identisch.

Für andere Punkte und bei der Auswertung in größeren Gebieten können sich die Datenquellen jedoch sehr stark unterscheiden. Zwar ist das Berechnungsgitter und somit die Koordinaten jeweils für beide BBD und beide EGMS Datensätze gleich, aber je nach dem sind in einer Periode nicht ausreichend einzelne Scatterer zur Berechnung vorhanden. So kann es vorkommen, dass in einem Gebiet nicht jeder Punkt in beiden Datensätzen vorhanden ist. Zusammen mit dem allgemeinen Rauschen einzelner Punkte kann dies zu erheblichen Änderungen bei Trends oder Transienten in den verschiedenen Zeiträumen führen. Dies ist z.B. in Abb. 11 für die Station „Kloppenheim“ zu erkennen, wo die beiden BBD Kurven (blau und orange), vor allem Anfang 2017 und zwischen 2018 und 2022 einen stark unterschiedlichen Verlauf zeigen. Daher wird bei Zeitreihendarstellung, soweit wie möglich immer der Wertebereich farblich hinterlegt. So kann die Streubreite der PSI Messungen in einem Gebiet besser abgeschätzt werden.

Vergleich BBD-Daten und EGMS Daten zu externen Daten Da laut Kalia u. a. 2021 und Costantini u. a. 2021 die PSI-Daten mit einem GNSS-Gitter kalibriert wurden, wurden die Unterschiede der vorliegenden PSI-Daten mit vorhandenen GNSS Daten des EUREF Permanent GNSS Network in Hessen verglichen. In Hessen liegen drei Stationen dieses Netzwerkes, welche räumlich aber in der Region um Frankfurt konzentriert sind. Daher sind sie nicht repräsentativ für den Gesamtdatensatz, können für einen einfachen Vergleich aber dennoch verwendet werden. Die verwendeten Stationen sind:

- Bad Homburg vor der Höhe, ca. 20 km nordnordwestlich von Frankfurt am Rand des Taunus, auf dem Schloss Bad Homburg, Stationscode: BADH00DEU.
- Kloppenburg, ca. 20 km nordnordöstlich von Frankfurt, 13 km westlich von Bad Homburg, auf dem Gelände eines Wasserwerks, Stationscode: KLOP00DEU.
- Frankfurt a.M., am südlichen Mainufer in der Nähe des Bahnhofs Stresemannallee, auf dem Gebäude des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie BKG, Stationscode: FFMJ00DEU.

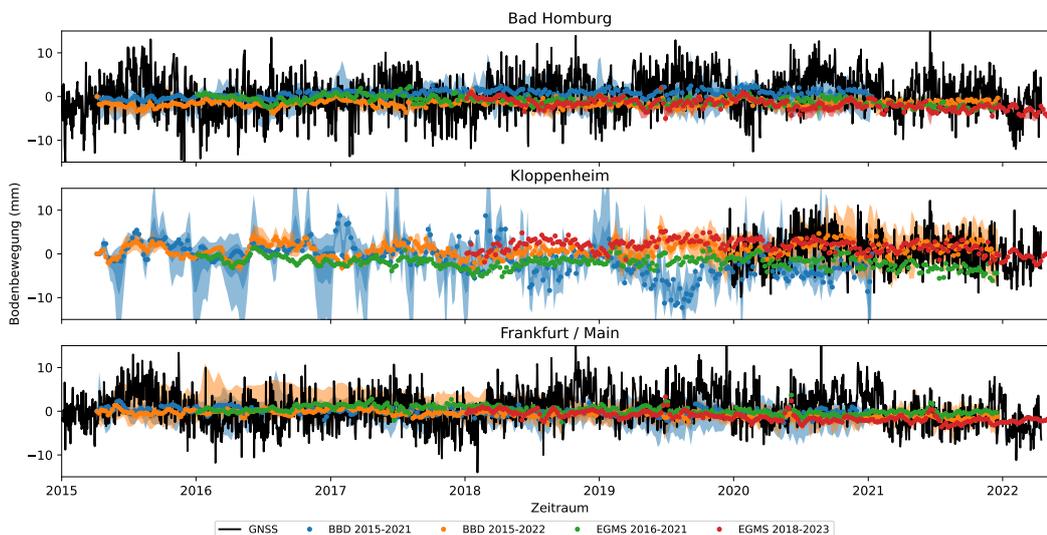


Abbildung 11: Vergleich der PSI Daten mit GNSS Daten aus dem gleichen Zeitraum. Die PSI Daten stammen aus einem Radius von 75 m um die GNSS Station. Die farblich hinterlegten Flächen zeigen die Streuung der Werte in einem Gebiet. Dunklere Flächen zeigen den 1σ , hellere Flächen den 2σ Bereich an.

Für jede der Stationen wurden die PSI Punkte in einem Radius von 75 m um die GNSS Station extrahiert und gemittelt. Die Anzahl der verwendeten Punkte pro Station schwankt hierbei zwischen 4 und 15, je nach Station und Datensatz. Wie in Abb. 11 zu erkennen ist, sind die GNSS Daten weitaus höher aufgelöst und weisen ein höheres Rauschen auf. Für alle drei Stationen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in

der mittleren Bewegung über den Gesamtzeitraum. Die GNSS Daten bewegen sich im Mittel um 0 ± 9 mm, während sich die PSI Daten zwischen -2.1 und $+0.8 \pm 2.4$ mm bewegen. Saisonale Trends, welche in den GNSS Daten stärker ausgeprägt sind, z.B. ein tendenziell leicht höherer Wert in den späten Herbstmonaten oder ein leicht erhöhter Wert im Sommer 2015 für FFM und HOM, können in den PSI Daten nur schwer nachvollzogen werden. Abschließend ist jedoch anzumerken, dass die Werte sowohl für PSI als auch GNSS stark schwanken und sich oft in ihrem Fehlerbereich überlappen. Daher ist davon auszugehen, dass im Mittel die Abweichungen statistisch nicht relevant sind, jedoch bei Einzelfallbetrachtung durchaus unterschiedliche Werte vorhanden sein können.

Vergleich BBD-Daten zu EGMS Daten Even u. a. 2024 beleuchten in ihrer Publikation bereits eindeutig die Unterschiede von BBD und EGMS Datensatz, welche zwar von der selben Firma prozessiert werden, aber mit unterschiedlichen Ansätzen. Dies sorgt dafür, dass in bestimmten Regionen die Anpassung der echten Bewegung im Modell unterschiedlich erfasst werden. Dies lässt sich insbesondere bei starker nicht-linearer Bewegung feststellen. So wird im BBD-Datensatz die Bodenbewegung in Crumstadt, fast ausschließlich mittels Sinusfunktionen erfasst, und erscheint daher als außergewöhnlich hohe saisonale Komponente. Im EGMS Datensatz wird ein anderer Ansatz verwendet, welcher dazu führt, dass die Bewegungen ähnlicher zu den Gasspeicherfüllständen sind (Abb. 12). Daher sind die EGMS Daten in diesem Fall als plausibler einzustufen, weil eine starke saisonale Bewegung die nur räumlich begrenzt im Gebiet des Gasspeichers auftritt nicht wahrscheinlich erscheint (Rudolf u. a. 2024a). Dies weist darauf hin, dass insbesondere bei der Interpretation von nicht-linearen, transienten Bewegungen im BBD Datensatz Vorsicht geboten ist. In der nächsten Periode der BBD Daten, sollen diese ebenfalls auf die gleiche Prozessierung wie die EGMS Daten umgestellt werden.

Ein weiterer Punkt ist, dass die EGMS Daten in Europa nicht einheitlich prozessiert werden, z.B. in Deutschland mit saisonaler und linearer Komponente, in anderen Ländern mit abschnittsweiser linearer Bewegung. Darunter leidet auch die Vergleichbarkeit mit anderen Studien aus dem europäischen Ausland.

3.1.5 AP 23-5: Darstellung und Analyse der Copernicus-Daten im zeitlichen Verlauf

Im vorherigen Projektjahr (2022) konnten verschiedene Regionen mit starken jahreszeitlichen Schwankungen und längerfristigen Bewegungen identifiziert werden. Beispielsweise zeigten einzelne Stadtgebiete von Frankfurt a.M., sowie die Gegend um den Gasspeicher Stockstadt-Riedstadt, erhöhte Aktivität. Zunächst wurden diese Regionen detailliert untersucht und die dabei entwickelte Zeitreihenanalyse auf ganz Hessen ausgeweitet. Darüberhinaus wurde eine externe Softwarelösung (ADATools, Barra u. a. (2017), Tomás u. a. (2019) und Navarro u. a. (2020)) auf Anwendbarkeit und Vergleichbarkeit mit dem in 2022 entwickelten GroundMotionAnalyzer geprüft (Krzepek u. a. 2023).

Datengrundlage Die mittels PS-InSAR ausgewerteten Copernicus Daten, bestehen aus Bewegungsinformationen die in einem gleichmäßigen Raster ausgewertet wurden. Für diese Projektphase wurden sowohl Daten des Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD, Kalia u. a. (2021)), als auch die des European Ground Motion Services (EGMS, Costantini u. a. (2021)) verwendet. Beide Datensätze verwenden als Grundlage die selben InSAR-Daten, werden allerdings leicht unterschiedlich ausgewertet (Even u. a. 2024). Für die BBD Daten wird ein Berechnungsraster von 50×50 m verwendet, während beim EGMS das Raster 100×100 m beträgt. Auch der Grenzwert, ab dem ein Datenpunkt zur Berechnung herangezogen wird ist bei den Datensätzen unterschiedlich. Beim BBD werden nur PS in einer Rasterzelle verwendet die mindestens eine zeitliche Kohärenz von 0.75 aufweisen, während der EGMS eine Abweichung vom quadratischen Mittel der Bewegung (RMSE) von maximal 5 mm zulässt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei einzelnen Datenpunkten beträgt sechs Tage für beide Datensätze, jedoch sind sie um drei Tage verschoben. Der Messzeitraum beträgt 01. April 2015 bis 31. Dezember 2022 für den BBD Datensatz in einer durchgängigen Zeitreihe. Der in Kap. 3.1.4 vorgestellte, ältere BBD Datensatz bis Dezember 2021 wurde in dieser Phase

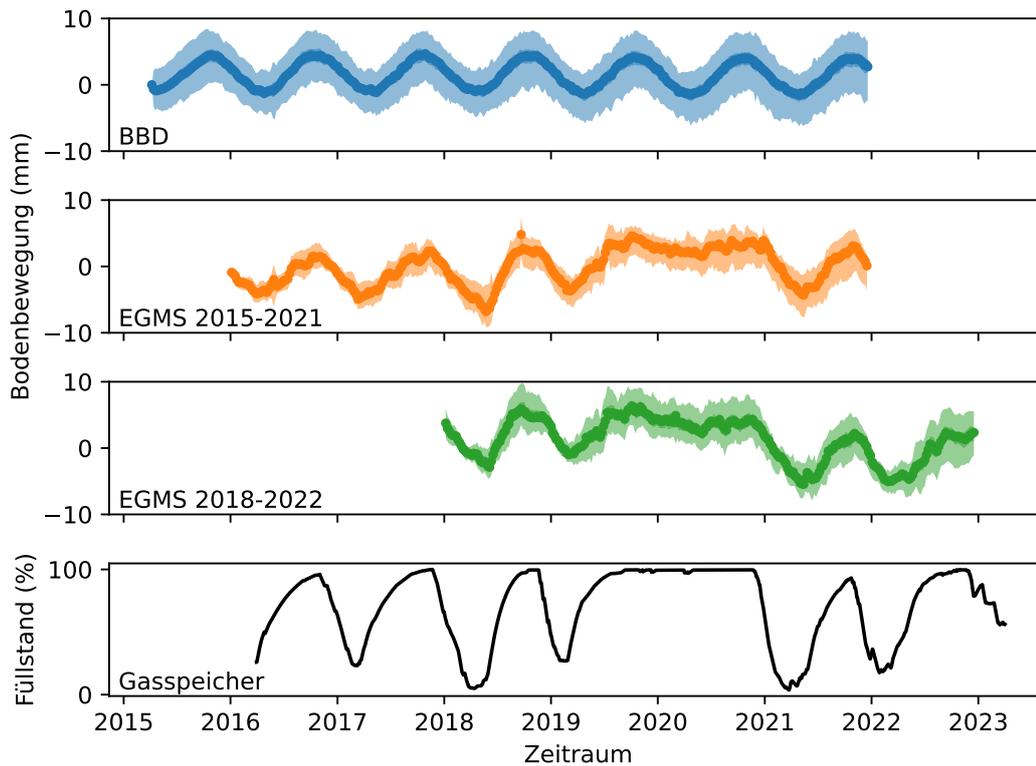


Abbildung 12: Vergleich der verschiedenen PSI Datensätze aus dem Ortsgebiet von Crumstadt, mit dem Füllstand des Gasspeichers Crumstadt. In beiden EGMS Datensätzen ist die lange Periode mit hohem Füllstand von Sommer 2019 bis Winter 2021 deutlich zu erkennen wohingegen im BBD Datensatz nur sinusförmige Schwankungen sichtbar sind. Die farbig hinterlegten Flächen, stellen die 95% Perzentile aller Werte dar (jeweils 359 PS für BBD und 126 PS für EGMS).

nicht verwendet. Für den EGMS Datensatz werden zwei zeitlich versetzte Messzeiträume verwendet zum einen vom 05. April 2016 bis 16. Dezember 2021 und vom 06. Januar 2018 bis 23. Dezember 2022. Dies verhindert dass über die Zeit Scatterer aufgrund des RMSE-Kriteriums ausgeschlossen werden und erhöht die Anzahl der Scatterer im Datensatz. Genaueres zu den Unterschieden und deren Auswirkungen wird in Even u. a. (2024) erläutert.

Damit die Daten mit dem selben Verfahren analysiert werden können, wurden sie von ihren Ursprungsdateiformaten in das GeoPackage-Format (GPKG) überführt. Dies basiert im wesentlichen auf einer Erweiterung des SQLite-Datenbankformats mit zusätzlichen Funktionen. So können neben klassischen SQL-Abfragen auch räumliche Selektionen, ähnlich wie mit Shape-Files durchgeführt werden. Da das Format auch die einfacheren SQL-Abfragen unterstützt, können verschiedene Schritte schneller und parallelisiert durchgeführt werden. Insgesamt wird dadurch die Performance der hier verwendeten Skripte erheblich gesteigert, wobei die Kompatibilität mit GIS-Programmen wie ArcGIS und QGIS erhalten bleibt. Informationen zum GeoPackage-Format finden sich auf der Webseite des [Open Geospatial Consortiums](#).

Innerhalb der GPKG-Datenbanken sind die Bodenbewegungsdaten jeweils in einzelnen Tables für Vertikal- und Ost-West-Bewegung abgelegt. Jedes Table besteht aus einer Reihe pro Punkt und Spalten für die Bewegung pro Zeitpunkt und einigen zusätzlichen Informationen. Die Bewegung ist hier jeweils auf den ersten verfügbaren Messwert in der Zeitreihe normiert ($d(t_0) = 0 \text{ mm}$). Je nach Datenpunkt und Datensatz sind unterschiedliche Start- und Endzeitpunkte möglich, ebenfalls unterscheiden sich die

erhobenen Zusatzinformationen in BBD und EGMS Datensätzen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Datengrundlagen in den unterschiedlichen Datensätzen

BBD-Datensatz	
Spaltenname	Beschreibung
OBJECTID	Interne Referenz ID
Shape	Binäre Punktinformation (OGC-Punkt)
ID	Referenz ID aus Ursprungsdatensatz
Input	Orbitinformationen der Berechnungsgrundlage
X	Rechtswert, in ETRS89/UTM zone 32N (EPSG:25832)
Y	Hochwert, in ETRS89/UTM zone 32N (EPSG:25832)
Z	Höhe über Bezugshöhe
mean_velo_...	Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit (... = Richtung)
var_mean_velo_...	Varianz der mittl. Bewegungsgeschwindigkeit
date_YYYYMMDD	Messwert an Tag X im Jahr-Monat-Tag Format
EGMS-Datensatz	
Spaltenname	Beschreibung
fid	Interne Referenz ID
geom	Binäre Punktinformation (OGC-Punkt)
pid	Scatterer ID
easting	Rechtswert, ETRS89-extended/LAEA Europe (EPSG:3035)
northing	Hochwert, ETRS89-extended/LAEA Europe (EPSG:3035)
height	Höhe über Bezugshöhe
rmse	Geometrisches Mittel (Grenzwert für Filter)
mean_velocity	Mittlere Bewegungsgeschwindigkeit
mean_velocity_std	Standardabweichung Bewegungsgeschwindigkeit
acceleration	Mittlere Beschleunigung
acceleration_std	Standardabweichung Beschleunigung
seasonality	Mittlere Saisonalität
seasonality_std	Standardabweichung Saisonalität
YYYYMMDD	Messwert an Tag X im Jahr-Monat-Tag Format

Zeitreihenanalyse mittels Inversion Die Messreihen der Bodenbewegung werden mit einem Inversionsalgorithmus in ihre einzelnen Komponenten zerlegt. Die Logik hierzu basiert auf den Publikationen von Sudhaus und Jónsson (2009) und Metzger u. a. (2012) und wurde ursprünglich als Matlab-Quellcode von S. Metzger (pers. Kommunikation) übernommen und für das Projekt in das Python Modul [↔U4Py](#) transkribiert. Mathematische Grundlage ist die Annahme, dass die gemessenen Bodenbewegungen \mathbb{D} eine lineare Kombination aus verschiedenen, definierten Komponenten sind:

$$\mathbb{D} = \mathbb{G} \cdot \mathbb{M} \quad (1)$$

Die einzelnen Komponenten überlagern sich und bilden eine sog. Greensche Funktion \mathbb{G} und ergeben in der Gesamtheit die gemessene Zeitreihe \mathbb{D} (Abb. 13). Die Komponenten haben einzelne Modellparameter \mathbb{M} , welche den Funktionsvariablen entsprechen. Setzt man nun für \mathbb{D} die gemessenen Bodenbewegungen ein, können die Anteile der Modellparameter an der Bewegung durch Inversion der Gleichung 1 berechnet werden.

$$\mathbb{M} = (\mathbb{G}'\mathbb{G})^{-1} \mathbb{G}'\mathbb{D} \quad (2)$$

Hierbei sind \mathbb{G} , \mathbb{M} und \mathbb{D} jeweils Matrizen mit teilweise mehreren Dimensionen. Die Bodenbewegung \mathbb{D} hat $3 \times N \times T$ Dimensionen, wobei N die Anzahl der verwendeten PS-Punkte für jede der drei Richtungen (Ost-West, Nord-Süd, Vertikal) und T die Anzahl der Messpunkte über die Zeit ist. Diese Nord-Süd

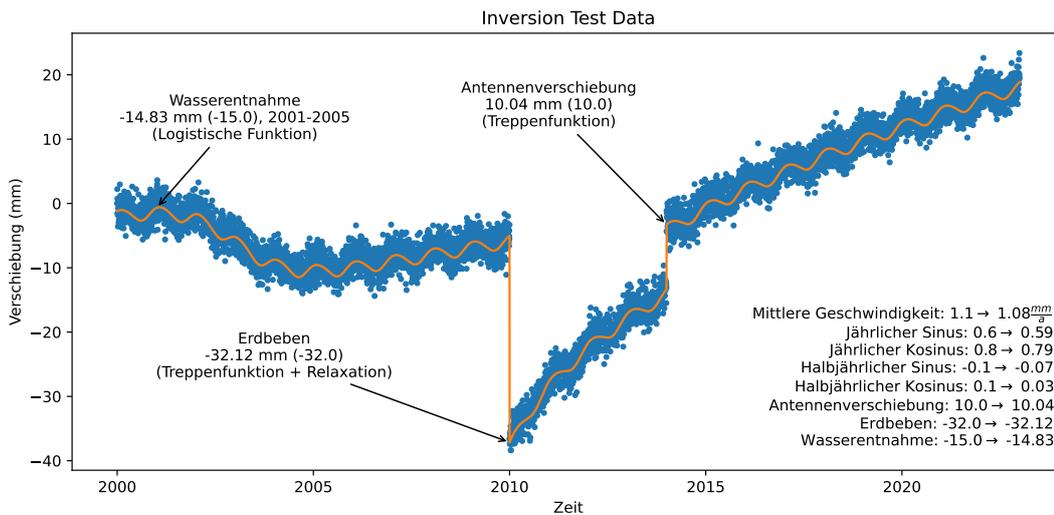


Abbildung 13: Beispiel für eine künstlich generierte Zeitreihe (blaue Punkte) mit allen relevanten Komponenten. Die Messwerte wurden zusätzlich mit weißem Rauschen versehen. Unten rechts sind die vorgegebenen Werte und die mittels Inversion (orangene Kurve) bestimmten Werte dargestellt.

Komponente ist im vorliegenden Fall identisch mit Ost-West, da die Methode ursprünglich für GNSS Daten entwickelt wurde, die PS-InSAR Methode aber keine Messung in Nord-Süd-Richtung erlaubt. Die Greensche Funktion \mathbb{G} hat $N \times K$ Dimensionen, wobei K der Anzahl der angenommenen Komponenten ist. Der Modelparameter \mathbb{M} hat $3 \times M$ Dimensionen, mit M Parametern für jede Richtung, sodass alle Funktionen in der K Komponenten ausreichend definiert sind. Zur Lösung von Gleichung 2 wird das Python Modul \leftrightarrow SciPy für schwachbesetzte Matrizen verwendet. Dies sorgt für eine effizientere Lösung und senkt den Speicherbedarf erheblich.

Die Art der Komponenten in \mathbb{G} ist beliebig definierbar und kann unterschiedlicher Natur sein. Es wurden verschiedene Komponenten in den Algorithmus implementiert:

Polynome:

$$[A_1 + A_2 \cdot (t - t_R) + A_3 \cdot (t - t_R)^2 + A_n \cdot (t - t_R)^{n-1} + \dots] \quad (3)$$

Im vorliegenden Fall wurden maximal Polynome zweiten Grades verwendet. Somit entsprechen die Komponenten:

- A_1 : theoretische Bodenposition im Jahr 0 in mm, relativ zum Start der Messung
- A_2 : mittlere Bodengeschwindigkeit in $\frac{mm}{a}$, z.B. durch Tektonik
- A_3 : mittlere Bodenbeschleunigung in $\frac{mm}{a^2}$, z.B. aufgrund isostatischen Ausgleichs

Sinus und Kosinus:

$$[B_1 \cdot \sin(2\pi t) + B_2 \cdot \cos(2\pi t) + B_3 \cdot \sin(4\pi t) + B_4 \cdot \cos(4\pi t)] \quad (4)$$

Hierbei werden sowohl Schwankungen über ein Jahr (B_1, B_2) als auch halbjährliche (B_3, B_4) Schwankungen gemessen. Durch das Superpositionsprinzip ergibt sich aus den jeweiligen Komponentenpaaren B_n, B_{n+1} je eine Amplitude a und Phasenverschiebung φ_0 die den Zeitpunkt des Maximums anzeigt:

$$a = \sqrt{B_n^2 + B_{n+1}^2 + 2B_n B_{n+1} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (5)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{B_n \sin\varphi_1 + B_{n+1} \sin\varphi_2}{B_n \cos\varphi_1 + B_{n+1} \cos\varphi_2} \right) \quad (6)$$

mit $\varphi_1 = 0$ und $\varphi_2 = \{2\pi, 4\pi\}$

Treppen-Funktion (Heaviside-Funktion):

$$[C_n \cdot \Theta(t) + \dots] \quad (7)$$

Zur Beschreibung abrupter Sprünge um den Betrag C_n im Datensatz über wenige Messpunkte wie sie z.B. bei Erdbeben oder Antennenverschiebungen von GNSS Antennen auftreten können. Der Zeitpunkt t muss bekannt sein und wird manuell vordefiniert. Es können auch mehrere Sprünge in einer Zeitreihe angepasst werden und sowohl positive als auch negative Beträge gemessen werden.

Postseismische Relaxation:

$$\left[D_n \cdot \log\left(1 + \frac{t}{dT_n}\right) + \dots \right] \quad (8)$$

mit $dT_n = 1$ nach Bevis und Brown (2014). Ist davon auszugehen, dass ein oder mehrere Erdbeben im Datensatz vorliegen, kann für die Relaxation der Kruste im Anschluss diese Funktion verwendet werden. Das eigentliche Beben wird als Treppen-Funktion angepasst. Auch hier muss der Zeitpunkt t bekannt sein.

Grundwasserentnahme oder -regeneration:

$$\left[E_n \cdot \frac{1}{1 + e^{-kE_n(t-t_0)} \left(\frac{E_n}{t_0} - 1\right)} + \dots \right] \quad (9)$$

Es wird angenommen dass die Bodenbewegung aufgrund von Grundwasserspiegeländerungen in einem definierten Gebiet sich zunächst langsam über einen gewissen Zeitraum entwickelt, dann konstant linear verläuft und sich langsam auf einem neuen Niveau einpendelt. Daher wurde eine logistische Wachstumsfunktion als passende Funktion ausgewählt. Hierbei wurden die Faktoren k und t_0 wie folgt gewählt:

$$k = \frac{2 \cdot 2.92}{t_{end} - t_{start}} \quad (10)$$

sodass sich der Anstieg genau zwischen dem Startzeitpunkt t_{start} und Endzeitpunkt t_{end} der Bewegung befindet, und

$$t_0 = t_{start} + \frac{1}{2}(t_{end} - t_{start}) \quad (11)$$

sodass die maximale Änderung genau in der Mitte von t_{start} und t_{end} liegt. Auch hier können negative (Schrumpfung, Entnahme) oder positive (Quellung, Zunahme) Beträge gemessen werden, wobei der Zeitraum ungefähr bekannt sein muss.

Anwendung auf den Datensatz Die zuvor gezeigte Methode ist flexibel anwendbar. Da das Projekt als Ziel hat die Bodenbewegungen in Hessen zu bestimmen, wurde die Inversion auf die Daten im gesamten Bundesland angewandt. Hierfür wurde das Bundesland in verschiedenen große Areale unterteilt, um verschiedene räumliche Skalen abzudecken. Die Rastergrößen waren hierbei 2.5 km, 1 km, 250 m, 100 m und 50 m, letztere nur für den BBD-Datensatz. Der Ablauf einer Analyse ist hierbei in mehrere Teilschritte unterteilt:

1. Alle Messpunkte werden in einer großen Matrix \mathbb{D} zusammengefasst.
 - Jede Komponente (EW, NS, UD) einzeln.
 - Gleichzeitige Inversion aller Komponenten.

- Für bestimmte Parameter müssen Zeitpunkte (Erdbeben, Antennenverschiebung) oder Zeiträume (Wasserentnahme) angegeben werden.

2. Zwei Iterationen mit Entfernung von Ausreißern ($> 2\sigma$) als Zwischenschritt.

3. Darstellung als Komponente.

Die Ergebnisse werden für die Komponenten als GeoTiff im Rasterdatenformat abgespeichert. Dies erlaubt eine schnellere Darstellung in den gängigen GIS-Programmen, im Vergleich zu Punktdaten. So können Anomalien auf verschiedenen Skalen identifiziert werden. Bereiche die keine Punkte enthalten werden als 'NoData' abgespeichert und so transparent dargestellt. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass Bereiche in denen nur wenige Scatterer vorhanden sind, gerade bei großen Skalen überproportional stark vertreten sind und so gegebenenfalls den Gesamteindruck verfälschen können. Besonders stark ist dieser Effekt bei überwiegend ländlichen Regionen wo die Daten sich ohnehin auf wenige, kleine Bereiche konzentrieren. Daher wird für die Darstellung der Inversionsergebnisse empfohlen, die Daten gestaffelt, je nach Zoomstufe darzustellen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Anpassung von Bodenbewegungen in einem bestimmten Gebiet. Dieses kann beispielsweise als Shape-File definiert werden und mittels Skript automatisiert für alle Polygone im Shape-File ausgewertet werden. So können detaillierte Studien für bestimmte Regionen durchgeführt werden. Hierbei werden alle Messpunkte im jeweiligen Polygon gemeinsam ausgewertet und ergeben einen Satz an Modellparametern. Dies verringert Messungenauigkeiten, welche durch die teilweise stark schwankenden Bewegungen der Scatterer im Gesamtzeitraum entstehen, durch eine „Mittelung“ über mehrere Scatterer. Eine solche Analyse wurde für die Regionen Frankfurt und Crumstadt durchgeführt und im nächsten Abschnitt genauer erläutert.

Detektierte Anomalien im BBD-Datensatz Im gesamten Landesgebiet liegen die Bodenbewegungen im km-Maßstab im Durchschnitt unter $\pm 1.5 \frac{mm}{a}$. Nur wenige Regionen stechen mit erhöhten Raten über $\pm 2 \frac{mm}{a}$ heraus. Der BBD gibt hierbei $\pm 2 \frac{mm}{a}$ als maximale Genauigkeit der Methodik an. Betrachtet man Bewegungen unterhalb dieser Schwelle, so lässt sich tendenziell im Lahn-Dill Bergland, sowie im Bereich Spessart und Rhön, eine großräumige Hebung erkennen ($\approx +1 \frac{mm}{a}$). Bereiche im Oberrheingraben und Odenwald sind eher durch Absenkungen charakterisiert ($\geq 1 \frac{mm}{a}$). Auffällig ist ein von Norden nach Süden verlaufendes Band mit einem Sprung um $+0.5 \frac{mm}{a}$ entlang des Rechtswerts von ca. 475000 m (WGS 84/UTM zone 32N). Dies ist vermutlich ein systematischer Fehler in den PSI Daten welcher zwar in der Fehlertoleranz der Methodik liegt, aber dennoch für einzelne Regionen, vor allem im Odenwald, leicht erhöhte Bewegungsraten hervorruft.

Bei der Durchsicht der Bodenbewegungen in Hessen konnten in der Region in und um Frankfurt eine starke Abweichung der durchschnittlichen Bodenbewegung im Vergleich zur Umgebung erkannt werden (Abb. 14a). Sowohl bei manueller Sichtung als auch bei Analyse mit dem GroundMotionAnalyzer konnten diese festgestellt werden (Abb. 14b).

Eine besonders starke Absenkung ist um das Industriegebiet Höchst erkennbar, welche im Wesentlichen auf Absenkung des Grundwasserspiegels zurückzuführen ist. Vor allem von der Absenkung betroffen ist das Gebiet zwischen der AS 16 FF-Höchst (BAB 66) und dem nördlichen Main Ufer (Abb. 15a)). Hierbei verläuft eine scharfe Grenze der Bewegungen entlang des Liederbachtals, mit starker Bewegung westlich des Bachlaufs. Auch im Stadtbereich von Frankfurt, im Bereich des Europaviertels, lässt sich eine starke Absenkung messen. Hierbei liegt ein Zusammenhang mit Baumaßnahmen zum Bau der U5 und verschiedener Hochhäuser nahe (Rudolf u. a. 2024a). Weitere hohe Absenkungsraten finden sich im Bereich verschiedener Deponien (z.B. Dreieich-Buchsschlag, NW Hüttenfeld, Bastwald), großer Baustellen (z.B. GSI-Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt) oder Bergbauaktivität (z.B im Kreis Hersfeld-Rotenburg, Abb. 15b)).

Im Mittel gibt es im Großraum der Frankfurter Innenstadt eine konstante, niedrige Absenkung um ca. $-0.5 \frac{mm}{a}$ und keine starke Abweichung von diesem linearen Trend (Abb. 16a). Im Bereich westlich der

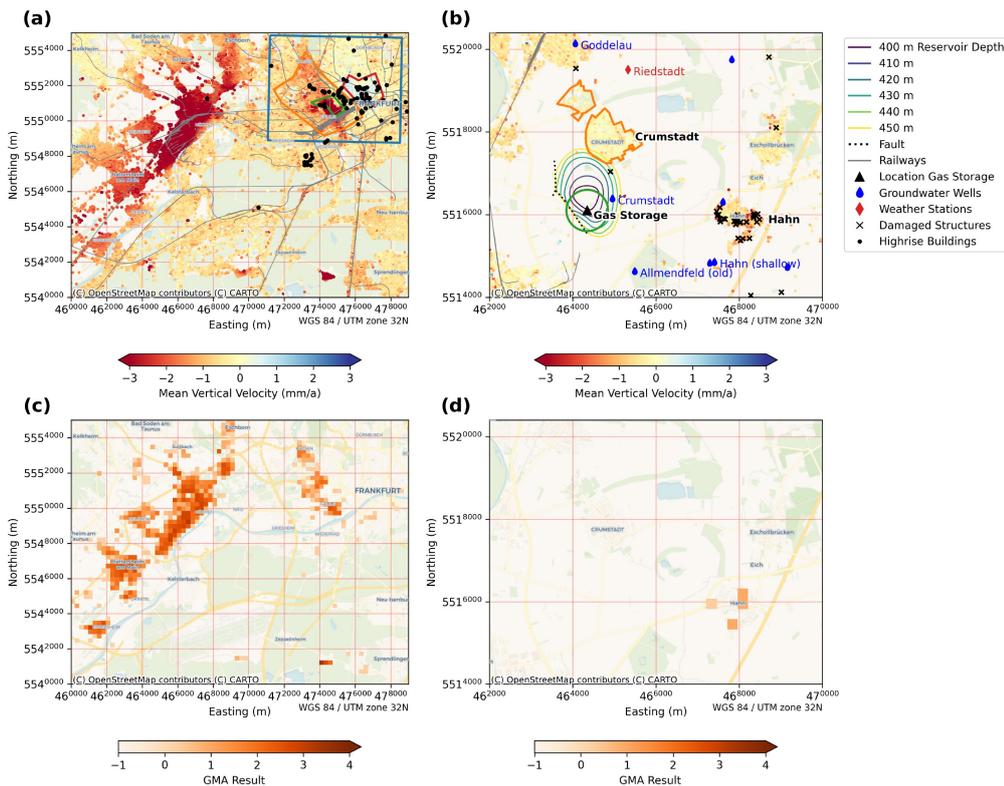


Abbildung 14: Durchschnittliche Bodengeschwindigkeiten (a-b) und detektierte Anomalien (c-d) in Südhessen. a) Durchschnittliche Bodengeschwindigkeit in der Rhein-Main-Region, die große Bodenbewegung im Nordwesten ist das Industriegebiet Höchst. Die farbigen Polygone im Nordosten sind in Abb. 16 als einzelne Zeitreihen dargestellt. b) Durchschnittliche Bodengeschwindigkeit im Bereich um Crumstadt, sowie einige relevante Zusatzinformationen. c) Detektierte Anomalien mit dem GroundMotionAnalyzer im Gebiet um Frankfurt. d) Fehlende Detektion von Anomalien im Bereich von Crumstadt.

Innenstadt, von Main über Gallus, bis nach Bockenheim, lässt sich jedoch eine stärkere Absenkung um $-1.27 \frac{mm}{a}$ (Abb. 16b) feststellen, welche im Bereich der Messe, bzw. Europaviertel, auf fast $-3 \frac{mm}{a}$ ansteigt (Abb. 16c). Im Bereich des Westends und Nordend-West ist tendenziell eine Hebung um $+0.2 \frac{mm}{a}$ zu messen (Abb. 16d). Vor allem in Abb. 16c und d, sind kurzzeitige nicht-lineare, transiente Absenkungen und Hebungen messbar. Diese wurden im vorliegenden Fall als Transienten angepasst. Die Anomalie im Europaviertel lässt sich mit einer Kombination aus transienter Hebung ($+8.9$ mm von 2015 bis 2017) und Absenkung (-4.8 mm von 2018 bis 2022) erklären. In Summe ergibt sich so eine durchschnittliche Absenkung von ca. -16.2 mm im Beobachtungszeitraum (-2.91 mm $\cdot 7$ a + 8.9 mm - 4.8 mm). Ebenfalls, ist im Bereich nördlich der Innenstadt eine kurzzeitige Senkung von -3.5 mm von Ende 2016 bis Anfang 2017 messbar, welche von einer Hebung um $+1.9$ mm Ende 2017 abgelöst wird. Dies steht in enger zeitlicher Korrelation mit verschiedenen Baumaßnahmen im Europaviertel und dem Neubau einiger Hochhäuser entlang des Innenstadtrings. Daher liegt ein Zusammenhang mit Wasserhaltungsmaßnahmen und Setzungen durch die Auflasten nahe. Details zu diesen Anomalien sind in Rudolf u. a. (2024a) veröffentlicht.

Während die Anomalie in Frankfurt eine anomale lineare Bewegung ist, zeigt sich im Stadtgebiet von Crumstadt im südlichen hessischen Ried eine starke saisonale Bewegung. Diese wurde bereits im

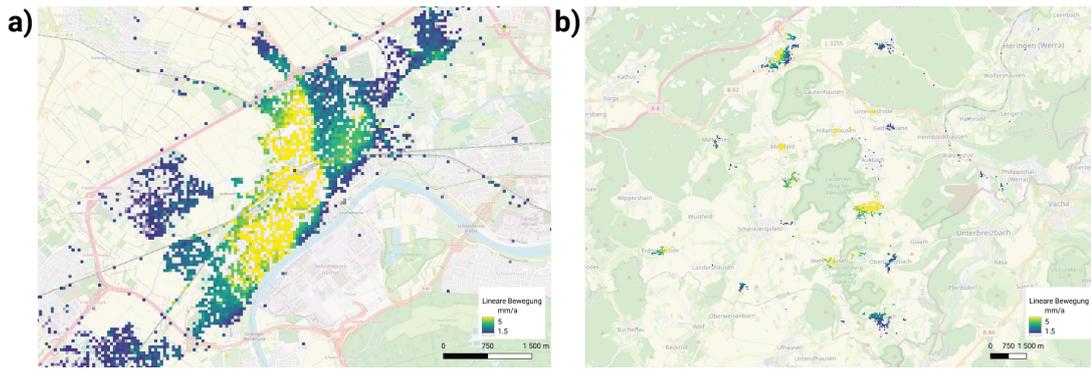


Abbildung 15: Erhöhte absolute lineare Bewegungsrate im Bereich a) Höchst und b) Hersfeld-Rotenburg bzw. Werra-Kali.

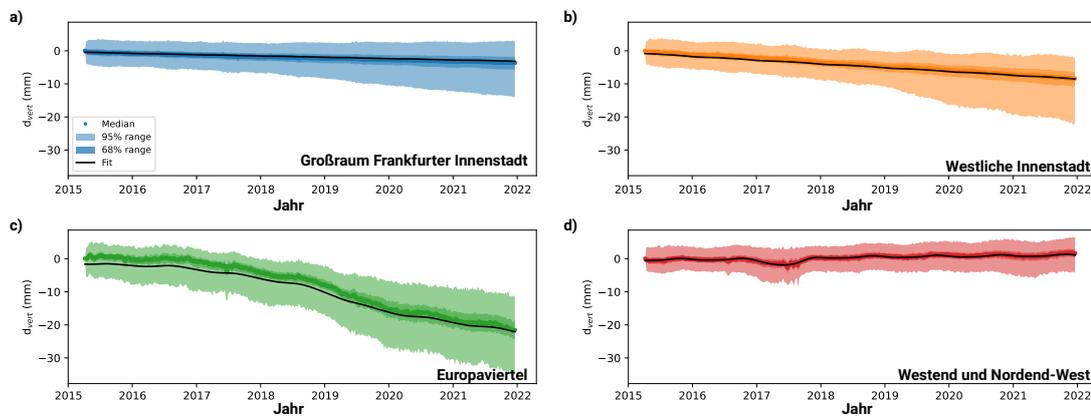


Abbildung 16: Detaillierte Zeitreihenanalyse der Teilregionen in Frankfurt (mod. nach Rudolf u. a. 2024a): a) Gesamter Innenstadtbereich, b) Großraum um die Absenkung, c) Zentralbereich der Absenkung, d) Region mit Anhebung nördlich der Altstadt.

Abschlussbericht zum ersten Projektjahr, sowie in den Publikationen Krzepak u. a. (2023) und Rudolf u. a. (2024a) beschrieben.

Zeitreihen Analyse mittels ADA-tools Als Alternative zum Ground-Motion-Analyser der in der vorhergehenden Projektperiode verwendet wurde, wurde für diese Phase auch ein weiteres Tool zur Bestimmung von anomalen Bewegungen verwendet. Es handelt sich hierbei um ADAtools, welches vom Technologischen Zentrum für Telekommunikation in Katalonien (CTTC/CERCA) entwickelt wird (Barra u. a. 2017; Tomás u. a. 2019; Navarro u. a. 2020). Im speziellen wurde hier ADAfinder verwandt um aktive Deformationsareale (ADA) zu finden. Die Verwendung von ADAclassifier, einem Tool zur automatischen Klassifikation, wurde wegen zu geringer Genauigkeit nicht weiter verfolgt.

Das Tool verwendet hierbei mehrere Schritte um ADAs zu finden. Zunächst werden aus den PSI Datenpunkten nur die beweglichen Punkte mit einer Bewegung die über der zweifachen Standardabweichung des Gesamtdatensatzes liegt ($|v| > 2\sigma$), ausgewählt. Aus diesen Punkten werden Gruppen von mindestens fünf benachbarten Punkten, die sich gegenseitig beeinflussen, zu Polygonen zusammengefasst, die die ADAs darstellen. Die Einflussbereiche der Punkte werden durch einen Umkreis definiert, der das jeweilige Gebiet umschließt. Falls weniger als fünf Punkte zusammengefasst werden, gilt die Deformation als regional unbedeutend. Für jedes ADA werden folgende Parameter geschätzt:

- Anzahl der aggregierten aktiven Punkte (APs)

- Durchschnitts-, Höchst- und Tiefstwerte der AP-Geschwindigkeiten
- Durchschnittliche kumulierte Deformationen der APs basierend auf den letzten vier Erfassungszeitpunkten
- Geschwindigkeitsklasse, die auf der maximalen Geschwindigkeit v_{max} basiert
- Mehrere Qualitätsindizes

Obwohl die ADA-Karte auf gefilterten Daten basiert, ist eine abschließende Qualitätsbewertung jedes ADA notwendig. Der Qualitätsindex (QI) liefert eine Einschätzung des Rauschpegels und der Robustheit der Deformationsschätzungen. Der QI wird durch zwei Parameter definiert: einen temporalen Rauschindex (TNI) und einen räumlichen Rauschindex (SNI), die gemeinsam den finalen Qualitätsindex ergeben.

Der Temporale Rauschindex (TNI) wird für jeden aktiven Punkt (AP) durch die Berechnung der Autokorrelation erster Ordnung ($\rho(t, t-1)$) seiner Zeitreihe ermittelt. Diese Methode misst das Ausmaß des zeitlichen Rauschens sowohl bei linearen als auch nichtlinearen Deformationen. Der AutoKorrelationskoeffizient liegt zwischen 0 und 1, wobei 0 bedeutet, dass das Rauschen stärker als der Deformationstrend ist. Der TNI teilt die aktiven Deformationsgebiete (ADA) in vier Klassen ein, wobei Klasse 1 für geringes Rauschen (hohe Autokorrelation) und Klasse 4 für starkes Rauschen (niedrige Autokorrelation) steht. Diese Klassen basieren laut Barra u. a. 2017 auf einer Simulation mit Daten verschiedenen Signal-Rausch-Verhältnissen.

Der räumliche Rauschindex (SNI) bewertet die räumliche Übereinstimmung innerhalb eines aktiven Deformationsgebiets (ADA). Er misst, wie ähnlich sich die Zeitreihen (TS) der einzelnen Punkte innerhalb eines ADA entwickeln. Es wird angenommen, dass alle Punkte eines ADA zum gleichen Deformationsprozess gehören, wodurch zwar unterschiedliche Bewegungsgrößen auftreten können, aber eine räumliche Korrelation der zeitlichen Entwicklungen erwartet wird. Für jedes ADA wird der Korrelationskoeffizient zwischen allen möglichen Paaren von Zeitreihen berechnet. Der SNI ist eine Vier-Klassen-Einteilung, basierend auf dem Median der Korrelationswerte aller Paare. Klasse 1 steht für eine hohe Korrelation (geringes Rauschen), Klasse 4 für eine sehr niedrige Korrelation (hohes Rauschen). Die Schwellenwerte wurden anhand der Quartile der Ergebnisverteilung festgelegt.

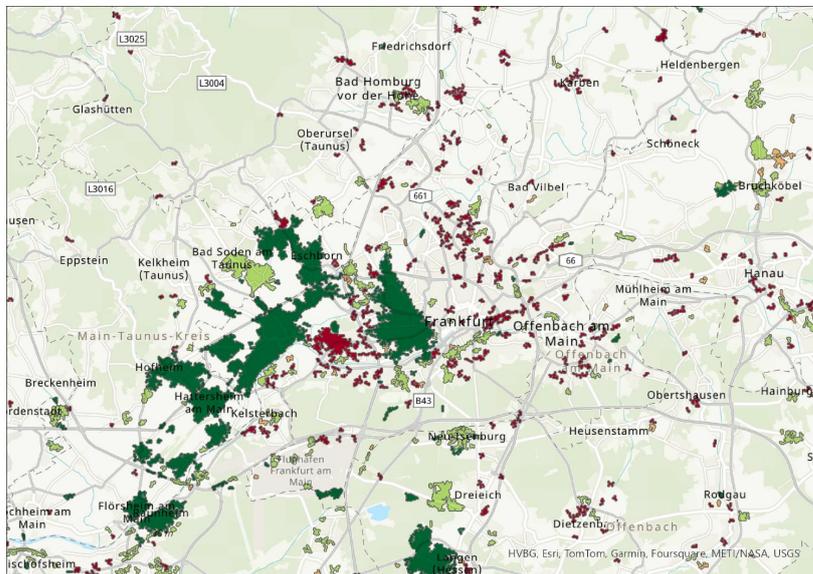


Abbildung 17: Ergebnisse von ADAfinder in der Rhein-Main Region (entspricht ungefähr der Ausdehnung von Abb. 14a). Die gefundenen ADAs überlagern sich zum Großteil mit den Ergebnissen des GMA, liefern also vergleichbare Resultate. Die Farbskala steht für den Qualitätsindex (1: dunkelgrün, 2: grün, 3: orange, 4: rot).

Abbildung 17 zeigt das Ergebnis der Analyse für die Rhein-Main Region mit dem Industriegebiet Höchst im Zentrum. Neben den bereits aus den Ergebnissen des GMA bekannten Regionen, werden viele kleinere

Anomalien mit niedrigem QI erkannt, dabei handelt es sich überwiegend um Rauschen. Auch durch die Clusterung der PSI ist die räumliche Auflösung im Vergleich zum GMA etwas verringert. Aufgrund der Ähnlichkeit der Ergebnisse zu den bereits vorliegenden GMA Regionen, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt. Obwohl mit ADAtools theoretisch eine bessere Detektion von anomalen Regionen möglich ist, da hier auch die zeitliche Korrelation von benachbarten PSI untersucht wird, wird dieser Vorteil als nur gering eingestuft. Da die Software zum Zeitpunkt der Verwendung nur auf Anfrage an wenige Nutzer herausgegeben wurde und nicht als Open-Source Lösung vorliegt wurde diese im Folgenden nicht mehr verwendet.

Korrelation der PSI Daten mit dem Grundwasserspiegel Um die Einflussnahme von Schwankungen im Grundwasserspiegel auf die PSI-Daten zu charakterisieren wurde für jede Grundwassermessstelle für die öffentliche Pegel verfügbar waren die PSI-Punkte im Umkreis von 500 m extrahiert und analysiert. Es werden PSI Daten aus allen drei verfügbaren Datensätzen verwendet (BBD, EGMS 2016-2021 und EGMS 2018-2022).

Da sowohl die Messzeiträume als auch die Messfrequenz unterschiedlich ist, müssen diese vereinheitlicht werden. Es werden nur die Zeiträume verwendet, für welche in beiden Datensätzen Messungen vorliegen und die Datensätze dementsprechend zugeschnitten. Da die Messfrequenz bei den Grundwassermessungen in der Regel höher ist ($dt \leq 1$ Tage), als die für die PSI Daten ($dt = 6$ Tage), werden die Grundwasserstände mittels eindimensionaler, linearer Interpolation auf die Messzeitpunkte der PSI interpoliert. Die im Bereich der Grundwassermessstelle vorhandenen PSI-Punkte werden mittels Median zu einer Zeitreihe zusammengefasst. Anschließend werden alle nicht gültigen Messungen, z.B. aufgrund von einzelnen fehlerhaften Messungen, entfernt. Die beiden Zeitreihen, jeweils für die Grundwasserstände und die Bodenhöhe aus PSI Daten, werden nun mittels einfacher Korrelation verglichen. Es wird sowohl der Pearson ρ_p (linear), als auch der Spearman ρ_s (nicht linear) Korrelationskoeffizient berechnet. Der jeweils maximale Pearson und Spearman Korrelationskoeffizient der drei unterschiedlichen Epochen (EGMS 1+2, BBD) wird in einem Shape-File abgespeichert. Für beide wird auch der p-Wert bestimmt um die Signifikanz der Korrelation abschätzen zu können.

Hierbei zeigt sich, dass vor allem in der Rhein-Main Region und im Ried besonders hohe Korrelationen zwischen dem Grundwasserspiegel und der Bodenbewegung bestehen (Abb. 18). Die höchste negative Korrelation ist für die Messstelle „Darmstadt“ mit $\rho_p = -0.79$ und $\rho_s = -0.74$ zu finden (Abb. 19a). Dies hängt vor allem mit einer starken transienten Zunahme des Grundwasserspiegels um ca. 1.5 m von 2019 bis 2021 zusammen und spricht eher für eine außergewöhnliche Veränderung des Entnahmeverhaltens, ggf. durch Baumaßnahmen. Hohe positive Korrelationen $\rho \geq 0.7$ sind für 17 weitere Messstellen zu finden, wovon 7 Messstellen eine Korrelation von $\rho_s \geq 0.8$ aufweisen. Alle bis auf eine der Messstellen mit $\rho \geq 0.7$ liegen im hydrogeologischen Großraum „Oberrheingraben, Mainzer Becken und nordhessisches Tertiär“. Davon sind 7 im Oberrheingraben, 5 in der Untermainsenke und 5 im Nordhessischen Tertiär. Lediglich die Messstelle „Würges“ befindet sich im Rheinischen Schiefergebirge und somit im hydrogeologischen Großraum des west- und mitteldeutschen Grundgebirges. Die höchsten Korrelationen finden sich für die Messstellen „Buchsschlag“, „Schweinsberg“, „Seeheim“ und „Würges“. Die Messreihe für „Buchsschlag“ (Abb. 19b) zeigt einen klassischen, zu erwartenden Trend der Absenkung des Bodens bei Absenkung des Grundwasserspiegels, durch Setzung oder Schrumpfung des Untergrunds in urbanen Gebieten (vgl. z.B. Boni u. a. 2016). Die daraus abgeleiteten Speicherkoeffizienten sind vergleichbar mit in der Literatur für Quartäre Sedimente angegebenen Werten (E. Ulmer, pers. comm. BSc.-Arbeit).

Ein Grund für die gute Korrelation von Grundwasserstand und Bodenbewegung im Bereich der Rhein-Main Region könnte sein, dass die dortigen Grundwasserleiter zum einen unverfestigte, junge Sedimente (z.B. Pleistozäne Kiese und Sande) sind und der Grundwasserflurabstand recht gering ist (Becker und Reischmann 2021). Mehr als die Hälfte der Grundwassermessstellen weisen einen Grundwasserflurabstand von ca. < 15 m auf, sind also sehr wahrscheinlich im obersten Aquifer, in direktem Kontakt zur Oberflä-

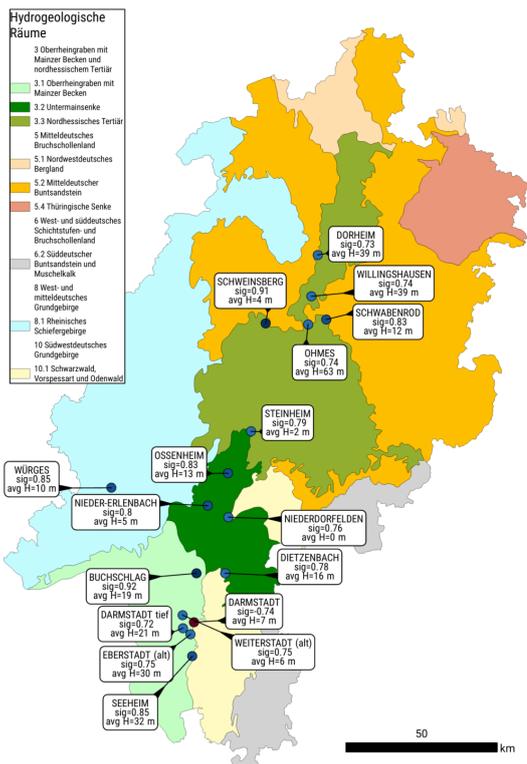


Abbildung 18: Grundwassermessstellen mit besonders starker Korrelation von Grundwasserspiegel und Bodenbewegungen in Hessen und deren Lage in den hydrogeologischen Räumen. Blaue Punkte zeigen eine positive Korrelation („sig“ im Label). Der durchschnittliche Grundwasserflurabstand ist als „avg H“ in Metern angegeben. Datenquelle: BGR 2015, Landesgrundwasserdienst Hessen und HLNUG.

che. Zum anderen sind sie durch Einschaltungen von Tonen stark untergliedert, welche ein Quell- und Schrumpfungsverhalten zeigen könnten. Weiter nördlich sind die Aquifere tieferliegend, und tendenziell eher aus dem Buntsandstein oder klüftigen Tertiären Vulkaniten gespeist. Obwohl es in dieser Region auch Brunnen mit nur wenigen Metern Grundwasserflurabstand gibt. Zur tiefergehenden Untersuchung wurde eine Bachelorarbeit ausgeschrieben, welche zum Abgabzeitpunkt dieses Berichts allerdings noch nicht abgeschlossen ist.

3.1.6 AP 23-6: Zusammenführung der Datensätze und Integration weiterer Daten

Anpassung der Zeitscheiben Um der Problematik der unterschiedlichen Zeitscheiben 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.

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 (siehe Abb. 20).

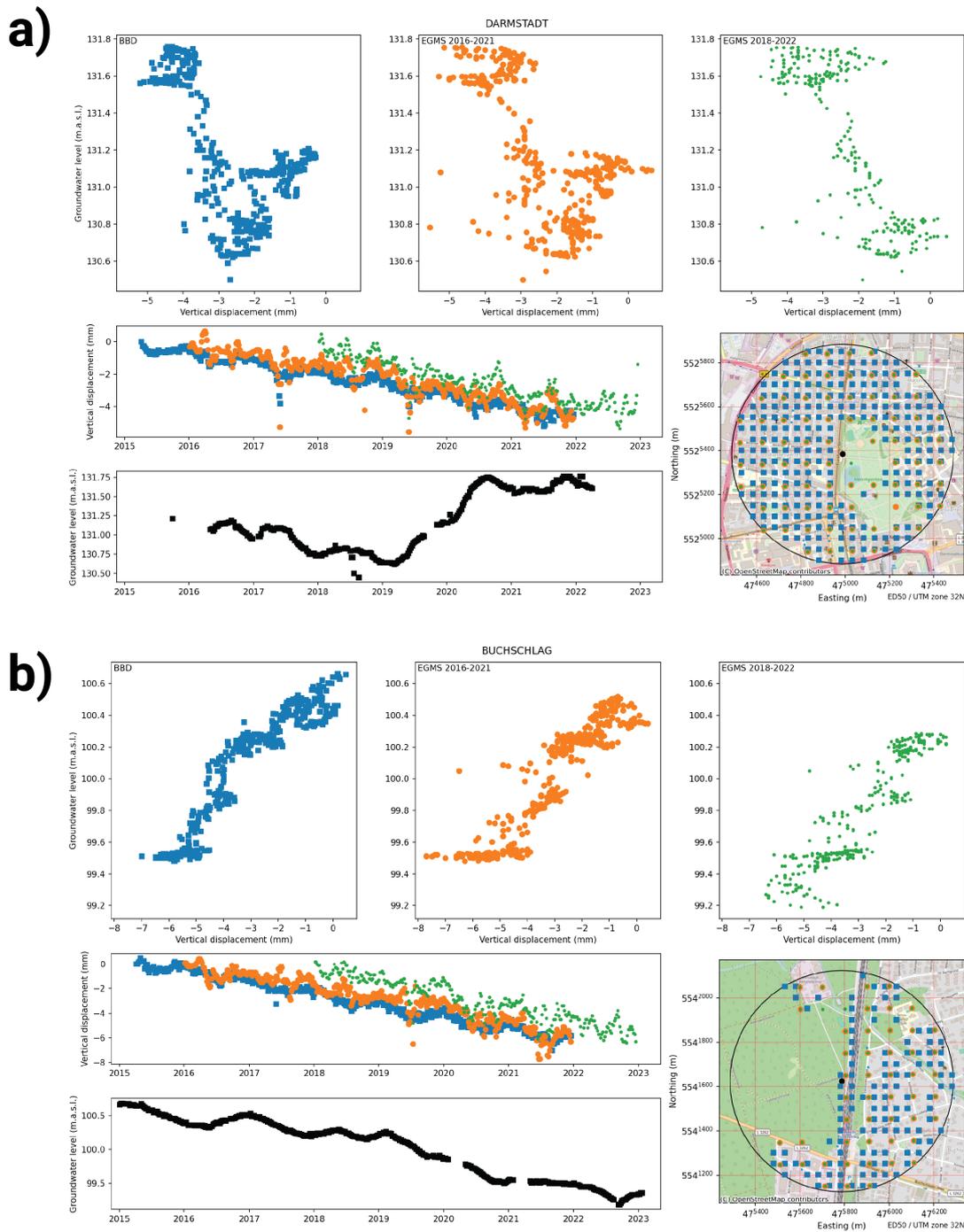


Abbildung 19: Detaillierte Aufstellung der Grundwassermessdaten und Bodenbewegungsdaten für a) Darmstadt und b) Buchschlag. Die oberste Reihe zeigt einen Vergleich aller einzelnen Messpunkte von Grundwasserspiegel im Vergleich zum vertikalen Versatz für die Datensätze BBD (blau), EGMS 2016-2021 (orange) und EGMS 2018-2022 (grün). Darunter werden jeweils die Zeitreihen der Bodenbewegung (farbig) und des Grundwasserspiegels (schwarz), sowie die Position von Messstelle und Persistent Scatterern (unten rechts) dargestellt.

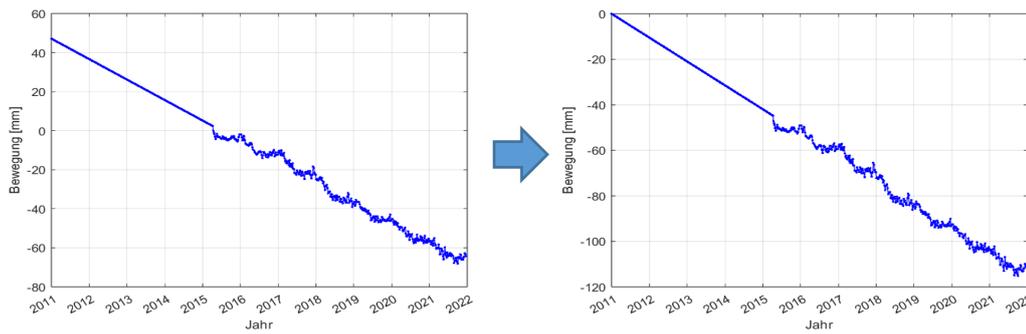


Abbildung 20: Extrapolation eines exemplarischen PS sowie Verschiebung des Referenzzeitpunktes. Messungen liegen lediglich für den Zeitraum zwischen 2015 und 2021 vor, die Gerade von 2011 bis 2015 stellt den geschätzten Verlauf vor Startpunkt der Messungen dar.

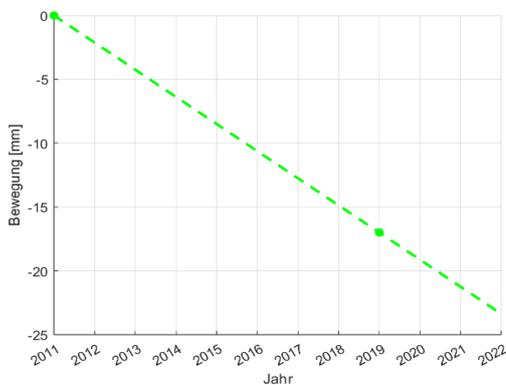


Abbildung 21: Extrapolation eines exemplarischen Pixels einer Differenzkarte: Als Punkte dargestellt sind die Zeitpunkte, zu denen die DGMs aufgezeichnet wurden, aus denen die Differenzkarten berechnet wurden. Da der Bewegungsverlauf zwischen diesen Zeitpunkten nur geschätzt wurde, wird dieser als gestrichelte Linie dargestellt.

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 Differenzkarten angewendet werden, wie die nachfolgende Abbildung zeigt. Hier dargestellt ist ein einzelnes Pixel einer Differenzkarte, 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 (siehe Abb. 21).

Bildung des Mittelwertes aus Referenzflächen Die Extraktion der Pixelwerte direkt unter den PS ist ein wichtiger Schritt bei der Fusion der beiden Datensätze, da auf diese Weise eine erste Verbindung hergestellt und überprüft werden kann, wie gut die Daten miteinander harmonieren. Allerdings repräsentieren die PS den Mittelwert der vertikalen Bewegungswerte aller Punkte, die innerhalb eines 50x50 m großen Bereichs in aufsteigender und absteigender Line of Sight (LOS) gemessen wurden. Ein Vergleich der PS mit den direkt darunter liegenden Pixeln führt daher zu einer eher geringen Übereinstimmung, da die Messpunkte nicht exakt mit den Pixeln übereinstimmen, sondern an anderen Stellen innerhalb des 50x50 m Bereichs liegen. Diese Messstandorte sind zwar bekannt, jedoch konnten sie aufgrund fehlender Zeitreiheninformationen nicht verwendet werden. Eine Lösung für dieses Problem ist, für die Pixel unter

den PS ebenfalls den Mittelwert der Pixelwerte in einem vergleichbaren Referenzbereich zu berechnen. Da das DGM1-Produkt der HVBG verwendet wurde, entspricht ein Pixel einem 1x1 m Bereich auf der Erdoberfläche. Für jedes Pixel unter den PS wird daher der Mittelwert der 49x49 benachbarten Pixel ermittelt und anschließend mit den PS-Werten verglichen.

Fusion der Datensätze Zur Optimierung der Zusammenführung der PSI-Daten und Differenzkarten wurden verschiedene Fusionsmethoden getestet (siehe Riemer u. a. (2024)). Neben der direkten Fusion wurde auch die Korrektur der Rasterdaten mit genaueren Punktwerten untersucht, basierend auf etablierten Methoden wie denen von Cao u. a. (2015) und Weigl u. a. (2004). Beide Methoden beinhalten Ansätze zur Korrektur der Rasterdaten durch Interpolation sowie zur Berechnung von Korrekturrastern oder Aneichfaktoren.

Die direkteste und erfolgversprechendste Methode war jedoch die Fusion der PSI-Daten mit den Mittelwerten der 49x49 Pixel, da diese die besten Korrelationen und eine zufriedenstellende Darstellung der Bodenbewegungen in den untersuchten Gebieten ermöglichte. Diese Methode zeigt, dass nach der Anpassung der Zeiträume beider Datensätze durch Extrapolation die Pixelwerte unter den PS sowie die Mittelwerte aus Referenzflächen effektiv genutzt werden können. So konnte direkt überprüft werden, ob die Bodenbewegungsdaten der beiden Quellen übereinstimmen.

Die Qualität der Fusion hängt dabei maßgeblich von der Wahl des Untersuchungsgebiets ab. In Bereichen mit Bodenbewegungen im Bereich von ± 15 cm, wie beispielsweise im Solarpark Dreieich, korrelieren die Daten bereits ohne weitergehende Korrekturen stark. Der Solarpark Dreieich weist mit einem r-Wert von 0,89 die höchste Korrelation mit den PS-Werten auf, wenn die Mittelwerte der 49x49 Pixel um die PS zur Fusion verwendet werden. Dies zeigt, dass bei der Fusion von PSI-Daten und Differenzkarten nur Bewegungen im Fehlertoleranzbereich zuverlässig sichtbar sind. Eine Fusion außerhalb dieses Bereichs wäre weniger präzise.

Ein weiteres Problem stellt der hohe Fehlertoleranzbereich der ersten Messkampagne dar. Dieser wird sich jedoch in Zukunft voraussichtlich verbessern, da derzeit eine dritte Befliegung von Hessen im Auftrag der HVBG durchgeführt wird. Trotz des gleichbleibenden Toleranzbereichs wird eine deutlich höhere Genauigkeit erwartet, was zu einer präziseren Darstellung kleinerer Bodenbewegungen in den Differenzkarten führen sollte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Fusion von Differenzkarten und PSI-Daten eine vielversprechende Methode zur großflächigen Detektion und Darstellung von Bodenbewegungen darstellt. Mit einer sorgfältigen Anpassung der Fusionsmethoden an die jeweiligen Gegebenheiten können qualitativ hochwertige Ergebnisse erzielt werden. Besonders mit der Bereitstellung der DGMs der dritten Messperiode wird sich die Qualität der Fusion weiter verbessern, da durch genauere ALS-Daten auch kleinere Bodenbewegungen erfasst werden können.

Integration weiterer Daten Zur Ergänzung und Verfeinerung der Bodenbewegungsanalysen wurden zusätzliche Datenquellen auf ihr Potenzial geprüft. Insbesondere standen hochaufgelöste InSAR-Daten aus den Missionen TerraSAR-X und Tandem-X im Fokus, die eine Auflösung von 0,25 bis 3 m bieten und sich für detaillierte Untersuchungen auf Gebäudeebene eignen. Diese Daten sind derzeit primär für sogenannte „Fokus-“ oder „Gefährdungsgebiete“ verfügbar und bieten eine hohe Genauigkeit, die sie zu einer wertvollen Ergänzung für spezifische Anwendungsfälle macht. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde exemplarisch nach Bildern für einige der gewählten Testregionen gesucht, darunter Kassel, Darmstadt und Frankfurt. Die Prüfung ergab jedoch, dass die verfügbaren TerraSAR-X-Daten für großflächige InSAR-Analysen nur eingeschränkt nutzbar sind. Für Kassel stehen im Zeitraum von 2015 bis 2023 lediglich sieben Bilder zur Verfügung, während Darmstadt zwar 20 Bilder umfasst, das Stadtgebiet aber teilweise fast abgeschnitten ist. Für Frankfurt am Main liegen ebenfalls 20 Bilder vor, die sich jedoch zeitlich stark auf das Jahr 2023 konzentrieren (15 Bilder) und nur wenige Aufnahmen aus dem Jahr 2015 umfassen (5 Bilder).

Diese ungleiche zeitliche Verteilung und begrenzte Bildanzahl machen TerraSAR-X-Daten ungeeignet für InSAR-Analysen.

Eine weitere Ergänzung könnten die Daten der Satellitenmission ICEYE sein. Dabei handelt es sich ebenfalls um SAR-Satelliten, die im X-Band arbeiten. ICEYE betreibt eine Konstellation von derzeit 27 Satelliten, die eine hohe Wiederholrate und eine Auflösung von bis zu 0,5 m bieten. Mithilfe einer PSI- oder SBAS-Prozessierung könnten aus diesen Daten Bodenbewegungen abgeleitet werden. Allerdings ergab eine Sichtung des Archivs, ähnlich wie bei den TerraSAR-X-Daten, zu wenige Bilder. Für Hessen lagen lediglich 8 Bilder von Darmstadt und Frankfurt am Main vor, was das Archiv ungeeignet für InSAR-Anwendungen macht.

Zusätzlich wurde das Archiv der japanischen Satellitenmission ALOS-2 geprüft. Dieser Satellit arbeitet im L-Band, das aufgrund der längeren Wellenlänge ideal für die Analyse von Bodenbewegungen in vegetationsreichen oder topografisch anspruchsvollen Gebieten ist. Allerdings speichert JAXA aus Kapazitätsgründen regelmäßig nur Bilder von Japan. Für andere Regionen der Welt, einschließlich Deutschland, werden Aufnahmen lediglich etwa einmal jährlich gespeichert. Diese niedrige zeitliche Abdeckung macht ALOS-Daten für eine kontinuierliche InSAR-Analyse ungeeignet.

Neben diesen zusätzlichen Datenquellen kann auch ein alternatives Prozessierungsverfahren zur Berechnung von Bodenbewegungen neben der PSI-Prozessierung verwendet werden. Hier wurde das Small Baseline Subset (SBAS)-Verfahren betrachtet. SBAS nutzt kürzere zeitliche Basislinien und könnte insbesondere für die Analyse großflächiger Bodenbewegungen von Vorteil sein. Während PSI in den bisherigen Analysen bereits erfolgreich angewandt wurde, bietet SBAS Potenzial für ergänzende Untersuchungen, etwa in Gebieten mit weniger homogener Datenverfügbarkeit. Die Ergebnisse der SBAS-Prozessierung sind in Kapitel 3.2.4 dargestellt.

3.1.7 AP 23-7: Implementierung in innerbehördliche Arbeitsprozesse

Die Daten aus den einzelnen Arbeitspaketen wurden in ein großes ArcGIS 2.9.12 Projekt überführt. Teilweise wurden die als GeoPackage vorliegenden Daten in eine ArcGIS-Geodatenbank importiert, die zusammen mit dem Projekt abgegeben wurde. Alle vorliegenden Daten wurden mittels dem in ArcGIS implementierten Metadateneditor mit geeigneten Metadaten und einer Beschreibung versehen und an das HLNUG übergeben.

Projekthalt Das Projekt besteht aus zwei Teilgruppen, unterteilt nach der jeweiligen Datenquelle. Als Hintergrund wurde openstreetmap und das digitale Geländemodell Hessen DGM1 verwendet. Daten die in der Geodatenbank vorliegen sind mit ^{GDB} markiert, Rasterdaten liegen als GeoTiffs vor und sind mit ^{TIFF} markiert. Die Teilgruppen und jeweiligen Daten sind:

- **Gruppe InSAR-Daten**
 - **Inversion Raster BBD 2023**^{TIFF}: Zusammengefasste Inversionsergebnisse als Rasterdaten zum einfachen Zoomen. Die Daten beinhalten Linearität, Saisonalität (Sinus+Cosinus) sowie für die niedrigste Auflösung auch maximale Saisonalität. Die Persistent Scatterer Daten wurden mittels Inversion in ihre einzelnen Komponenten zerlegt. Dies ist genauer als eine einfache lineare Geradenanpassung an die Zeitreihe. Es wird hierbei angenommen, dass die gemessenen Bodenbewegungen aus mehreren verschiedenen Komponenten bestehen. Jede dieser Komponenten wird durch eine Funktion über die Zeit dargestellt. So wird die mittlere Bodengeschwindigkeit als lineare Funktion angenommen die von jährlichen und halbjährlichen, saisonalen Schwankungen überlagert wird. Diese saisonalen Schwankungen werden als Sinus und Cosinusfunktion mit 2π und 4π als Periode angepasst. Durch das Superpositionsprinzip kann aus Sinus und Kosinus eine gemeinsame maximale Amplitude (die maximale saisonale Bewegung), sowie die Phasenverschiebung (das saisonale Maximum) bestimmt werden. Alle diese Komponenten werden zusammen als mehrdimensionale Funktion, bzw. Matrix, der sog.

Greenschen Funktion, in einem Schritt numerisch gelöst und so erhält man für jede Komponente einen passenden Wert.

- **Inversion Raster EGMS 2015 bis 2021^{TIFF}**: Wie die BBD 2023 Daten, als Grundlage dienen aber die EGMS Daten aus der Epoche von 2015 bis 2021.
- **Inversion Raster EGMS 2018 bis 2022^{TIFF}**: Wie die BBD 2023 Daten, als Grundlage dienen aber die EGMS Daten aus der Epoche von 2018 bis 2022.
- **GMA 250 m, min. 2 $\frac{mm}{a}$, max. var. 1^{TIFF}**: Ergebnisse aus der Detektion von Bodenbewegungsanomalien mittels des Ground Motion Analyzers. Die verwendeten Parameter sind: Rastergröße 250 m, minimale Geschwindigkeit von 2 $\frac{mm}{a}$, sowie eine maximale Varianz von 1 σ . Der Ground Motion Analyzer berechnet die mittlere Geschwindigkeit und Varianz der Persistent Scatterer in einem definierten Raster und generiert daraus einen Bodenbewegungsscore. Dieser Score besteht aus der summierten Geschwindigkeit und Anzahl aller aktiven Scatterer. Diese repräsentiert somit die kumulierte Bodenbewegung in einem definierten Gebiet. Dieser Score wird logarithmiert und dargestellt. Siehe auch Krzepak u. a. 2023 und Rudolf u. a. 2024a.
- **PSI-Zeitreihen BBD 2023^{GDB}**: Zeitlich angeordnete Rasterdaten aus dem Betrag der Bodenbewegung in den Persistent Scatterern des BBD Datensatzes. Der Datensatz besteht aus Rastern aus den Bewegungsbeträgen der Punktdaten die für jedes Datum im BBD Datensatz generiert wurden. So kann die Bewegung jedes PS Punktes über die Zeit dargestellt werden.
- **Active Deformation Areas, Ost-West^{GDB}**: Mittels ADAtools bestimmte Zonen aktiver Deformation in Ost-West Richtung. Hierbei wurden sowohl zeitliche, also auch räumliche Korrelation berücksichtigt. In diesem Datensatz wurden die Persistent Scatterer mit dem ADAfinder von ADAtools untersucht. Dieses Tool erfasst Gebiete mit aktiver Bewegung auf Grundlage der Geschwindigkeit, dem Abstand zu weiteren Scatterern und deren Aktivität. Die Aktivität ist hierbei nicht ausschließlich auf die Bewegungsgeschwindigkeit ausgelegt, sondern berücksichtigt auch ähnliche Bewegungsmuster. So kann neben der Festlegung als „aktiv“ und „inaktiv“ auch die Qualität der Detektion bestimmt werden. Dieser Datensatz beinhaltet die Ergebnisse für die Ost-West Komponente. Siehe auch Barra u. a. 2017.
- **Active Deformation Areas, Vertikal^{GDB}**: s.o. für die vertikale Komponente.
- **Korrelation Grundwasser PSI^{GDB}**: Um den Einfluss von Grundwasserspiegelschwankungen auf die PSI-Daten zu charakterisieren, wurden PSI-Punkte innerhalb eines 500-m-Umkreises um Grundwassermessstellen extrahiert und analysiert. Da Messzeiträume und -frequenzen unterschiedlich sind, wurden sie auf gemeinsame Zeiträume zugeschnitten und die Grundwasserstände mittels linearer Interpolation an die PSI-Messzeitpunkte ($dt = 6$ d) angepasst. Die PSI-Punkte um jede Messstelle wurden per Median zu einer Zeitreihe zusammengefasst, fehlerhafte Messungen entfernt und anschließend mit den Grundwasserständen korreliert. Pearson- (Feld `max_pearso`) und Spearman-Korrelationskoeffizienten (Feld `max_spear`) sowie p-Werte zur Signifikanzbewertung wurden berechnet. Ebenfalls wurde die Höhe über NN aus dem DEM1 (Feld `z`) und daraus der durchschnittliche Grundwasserflurabstand (Feld `avg_h`) berechnet.
- **Gruppe LiDAR-Daten**
 - **Klassifizierte Anomalien „Koubik“^{GDB}**: Anomalien die in einer früheren Version des Datensatzes im Rahmen der Masterarbeit von M. Koubik manuell klassifiziert wurden. Die Punktolokaltäten verschiedener Anomalien welche als Startpunkt für die Klassifikation weiterer Daten dient. Die Lokaltäten basieren auf einer älteren Version der gruppierten Kontouren. In diesem Datensatz sind noch verschiedene Lokaltäten weiterer Anomalien enthalten. Beim Großteil handelt es sich um noch vorhandene anthropogene Bewegungen die in der neueren Version herausgefiltert werden konnten.
 - **Klassifizierte Anomalien „gesamt“^{GDB}**: Gruppierte Bodenbewegungen im korrigierten Diffe-

renzenplan mit einer bekannten Geogefahr in der unmittelbaren Umgebung. Klassifiziert mit verschiedenen Parametern, wie beispielsweise geometrischen Eigenschaften oder Verschnitt mit externen Daten (Geologie, etc.). Der vorliegende Datensatz beinhaltet gepufferte Regionen um Gruppen starker Bodenbewegung. Diese wurden in einem vorhergehenden Schritt aus den Differenzenplänen extrahiert und anschließend aufgrund der räumlichen Nähe zusammengefasst, automatisch und manuell klassifiziert. Hierbei gibt es eine automatische Klassifikation bei der verschiedene Parameter aus den Höhenmodellen, Differenzenplänen und externem Kartenmaterial abgeleitet werden. Beispielsweise die Form der Anomalien, die durchschnittliche Steigung im Gebiet oder die in der Region vorhandenen Gesteine. Die manuelle Klassifikation erfolgte aufgrund dieser Parameter, sowie aus Karten- und Luftbildbefunden. Bei der manuellen Klassifikation kann grundsätzlich zwischen anthropogenen und natürlichen Ursachen unterschieden werden. Anthropogene Ursachen sind beispielsweise Baustellen, Steinbruchaktivität oder Deponieaktivität, aber auch Artefakte aus der Datenerhebung und -prozessierung. Artefakte können hierbei durch sehr steile Topographie entstehen, welche mit dem Laser nicht erreicht werden können oder durch Koregistrierungsfehler welche zu leichter horizontaler Verschiebung der DGMs, und somit Anomalien im Differenzenplan, führen.

- **Klassifizierte Anomalien „Geogefahren“^{GDB}**: Selber Datensatz wie „gesamt“, beinhaltet aber nur Anomale Regionen mit mindestens einer bekannten Geogefahr (Hangrutschung, Erdbeben, Karst, o.ä.).
- **Klassifizierte Anomalien „Große Bewegungen“^{GDB}**: Selber Datensatz wie „gesamt“, es wurden für diesen Datensatz nur Anomalien mit $>10000\text{m}^3$ bewegtem Material und einer Gesamtfläche über 20000m^2 berücksichtigt.
- **Kontouren der Anomalien^{GDB}**: Aus den Differenzenplänen extrahierte Regionen mit Hebung oder Senkung. Als Grenzwert wurde ein vertikaler Bewegungsbetrag von min. 50 cm gewählt. Die in diesem Datensatz vorliegenden Polygone wurden mittels Kontourierung des Differenzenplanes mit den Kontouren $+0.5$ und -0.5 m erstellt. Diese dienen im weiteren Verlauf als Grundlage für die Erstellung von Anomalen Regionen und zur Klassifikation. Bevor die Kontourierung durchgeführt wurde, wurden Regionen mit hoher Fehleranfälligkeit herausgeschnitten, zB. entlang von Straßen, Gebäuden oder Steinbrüchen. Zusätzlich zur Art der Kontour wurden auch die Fläche und Umfang der Kontour bestimmt. Ebenfalls wurden die Kontouren in einzelne Gruppen eingeteilt. Die Gruppierung basiert auf einem maximalen Abstand zueinander den die Mittelpunkte der Polygone nicht überschreiten dürfen. Dies führt im Allgemeinen zu einer guten Gruppierung von Anomalien die zu einer Region gehören, z.B. einer Baustelle.
- **Korrigierter Differenzenplan^{GDB+TIFF}**: Mosaikdatensatz aus verschiedenen Tiff Dateien. Korrigierter Differenzenplan aus dem Verschnitt von Digitalen Höhenmodellen aus 2014 und 2021. Dieser Datensatz zeigt die Differenz in den digitalen Geländemodellen des DEM 1 zwischen den Jahren 2007-2014 und 2015-2021. Die Daten wurden vom HVBG über verschiedene Dienstleister erworben. Durch unterschiedliche Flugparameter zwischen den einzelnen Befliegungen und unterschiedliche Punktdichten in den Ursprungsdaten ergeben sich Messfehler die korrigiert werden müssen. Ebenfalls gibt es Abweichungen in Kachelgrößen, Höhenbezugssystemen und Höhen Genauigkeiten in verschiedenen Teilbereichen und Epochen. Diese müssen ebenfalls korrigiert werden. Daher wurden die DGMs mittels der HOETRA2016 App in das selbe Höhenbezugssystem überführt. Teilweise ergaben sich durch die oben genannten Fehlerquellen weitere Abweichungen, die als Streifenmuster, scharfe Kanten oder Topographieabhängige Muster im fertigen Differenzenplan auffallen. Diese wurden mittels zusätzlichen, adaptiven Korrekturen manuell je nach Fall korrigiert um unrealistische Bodenbewegungen zwischen einzelnen Kacheln zu vermeiden. Somit ergibt sich nach diesen Korrekturen ein relativ einheitlicher Datensatz, welcher bis auf wenige Ausnahmen, fast frei von systematischen Fehlern oder

Artefakten aufgrund der Prozessierung ist.

3.2 Ergebnisse Projektjahr 2024

3.2.1 AP 24-1: Erstellen eines Bewegungsatlas und einer Datenbank

Klassifikation der Bewegungen Basierend auf den Befunden und berechneten Eigenschaften wurden die anomalen Regionen in verschiedene Klassen manuell eingeteilt (siehe auch Kap. 3.1.3). Die einzelnen Klassen sind im folgenden kurz vorgestellt:

Altlast: Einstürzende Gebäude (z.B. Bunkeranlagen), Senkgruben, Ruinen oder sonstige im weitesten Sinne alte, abgegangene Bauwerke.

Artefakt: Aufgrund der Datenerhebung, -prozessierung, oder -darstellung erzeugte nicht real existierende Bewegung. Häufig aufgrund von Koregistrierungsfehlern, Randeffekten oder sonstigen künstlichen Grenzen.

Aufschüttung: Allgemeine Aufschüttung von Material ohne direkt ersichtlichen Grund. Oft in Zusammenhang mit landwirtschaftlicher Tätigkeit, z.B. Bodenverbesserung (dann mit klaren Grenzen an den Grundstücksrändern).

Baustelle: Straßen- oder Gebäudebauarbeiten welche nicht ausreichend ausgeschnitten wurden.

Deponie: Lagerung von Abfall oder anderen Produkten zum Zweck der Endlagerung. Häufig auch alte, inaktive Deponien mit noch aktiver Setzungsbewegung.

Erdfall: (Kreis-)Runde negative Anomalien in Bereichen mit bekannter Aktivität.

Erosion: Negative Anomalien welche Bächen, Flüssen oder Talverläufen folgen, oft auch am Ufer von Seen oder an steilen Hängen.

Freizeitanlage: Golf-, Spiel- oder Sportplätze die nicht ausreichend ausgeschnitten wurden.

Gewässer: Flüsse, kleine Bäche, Seen oder Teiche welche nicht in den geographischen Daten eingetragen sind. Oft auch Feuchtstellen oder temporäre Seen in Mooren.

Hebung: Allgemeine Hebung ohne ersichtlichen Grund.

Industrie: Industrielle Aktivitäten, wie beispielsweise Lagerung von Waren auf Stellplätzen oder Holz im Sägewerk.

Landwirtschaft: Durch Ackerbearbeitung oder sonstige Aktivitäten entstehende Bewegungen, oft auch Silagebunker oder Lagerung von landwirtschaftlichen Produkten als Hauwerke oder Mieten auf Ackerflächen (z.B. Zuckerrüben, Heuballen)

Rutschung: Bewegung von Material talwärts entlang der Topographie. Weist im Idealfall eine Abrisskante mit negativer Bewegung und einen Ablagerungsraum mit positiver Bewegung auf.

Senkungsmulde: Nicht klar definierte Absenkung, ohne scharfe Kanten die über mehrere Grundstücke ersichtlich ist. In der Regel nur als solche klassifiziert wenn die geologischen Voraussetzungen gegeben sind.

Steinbruch: Bewegungen die durch Abbau von Locker- oder Festgestein entstehen. Häufig aufgrund mangelhafter geographischer Daten nicht ausreichend aus den Differenzenplänen ausgeschnitten, oder im Beobachtungszeitraum temporär angelegt.

Steinschlag: An besonders steilen Hängen ausgeprägte, kleine, eher zufällig entlang der Kante ausgeprägte negative Anomalien. häufig nur schlecht bestimmt.

Subsidenz: Großräumigere Absenkung oder unklare Absenkung des Bodens, generell etwas unspezifischer als *Senkungsmulde*.

Sonstiges: Anderweitige, klar als anthropogen einzustufende Anomalie. Genauere Erläuterungen im Kommentar zur Anomalie.

Unbekannt: Vergeben wenn keine der obigen Kategorien passen. Genauere Erläuterungen im Kommentar zur Anomalie.

Für jede anomale Region können bis zu drei Kategorien vergeben werden, sowie jeweils auf Unklarheiten und notwendige Untersuchungen hingewiesen werden (vgl. hierzu auch Kap. 3.1.3).

Verwendete Datensätze Der Bewegungsatlas beinhaltet mehrere reduzierte Varianten des gesamt Datensatzes:

- große Anomalien mit bewegten Volumen von $\geq 20000 \text{ m}^3$
- Anomalien mit min. einer bekannten Geogefahr: Karsterscheinung, Rutschung, Felssturz, oder Subsidenz im Umkreis von 1 km

Die Klassifikation beruht in der Rhein-Main und Werra-Kali Region auf den Ergebnissen der Masterarbeit von Michael Koubik, welche wiederum noch auf einem veraltetem Workflow basiert. Somit entsprechen die Konturen nicht exakt denen des neuen Datensatzes. Die in der Masterarbeit erstellten Klassifikationen wurden basierend auf räumlicher Überschneidung mit den neuen Konturen verglichen und allfällige mehrfach vorhandene Klassifikationen in maximal drei neue Klassen zusammengefügt. Auch entsprechen die oben genannten Kategorien nicht vollständig denen in der Masterarbeit verwendeten. Sie wurden soweit möglich in das neue Schema übersetzt.

Ergebnisse der Klassifikation In beiden Datensätzen sind die überwiegende Mehrheit der festgestellten Anomalien anthropogenen Ursprungs. Die häufigste Ursache hierbei sind Baustellen, gefolgt von Artefakten und landwirtschaftlicher Nutzung (Abb. 22 und 23). Einen erheblichen Einfluss haben Deponien und Steinbrüche, inklusive Tongruben und Kieswerke. Alle weiteren Ursachen, sowie Naturgefahren spielen eher eine untergeordnete Rolle. Lediglich im Datensatz mit bekannten Geogefahren sind auch mögliche Rutschungen und Erdfälle häufiger klassifiziert worden (Abb. 23). Dies liegt aber zumeist daran, dass die Anomalien recht klein sind und andere Ursachen nicht direkt erkennbar sind. Daher sind hier auch viele als unklar markiert.

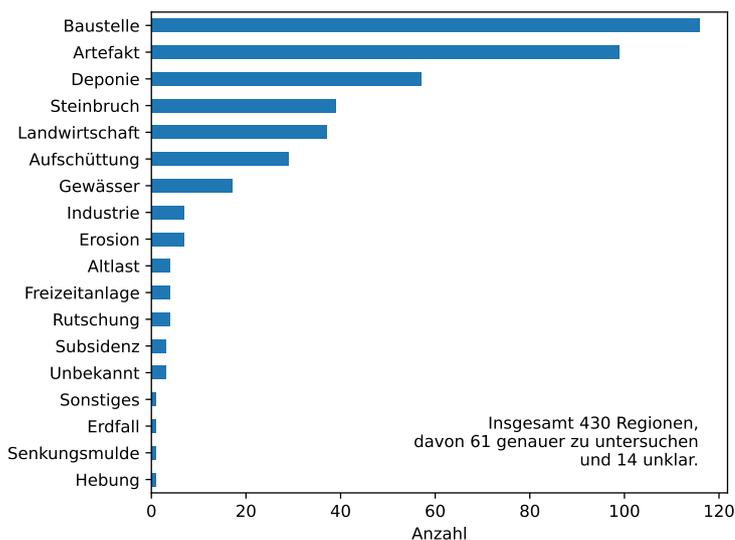


Abbildung 22: Klassifikationsverteilung für große Anomalien ($\geq 20000 \text{ m}^3$ Volumen bewegt).

Da Baustellen nur sehr selten über längere Zeit andauern, sind diese zum einen fast nie in OpenStreetMap eingetragen und zum anderen existiert von Seiten des HLNUG und HVBG keine Datenbank für Bauvorhaben. Der überwiegende Teil der als Baustelle klassifizierten Regionen sind entlang der Autobahnen zu finden. Hierbei sind sehr häufig neuangelegte Böschungen, Fahrbahn(-trassen), Brückenbauwerke oder die Lagerung von Schüttgut und Baumaterial in den Differenzenplänen deutlich zu erkennen. Diese Anomalien lassen sich nur sehr schwer aus den Differenzenplänen entfernen.

Die meisten Artefakte im Bewegungsatlas stammen aus dem Teilbereich 1 des Differenzenplans. Hier scheint es mehrere Probleme bei der Aufbereitung der Daten gegeben zu haben (siehe auch Kap. 3.1.2).

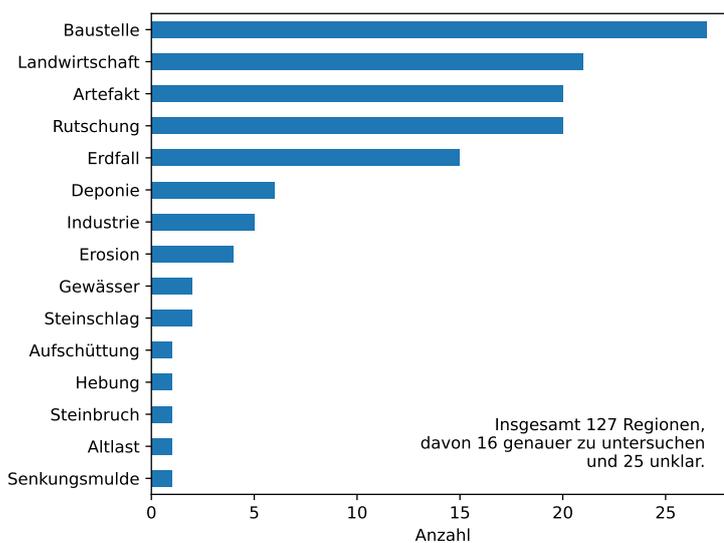


Abbildung 23: Klassifikationsverteilung für Anomalien in der Nähe von bekannten Geogefahren (max. 1 km Abstand).

Besonders gehäuft tritt hier ein Koregistrierungsfehler auf, der vor allem an nach Südosten geneigten Hängen eine Absenkung anzeigt. Auf den gegenteiligen, nach Nordwesten geneigten Hängen wird eine Hebung angezeigt. Die Beträge liegen in der Regel im geforderten Genauigkeitsbereich der DGMs und stellen dabei keinen Mangel dar. Allerdings führt dieser systematische Fehler, vor allem in Kombination mit starkem Rauschen in bewaldeten Regionen zu vielen kleinräumigen Anomalien die über größere Bereiche zu großen Regionen zusammengefasst werden. Insgesamt ergibt sich dann für diese Regionen teilweise ein so hohes bewegtes Volumen, dass sie trotzdem im fertigen Datensatz auftauchen. Die einzige Lösung besteht darin, vor der Berechnung der Differenzenpläne die DGMs nochmal zu korrigieren, beispielsweise mit geeigneten Matchingalgorithmen.

Eine Ausnahme stellen hierbei Regionen an der Grenze des Bundeslandes dar. Diese wurden ebenfalls als „Artefakt“ klassifiziert, da die Kacheln der Differenzenpläne über die Landesgrenzen hinausgehen, die verwendeten Shapes der OpenStreetMap Daten aber nicht. Daher wurden diese in den Bereichen außerhalb Hessens nicht entfernt und tauchen somit im Atlas auf. Dies lässt sich durch Entfernung aller Anomalien außerhalb des Bundeslandes lösen.

Deponien und Steinbrüche sind häufig nur unzureichend in den Daten von OpenStreetMap erfasst. Die Umrandungen basieren entweder auf veralteten Daten, oder die Aktivitäten erstrecken sich über die Grenzen des Steinbruchs hinaus. Oft handelt es sich hierbei um neu angelegte Abbruchwände oder die Abtragung von Material zur Erweiterung der Steinbrüche. An anderen Stellen werden Materialien außerhalb des Kernbereichs in großen Haufwerken gelagert und sorgen somit für Bewegung. Bei einem Teil der Deponien handelt es sich um kleine, lokale Erdaushubdeponien oder Schutthalden die nicht in OSM erfasst sind. In wenigen Fällen wird auch Erdaushub auf Brachflächen abgelagert oder entsorgt. Vor allem bei land- und forstwirtschaftlichen Betrieben kann es auch zur kurzzeitigen Lagerung von Grünschnitt kommen, die dann möglicherweise gerade im Zeitraum der Befliegung entfernt oder abgelagert wurden.

Fertigstellung des Bewegungsatlas Die klassifizierten anomalen Regionen wurden zunächst in mehrere Geopackages zusammengeführt. Für die weitere Verwendung werden diese Daten in AP 23-7 und AP 24-2 weiter verarbeitet. Darüber hinaus werden für die Datensätze, automatische Berichte generiert, die für jede anomale Region einen kurzen Steckbrief beinhalten und ebenfalls mit diesem Bericht vorliegen.

Die automatischen Berichte beinhalten neben einfachen Übersichtsbildern, auch detaillierte Informa-

tionen zu hydrogeologischen, geologischen und bodenkundlichen Verhältnissen. Des Weiteren werden die topographischen Kennwerte, wie Steigung und Einfallrichtung der Anomalien beschrieben. Diese Informationen stammen aus der zuvor erfolgten automatischen und manuellen Klassifikation (siehe auch Abs. 3.1.3).

3.2.2 AP 24-2: Öffentliche Bereitstellung über Geologie-Viewer

Die Bereitstellung über den Geologie-Viewer ist aufgrund der großen Anzahl an noch nicht klassifizierten Anomalien noch nicht erfolgt. Dies soll im Jahr 2025 vorangetrieben werden.

3.2.3 AP 24-3: Bereitstellung und Implementierung der Daten für Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter

Die Daten wurden für externe Nutzungen vorbereitet. Eine explizite Implementierung der Daten in Geo-Daten-Portalen Dritter wurde bisher noch nicht angestoßen, da noch viele Anomalien klassifiziert werden müssen. Erste Gespräche mit der Cluster II-Projektleitung der Umwelt 4.0-Maßnahme haben stattgefunden und sollen in 2025 intensiviert werden.

3.2.4 AP 24-4: Bewertung SBAS-Verfahren zur Erweiterung des Bodenbewegungsdienstes

Beschreibung des SBAS-Verfahrens Das klassische SBAS-Verfahren (Small Baseline Subset) ist eine Methode, die in der Radarinterferometrie verwendet wird, um Bodenveränderungen mit hoher Präzision zu erfassen. Der Hauptvorteil des SBAS Verfahrens liegt in der Nutzung von sogenannten „kleinen Baselines“. Das bedeutet, dass für die Analyse nur solche Bildpaare ausgewählt werden, die zeitlich und räumlich nahe beieinander liegen. Dadurch werden Fehler minimiert, die durch atmosphärische Störungen oder Veränderungen an der Erdoberfläche zwischen den Aufnahmen verursacht werden könnten. Dies führt zu genauen und zuverlässigen Ergebnissen (Li u. a. 2022). Ein wesentlicher Grund für die Überlegung, die Daten des Bodenbewegungsdienstes durch die Anwendung des SBAS Verfahrens zu erweitern, liegt in dessen Potenzial für eine höhere räumliche Abdeckung. Das vom BBD genutzte Verfahren der Persistent Scatterer Interferometrie (PSI) ist auf punktuelle und stabile Streuer angewiesen, die hauptsächlich auf Gebäuden oder anderen künstlichen Strukturen zu finden sind, was die räumliche Abdeckung an Bodenbewegungsinformationen auf urbane Gebiete begrenzt. Das SBAS Verfahren hingegen kann auch auf weniger stabile, natürliche Oberflächen angewendet werden. Während bei der PSI nur Pixel verwendet werden, die über den gesamten betrachteten Analysezeitraum stabil bleiben, betrachtet man beim SBAS-Verfahren die Veränderung pixelweise und fokussiert sich auf kürzere Zeitintervalle. Dies ermöglicht es, auch Pixel einzubeziehen, die sich über kürzere Zeiträume hinweg als stabil erweisen, ohne eine hohe langfristige Stabilität vorauszusetzen. Vom SBAS-Verfahren wird sich daher erhofft, eine dichtere räumliche Abdeckung an Bodenbewegungsinformationen zu erreichen, da es flexibler auf kurzzeitige stabile Pixel zugreift, anstatt sich ausschließlich auf stabile Streuer über längere Zeiträume zu beschränken. Als Datengrundlage dienen wie beim BBD auch Sentinel-1-Daten des Copernicus-Programms der Europäischen Union. Diese Daten sind frei verfügbar und bieten eine hohe zeitliche und räumliche Abdeckung, was sie ideal für die Anwendung des SBAS-Verfahrens macht. Die Sentinel-1-Satelliten liefern synthetische Apertur Radar (SAR)-Daten im C-Band mit einer Wiederholfrequenz von sechs Tagen (im Tandem-Modus beider Satelliten Sentinel-1A und 1B).

Auswahl einer geeigneten Testregion Die Auswahl geeigneter Testregionen war ein zentraler Schritt, um die Leistungsfähigkeit des SBAS-Verfahrens im Vergleich zur PSI-Methode zu bewerten. Zwei Regionen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Herausforderungen wurden ausgewählt:

- Ländliche Testregion: Werra-Kali-Region

Die Werra-Kali-Region ist bekannt für ihre großräumigen Bodenbewegungen im Zentimeterbereich, die wahrscheinlich durch bergbaubedingte Senkungen entstehen. Diese Region wurde gezielt ausgewählt, da sie aufgrund ihrer natürlichen und weniger stabilen Oberflächen eine ideale Grundlage bietet, um zu prüfen, ob das SBAS-Verfahren eine größere räumliche Abdeckung an Bodenbewegungsinformationen ermöglicht als PSI.

- Städtische Testregion: Frankfurt am Main

Frankfurt am Main wurde als städtische Testregion gewählt, da das Gebiet durch dichte Bebauung und ausgeprägte Bodenbewegungen geprägt ist. Besonders in der Innenstadt und im Stadtteil Frankfurt-Höchst treten diese Bewegungen auf, die bereits durch den Bodenbewegungsdienst dokumentiert wurden. Diese Region bietet eine ideale Grundlage, um die Ergebnisse des SBAS-Verfahrens mit der etablierten PSI-Methode zu vergleichen.

Verwendete Software für die SBAS-Prozessierung Für die Berechnung der Bodenbewegungen mit dem SBAS-Verfahren wurden zwei unterschiedliche Softwarelösungen verwendet: die kommerzielle Software ENVI SARscape und eine Kombination aus der Plattform ASF Vertex mit der Open-Source-Software MintPy. Beide Ansätze bieten spezifische Vorteile und erlauben die detaillierte Analyse von Bodenbewegungen, wobei sie sich in ihrer Bedienung und Flexibilität unterscheiden. ENVI SARscape stellt umfassende Werkzeuge für die Verarbeitung und Analyse von SAR-Daten bereit. Die Integration von SBAS in SARscape ermöglicht eine weitgehend automatisierte Prozessierung, die besonders für Anwender mit begrenzter Erfahrung in der Radarinterferometrie geeignet ist. Um Bodenbewegungen zu berechnen, wurden zunächst Sentinel-1-Bilddatensätze in die Software geladen. Anschließend erfolgte die Verarbeitung durch die schrittweise Ausführung spezifischer Funktionen, darunter Connection Graph, Interferometric Process, Inversion: First Step, Inversion: Second Step und abschließend Geocoding. Ein zentraler Aspekt der Analyse war die Möglichkeit, den Coherence Threshold anzupassen. Mit diesem Parameter wird bestimmt, welche Pixel anhand ihrer Kohärenz in die Berechnung einbezogen werden. Ein niedrigerer Coherence Threshold erlaubt die Einbeziehung weniger kohärenter Pixel, was potenziell die räumliche Abdeckung erhöhen kann, während ein höherer Threshold eine präzisere, aber räumlich begrenztere Analyse liefert. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Threshold-Werte getestet, um den Einfluss auf die Ergebnisse zu bewerten. Dies ermöglichte es, die räumliche Abdeckung gezielt zu optimieren und zu untersuchen, wie das SBAS-Verfahren auf unterschiedliche Kohärenzbedingungen reagiert. Ein Nachteil von SARscape zeigte sich bei der Bearbeitungszeit: Die Berechnung von ca. 30 Sentinel-1-Bildern konnte bis zu eine Woche in Anspruch nehmen. Dies begrenzte die Analyse auf relativ kurze Zeitreihen und erschwerte die Untersuchung von Langzeittrends. Der zweite Ansatz kombinierte ASF Vertex, eine cloudbasierte Plattform des Alaska Satellite Facility (ASF), mit MintPy (Miami INsar Time-series software in PYthon). ASF Vertex erlaubt die einfache Auswahl und automatische Verarbeitung von Sentinel-1-Daten zu Interferogrammen, die dann für die SBAS-Analyse verwendet werden können. Diese Plattform eignet sich besonders, da die Interferogrammerstellung On-Demand erfolgt und keine leistungsstarke lokale Recheninfrastruktur benötigt wird. Die generierten Interferogramme wurden über eine Schnittstelle in das Open Science Lab von ASF übertragen, wo sie mit MintPy weiterverarbeitet wurden. MintPy ist eine spezialisierte Open-Source-Software für die SBAS-Analyse. Mit MintPy wurden die Interferogramme zu konsistenten Zeitserien von Bodenbewegungen verarbeitet. Diese Kombination aus ASF Vertex und MintPy erforderte mehr manuellen Eingriff und eine detaillierte Kenntnis der Prozessparameter, bot jedoch eine hohe Flexibilität und die Möglichkeit, einzelne Verarbeitungsschritte gezielt zu beeinflussen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Lösung war die deutlich schnellere Rechenzeit: Während die Verarbeitung mit SARscape mehrere Tage bis eine Woche beanspruchte, konnten mit ASF Vertex und MintPy Zeitserien über mehrere Jahre innerhalb eines Tages berechnet werden. Dies ermöglichte eine effizientere Analyse längerer Zeiträume und trug dazu bei, Langzeittrends der Bodenbewegungen besser zu verstehen. Allerdings traten bei diesem Ansatz im Verlauf des Projekts Einschränkungen auf: Aus Budgetgründen wurde der Zugang zum Open Science Lab

begrenzt, sodass ein freier Zugang nicht mehr möglich war. Aktuell steht das Open Science Lab nur noch gegen Bezahlung zur Verfügung, und der Zugang ist auf festgelegte Zeiträume beschränkt. Dies stellt ein Hindernis für die kontinuierliche Nutzung dieser Methode dar. Für zukünftige Projekte müsste daher entweder ein Budget für den Zugang bereitgestellt oder nach einer alternativen Plattform gesucht werden, die eine kostenfreie SBAS-Prozessierung zur Verfügung stellt.

Auswertung der Einsatzmöglichkeit des SBAS Verfahrens

Vergleich verschiedener Kohärenz-Schwellwerte Die Anpassung des Kohärenz-Schwellwerts bietet die Möglichkeit, mit dem SBAS-Verfahren eine größere räumliche Abdeckung an Bodenbewegungsinformationen zu erzielen. Der Schwellwert legt fest, welche Pixel in die Verarbeitung einbezogen werden. Durch eine Absenkung dieses Wertes können auch Pixel berücksichtigt werden, die zwischen den Aufnahmezeitpunkten eine geringere Ähnlichkeit aufweisen. Dies ermöglicht es beispielsweise, Vegetationsbereiche in die Analyse einzubeziehen, die beim BBD aufgrund unzureichender Kohärenz ausgeschlossen würden. Allerdings bringt eine geringere Kohärenz auch potenzielle Nachteile mit sich. Weniger kohärente Pixel können zu verstärktem Rauschen in den Daten führen. Zudem beeinflussen die benachbarten Pixel die Berechnung jedes einzelnen Punktes. Wird ein niedrigerer Schwellwert verwendet, können die weniger stabilen Pixel die Genauigkeit der umliegenden stabileren Pixel beeinträchtigen, die bei einem höheren Threshold präzisere Ergebnisse geliefert hätten. Es gilt daher, den Schwellwert sorgfältig zu wählen, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Abdeckung und Datenqualität zu gewährleisten. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer SBAS-Prozessierung mit ENVI SARscape für einen kleinen Bildausschnitt über dem hessischen Crumstadt mit einem Vergleich verschiedener Kohärenz-Schwellwerte für den Zeitraum von Juli 2020 bis Februar 2021 (8 Monate):

Abb. 24 zeigt, dass mit sinkendem Kohärenz-Schwellwert die räumliche Abdeckung zunimmt. Gleichzeitig verändern sich jedoch die ermittelten Bewegungsmuster. Ein Kohärenz-Schwellwert von 0,3 führt zu einer räumlichen Abdeckung, die der des BBD ähnelt, da überwiegend bebaute Gebiete mit stabilen Pixeln berücksichtigt werden. Die ermittelten Bodenbewegungswerte entsprechen in diesem Fall weitgehend denen des BBD für den gleichen Zeitraum. Sinkt der Schwellwert weiter, werden zunehmend Vegetationsbereiche in die Prozessierung einbezogen. Diese Bereiche zeigen jedoch häufig heterogene Bewegungsmuster. Zudem wird deutlich, dass sich die ermittelten Bodenbewegungswerte mit dem Kohärenz-Schwellwert ändern, wie in Abb. 25 zu erkennen ist.

Abb. 25 verdeutlicht den Verlauf der Zeitreihe desselben Pixels, das in zwei SBAS-Prozessierungen mit unterschiedlichen Kohärenz-Schwellwerten enthalten ist. Dabei zeigen sich Unterschiede im Verlauf der Zeitreihe je nach gewähltem Schwellwert. Dies liegt daran, dass bei niedrigeren Schwellwerten Pixel, die zuvor aufgrund unzureichender Kohärenz ausgeschlossen wurden, benachbarte Pixel beeinflussen. Dies führt zu einem erhöhten Rauschen in den Daten. Deshalb ist es essenziell, den Kohärenz-Schwellwert sorgfältig abzuwägen, um eine Balance zwischen einer erweiterten räumlichen Abdeckung und der Wahrung der Datenqualität zu finden.

SBAS-Prozessierung mit ENVI SARscape Wie bereits im vorangegangenen Kapitel diskutiert, erfordert die Wahl des Kohärenz-Schwellwerts bei der SBAS-Prozessierung eine sorgfältige Abwägung zwischen räumlicher Abdeckung und Genauigkeit der Ergebnisse. Ein niedrigerer Schwellwert ermöglicht es, mehr Bereiche in die Analyse einzubeziehen, birgt jedoch das Risiko einer erhöhten Datenunsicherheit durch Rauschen. Für die im Folgenden beschriebene SBAS-Prozessierung wurde daher ein Kohärenz-Schwellwert von 0,2 gewählt, um eine größere räumliche Abdeckung in den festgelegten Testregionen zu erreichen. Dieser Wert liegt unterhalb des von ENVI SARscape empfohlenen Standardschwellwerts von 0,3, ermöglicht jedoch die Einbeziehung auch weniger kohärenter Pixel, ohne zu starkes Rauschen in die Daten

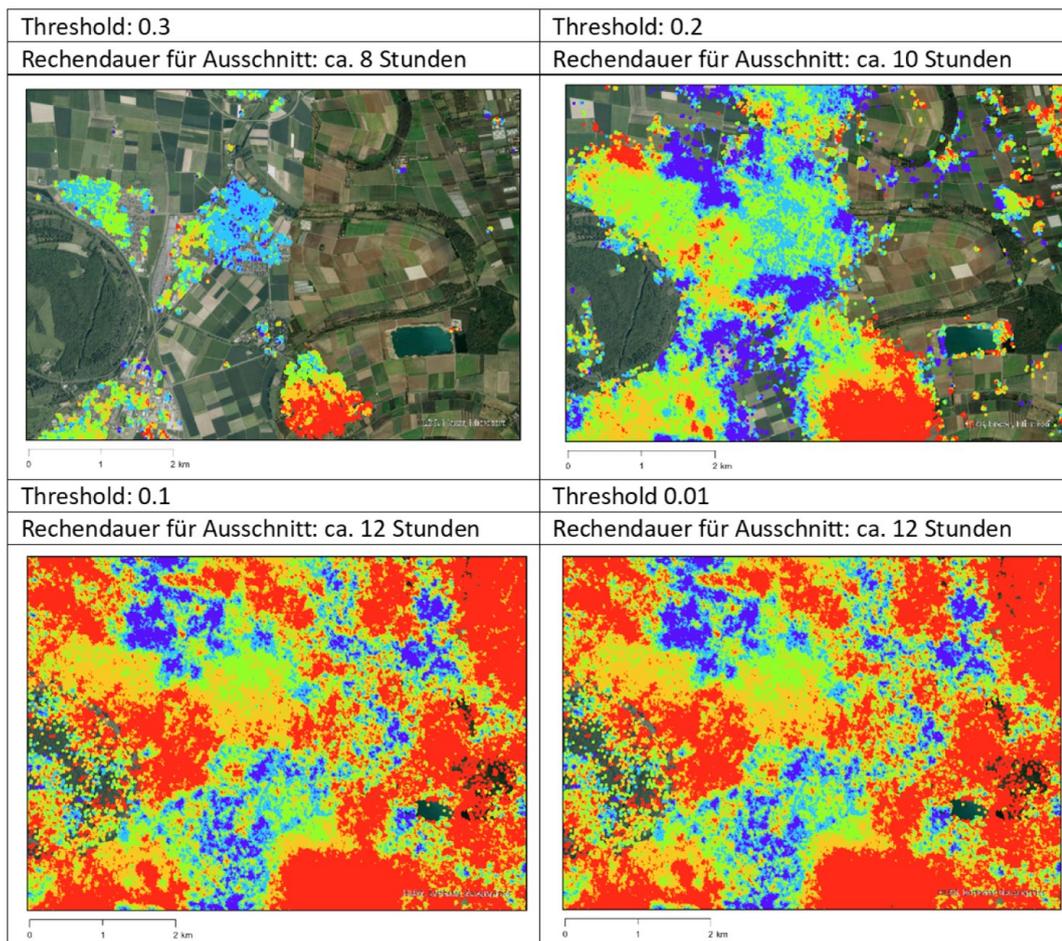


Abbildung 24: Für den Bereich Crumstadt wurde das SBAS Verfahren mit vier verschiedenen Kohärenz-Schwellwerten berechnet. Je nach gewähltem Schwellwert verändert sich die räumliche Abdeckung der Bodenbewegungsinformationen.

zu bringen. Die folgenden Abbildungen (26b und d) zeigen die mit dem SBAS-Verfahren berechneten Bodenbewegungen für die Region Werra-Kali und für den Großraum Frankfurt am Main.

Bei der Betrachtung fällt auf, dass vor allem in der Werra-Kali-Region ein heterogenes Muster im Vergleich zum BBD entstanden ist und viele Pixel extreme Bodenbewegungen aufzuweisen scheinen. Die Abbildung von Frankfurt hingegen ähnelt dem Bodenbewegungsmuster beim BBD (Abb. 26a und c). Beim BBD weisen die beiden Testregionen größtenteils stabile Bereiche auf, während einzelne Bereiche starke Setzungen aufweisen. Im Fall der Region Werra-Kali (siehe Abb. 26d) zeigen die Ortskerne, ähnlich wie beim Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD), überwiegend stabile Bereiche. Je weiter jedoch die Auswertung in außerörtliche Gebiete reicht, desto heterogenere Muster mit einer Vielzahl extremer Werte sind zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass in den unbebauten Ortsrandbereichen viele Pixel mit niedriger Kohärenz in die Analyse einbezogen wurden. Diese können wiederum auch benachbarte Pixel in den bebauten Ortsrandbereichen beeinflussen, was zu einer Verschlechterung der Datenqualität führt. Innerhalb der Ortskerne hingegen sind die Ergebnisse stabiler, da die Kohärenz der Pixel hier höher ist.

Im Fall der Stadt Frankfurt am Main (siehe Abb. 26b) und deren Umland ist ein homogeneres Bodenbewegungsmuster zu erkennen. Man sieht auch eine Setzung im Bereich Frankfurt Höchst, die auch bei den BBD-Daten gut sichtbar ist. Allerdings sind auch hier gerade in Randbereichen, bei denen es sich wahrscheinlich schon um Vegetation handelt, einige Extremwerte sichtbar. Da das Gebiet allerdings

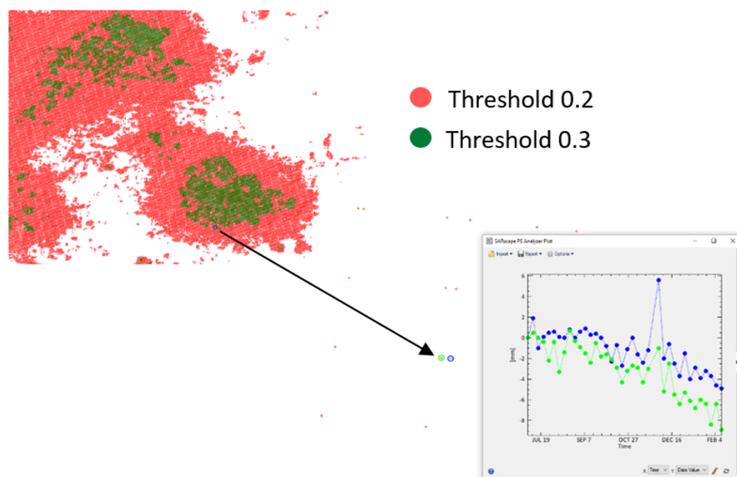


Abbildung 25: Rot: Berechnete Bodenbewegungen mit einem Kohärenz-Schwellwert von 0,2. Grün: Kohärenz-Schwellwert von 0,3. Je niedriger der Schwellwert gewählt wird, desto höher ist die räumliche Abdeckung. Allerdings verändert sich die Bewegungszeitreihe für ein Pixel, das bei beiden Schwellwerten einbezogen wird.

im Gegensatz zur Werra-Kali-Region dicht bebaut ist, wurden weniger Vegetationsbereiche in die SBAS-Prozessierung einbezogen, was letztendlich auch zu dem homogeneren Muster führt. Was bei beiden Regionen aber deutlich wird, ist dass Waldgebiete nicht mit dem SBAS-Verfahren prozessiert werden können, da die Kohärenz dort einfach zu niedrig ist.

Um die Ergebnisse der Bodenbewegungen, die mit beiden Verfahren - SBAS und PSI - berechnet wurden, zu vergleichen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson bestimmt. Der Pearson-Korrelationskoeffizient ist ein statistisches Maß, das die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen beschreibt. Werte des Korrelationskoeffizienten r können zwischen -1 und $+1$ liegen. Ein Wert von $r = 1$ zeigt eine perfekte positive Korrelation an, das heißt, beide Datensätze steigen oder fallen gemeinsam. $r = -1$ weist auf eine perfekte negative Korrelation hin, wobei einer der Datensätze steigt, während der andere fällt. Ein Wert nahe 0 deutet darauf hin, dass kein linearer Zusammenhang besteht.

Im Fall der Region Werra-Kali beträgt der r -Wert lediglich 0,2, was auf eine sehr geringe Übereinstimmung der berechneten Bodenbewegungswerte hinweist. Gleiches gilt für den r -Wert der Region Frankfurt am Main, der ebenfalls 0,2 beträgt. Für die Berechnung wurden die jeweiligen Pixelwerte der SBAS-Ergebnisse mit denen des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (PSI-Ergebnisse) verglichen.

Es ist wichtig anzumerken, dass die mittleren Geschwindigkeiten der Bodenbewegungen auf unterschiedliche Zeiträume bezogen sind. Mit ENVI konnten aufgrund der langen Rechenzeiten und des hohen Speicherbedarfs nur Sentinel-1-Daten für einen Zeitraum von einem Jahr verarbeitet werden. Für die SBAS-Analyse wurden daher Bodenbewegungen zwischen April 2015 und April 2016 - also dem Beginn der Sentinel-1-Mission - betrachtet. Im Gegensatz dazu decken die Ergebnisse des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) den Zeitraum von April 2015 bis Dezember 2021 ab. Trotz dieser Unterschiede ist ein Vergleich der mittleren jährlichen Geschwindigkeiten sinnvoll, da die Bodenbewegungen in den beiden Regionen überwiegend linear verlaufen. Unter der Annahme eines konstanten Bewegungsverhaltens über die Jahre hinweg sollte die mittlere jährliche Geschwindigkeit aus der SBAS-Analyse mit der mittleren Geschwindigkeit des längeren Zeitraums des BBD vergleichbar sein. Diese Annahme wird zusätzlich durch die großflächige und gleichmäßige Senkungscharakteristik im Untersuchungsgebiet gestützt. Die Berechnung von Bodenbewegungen mit dem SBAS-Verfahren in ENVI SARscape kann zwar eine höhere räumliche Abdeckung ermöglichen, insbesondere durch die Reduzierung des Kohärenzschwellwertes. Allerdings zeigt sich, dass ein herabgesetzter Schwellwert insbesondere in Randbereichen von Ortschaften zu einem

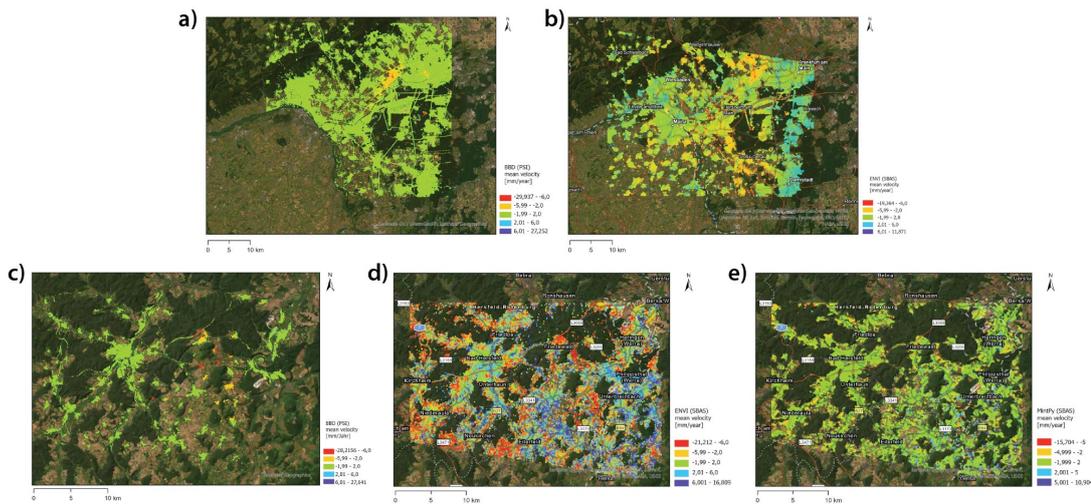


Abbildung 26: Vergleich von BBD und SBAS Daten. a) Mittels PSI berechnete Bodenbewegungen im Großraum Frankfurt am Main vom BBD. b) Ergebnis der SBAS-Prozessierung für den Großraum Frankfurt am Main. Die Abbildung zeigt die mittlere Geschwindigkeit in descending LOS über den Zeitraum April 2015 bis April 2016. c) Mittels PSI berechnete Bodenbewegungen in der Region Werra-Kali vom BBD. d) Ergebnis der SBAS Prozessierung mit ENVI SARscape für den Bereich Werra-Kali. Die Abbildung zeigt die mittlere Geschwindigkeit in descending LOS über den Zeitraum von April 2015 bis April 2016. Die Farbskala wurde analog zur BBD Skala so gewählt, dass stabile Gebiete grün sind (Bewegungen zwischen 2 und -2 mm pro Jahr), starke Setzungen rot und starke Hebungen blau. e) Ergebnis der SBAS-Prozessierung mit ASF Vertex und MintPy für die Region Werra-Kali.

erhöhten Rauschen und zu teils unplausiblen Werten führt. Aus diesem Grund wird es als nicht sinnvoll erachtet, den Kohärenzschwellwert weiter abzusenken, da dies die Datenqualität erheblich beeinträchtigt.

SBAS-Prozessierung mit ASF Vertex und MintPy Die Ergebnisse der SBAS-Prozessierung mit MintPy zeigen ein deutlich homogeneres Ergebnis, das rein optisch besser zum Bewegungsmuster beim BBD passt (siehe Abb. 26e). Auch in diesem Fall ist zu den Ortsrändern hin teilweise das Auftauchen extremer Bewegungen im Vergleich zum BBD-Ergebnis sichtbar. Dennoch passt das optische Erscheinungsbild der berechneten Bodenbewegungen deutlich besser zu den beim BBD detektierten Bewegungen als das ENVI SARscape-Ergebnis. Eine Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen den Bodenbewegungen, die aus der SBAS-Prozessierung mit MintPy und der PSI-Prozessierung des BBD resultieren, ergibt jedoch einen r-Wert von 0,1.

Das Gebiet um Frankfurt am Main konnte aufgrund der Zugriffsbeschränkungen auf das OpenSARLab der AFS nicht mit MintPy neu prozessiert werden.

3.2.5 AP 24-5: Erstellung einer Webseite

Erstellung einer Projekthomepage Es wurde eine Webseite zu Bodenbewegungen und zum Umwelt 4.0 Cluster I - Projekt erfolgreich erstellt. Nach Freigabe wurden die Inhalte im Dezember 2024 veröffentlicht. Zu erreichen ist die Webseite unter folgender URL:

<https://www.hlnug.de/themen/geologie/georisiko-und-ingenieurgeologie/bodenbewegungen>

Die Webseite besteht aus mehreren Segmenten. Zuerst erfolgt eine allgemeine Einführung zum Thema Bodenbewegungen und deren Erfassung mittels Methoden der Fernerkundung. Danach wird das Umwelt 4.0 Cluster I - Projekt vorgestellt. Durch aufklappbare Seitenelemente getrennt werden die Entwicklungen

HESSEN
 Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Arbeitsblätter | English | Impressum | Downloads | Kontakt | Barrierefreiheit | Suchen

THEMEN | MASSWERTE | PUBLIKATIONEN | ÜBER UNS | PRESSE

Themen > Geologie > Geologie und Ingenieurgeologie > **Bodenbewegungen**

Geologie

- Altstein
- Boden in Hessen
- Geologie und Ingenieurgeologie
- Geologische Massenerosionsgefahren (Waldschäden und Privatsiedlungen)
- Geotechnische Langzeitrisikoprüfungen nach DIN 10261
- Grübeln und Erdbebenrisiko (Steinlagerung) (aktuell)
- Erdebebengeographische Schichten
- Technischer Hochwasseranlasser: Hochwasser bei Gebäuden und Anlagen

Bodenbewegungen

- Bodenrisiko
- Bodenrisiko / Dürreernte
- Düngegefahren
- Erdebebenrisiko
- Erdebebenrisiko
- Geotechnik
- Grünwasseranlasser, Risiko
- Landesplanung
- Hochrisiko
- Hydrogeologie
- Nutzung der Geologie
- Risikoprüfung und -bewertung

Bodenbewegungen

Die Projektierung von großflächigen Bodenbewegungen und die damit verbundene Unsicherheitsbewertung sind wichtiger Bestandteil der Arbeit eines geologischen Dienstes. Im beruflichen Programm werden Sie nachfolgend, neben anderen wesentlichen Datenquellen, vornehmlich mit und analysiert werden. Die Projektierung, insbesondere die Risikoanalyse, ist ein sehr komplexer und vielfach interdisziplinärer Prozess. Die Übertragung von Bodenbewegungen von den räumlichen Daten der Geländemodellierung in ein geotechnisches Modell ist ein wichtiger Schritt in der digitalen Geländemodellierung und ermöglicht eine bessere Bewertung der Bodenbewegungen. Im Projekt wird ein digitaler Geländemodell erstellt und angepasst, um die räumliche Übertragung von Bodenbewegungen in ein geotechnisches Modell zu ermöglichen. Im Projekt wird ein digitaler Geländemodell erstellt und angepasst, um die räumliche Übertragung von Bodenbewegungen in ein geotechnisches Modell zu ermöglichen.

Projekt: Digitalisierungsmaßnahme „Umwelt 4.0“ – Cluster I: Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten

Im Zuge der Digitalisierungsmaßnahme „Umwelt 4.0“ soll im Cluster I Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten für die Bewertung von großflächigen Bodenrisiken und anfallenden Risiken im Bereich der Landesplanung und der Risikoanalyse am HLNUG der Nutzung der Daten aus Copernicus, Daten der Höhenmessung (Bodenbewegungen) im Bereich I) zur Verfügung in ein geotechnisches Landesmodell und die Digitalisierung von Daten in ein geotechnisches Landesmodell. Das Projekt dient der Digitalisierung von Daten und der Digitalisierung von Daten in ein geotechnisches Landesmodell. Das Projekt dient der Digitalisierung von Daten und der Digitalisierung von Daten in ein geotechnisches Landesmodell. Das Projekt dient der Digitalisierung von Daten und der Digitalisierung von Daten in ein geotechnisches Landesmodell.

Ziele

Die Nutzung von digitalen Geländemodellen oder Vermessungsgeworbenen „Differenzialdaten“ ist ein wichtiger Bestandteil der Arbeit eines geologischen Dienstes und ermöglicht eine bessere Bewertung der Bodenbewegungen. Im Projekt wird ein digitaler Geländemodell erstellt und angepasst, um die räumliche Übertragung von Bodenbewegungen in ein geotechnisches Modell zu ermöglichen. Das Projekt dient der Digitalisierung von Daten und der Digitalisierung von Daten in ein geotechnisches Landesmodell.

Das Projekt wird durch die Bundesministerien für Digitalisierung und Innovationen (BMDI) gefördert.

Entwicklungen

Nachfolgend finden Sie einige Entwicklungen, die innerhalb des Programms realisiert sind.

- † Datenbearbeitung
- † Risikoanalyse
- † Zeitreihen
- † Hot-Spot-Detektion
- † Arbeitsablauf
- † Differenzialdaten
- † Zeitreihenanalysen
- † Datenauswertung
- † Ausblick

KONTAKT

Dr. Benjamin Hummel
 Tel: 0611 6593 303

VERÖFFENTLICHUNGEN

Hummel, B., Kopp, M., Radtke, M., Hensel, D., Hensel, D. (2021): Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Detektion und Identifikation von Bodenbewegungen in Hessen in: Z. für Geotechnik, Geotechnik und Landmanagement, doi:10.1007/s11069-021-0453-2

Radtke, M., Kopp, M., Hummel, B., Hensel, D., Hensel, D. (2021): Identifikation und Analyse von Erdsenkungen, Ground Movements in Urban and Rural Areas Using Precision Radars for Monitoring in Southern Hesse, Germany in: IAGLR Journal of Earthquake Engineering and Earthquake Engineering, doi:10.1007/978-98-1-10-1111-1_11

Kopp, M., Radtke, M., Hummel, B., Hensel, D., Hensel, D. (2021): "Radar-Regeneration of Ground Motion Time Series and Automated Hot Spot Detections" 2021 Joint Urban Remote Sensing Event (URUS), Hesse, Germany, 2021, pp. 1-6, doi:10.1109/URUS49786.2021.9711111

PROJEKTBEREICHTE

Umweltministerium, 1. Projektjahr 2022

Umweltministerium, 2. und 3. Projektjahr 2023/2024

VORTRÄGE/POSTER

- 2021 Jahrestagung 2021
- 2021 General Assembly 2021
- 2021 National Forum für Fernerkundung und Copernicus 2021
- 2021 Workshop 2021
- URUS 2021
- 2021 General Assembly 2021
- 2021 Jahrestagung 2021
- 2021 Workshop 2021

Abbildung 27: Webseite zum Thema Bodenbewegungen

3.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus erster und zweiter Projektphase wurden auf Tagungen und in verschiedenen Publikationen der wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorgestellt. In Krzepek u. a. 2023 wurden die Grundlagen des Ground-Motion-Analyzer aus der ersten Projektphase in 2022 vorgestellt. In Rudolf u. a. 2024a wurden die daraus folgenden Ergebnisse, vor allem im Rhein-Main Gebiet, detaillierter untersucht. Diese wurden auch auf der EGU 2024 als Poster präsentiert (Rudolf u. a. 2024b). Die Ergebnisse der Fusion von Raster- und Punktdaten wurden auf der Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF von Riemer u. a. 2024 vorgestellt. Darüber hinaus wird in Kürze eine weitere Publikation zum Gesamtprojekt von Homuth u. a. 2025 in der zfv erscheinen.

4 Ausblick

Die bisher erreichten Ziele und Ergebnisse bieten eine gute Grundlage um zum einen die Detektion und Klassifikation der Bodenbewegungen zu verbessern und zum anderen weitere Anwendungsgebiete der Methoden zu erschließen.

Im bisherigen Projekt wurden tausende potenzielle Bodenbewegungen in Hessen identifiziert, wobei aufgrund der hohen Anzahl nur ein Teil manuell überprüft werden konnte. Der Fokus lag bisher auf Gebieten mit bekannter Gefährdung, jedoch bleiben viele auffällige Bewegungsgebiete unklassifiziert. Die Klassifikation aller Anomalien könnte sowohl manuell für prägnante Anomalien als auch mithilfe von KI-gestützten Bildanalyseverfahren erfolgen. Dabei bieten sich vortrainierte Modelle zur Objekterkennung und zusätzliche flächige Datensätze wie multispektrale Luftbilder und Bodenbedeckungsdaten als mögliche Erweiterungen an.

Die Datendichte von InSAR-Messungen im ländlichen Raum ist nach wie vor ein großes Problem. Um diese zu erhöhen, sollte intensiver das SBAS-Verfahren mit unterschiedlichen Prozessierungsarten getestet werden. So könnten Bodenbewegungen für längere Zeiträume und abseits urbaner Gebiete erfasst werden.

In einem weiteren Schritt könnten die Nutzbarkeit der vorliegenden Daten für weitere Anwendungsfälle geprüft werden, z. B. zur Überwachung von Setzungen bei Deponien oder zur Verifizierung von Abbau- und Einlagerungsmengen in Steinbrüchen. Neue Differenzenpläne und InSAR-Daten aus weiteren Epochen, könnten zudem zur Gefahrenvorwarnung beitragen, indem mögliche Beschleunigungen oder Verlangsamungen von Hebungen und Senkungen erkennbar werden. Auch alternative Visualisierungsformen wie 3D-Ansichten und Augmented Reality könnten erprobt werden, um die Ergebnisse anschaulich darzustellen und neue Nutzergruppen zu erreichen.

Literatur

- Barra, Anna u. a. (Sep. 2017). „A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images“. In: *Remote Sensing* 9.10, S. 1002. ISSN: 2072-4292. DOI: [↪10.3390/rs9101002](https://doi.org/10.3390/rs9101002).
- Becker, Roland und Thomas Reischmann (2021). *Geologie von Hessen. Mit 300 Abbildungen, 2 Tafeln und 42 Tabellen*. Hrsg. von Umwelt und Geologie (HLNUG) Hessisches Landesamt für Naturschutz. Description based on publisher supplied metadata and other sources. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 1724 S. ISBN: 978-3-510-65442-0.
- Bevis, Michael und Abel Brown (Jan. 2014). „Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy“. In: *Journal of Geodesy* 88.3, S. 283–311. DOI: [↪10.1007/s00190-013-0685-5](https://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5).
- BGR (2015). *Hydrogeologische Großräume und Räume in Deutschland*. URL: <https://www.bgr.bund.de/hyraum>.
- Boni, R. u. a. (Sep. 2016). „Characterisation of hydraulic head changes and aquifer properties in the London Basin using Persistent Scatterer Interferometry ground motion data“. In: *Journal of Hydrology* 540, S. 835–849. ISSN: 0022-1694. DOI: [↪10.1016/j.jhydrol.2016.06.068](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.068).
- Cao, Guangzhen u. a. (2015). „Generation of daily snow depth from multi-source satellite images and in situ observations“. In: *Journal of Geographical Sciences* 25, S. 1235–1246. DOI: [↪10.1007/s11442-015-1230-7](https://doi.org/10.1007/s11442-015-1230-7).
- Costantini, Mario u. a. (Juli 2021). „European Ground Motion Service (EGMS)“. In: *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. IEEE. DOI: [↪10.1109/igarss47720.2021.9553562](https://doi.org/10.1109/igarss47720.2021.9553562).
- Even, Markus, Malte Westerhaus und Hansjörg Kutterer (Feb. 2024). „German and European Ground Motion Service: a Comparison“. In: *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 92.3, S. 253–270. ISSN: 2512-2819. DOI: [↪10.1007/s41064-024-00273-3](https://doi.org/10.1007/s41064-024-00273-3).
- Homuth, B. u. a. (2025). „Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Detektion und Interpretation von Bodenbewegungen in Hessen“. In: *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 1/2025, S. 53–60. DOI: [↪10.12902/zfv-0493-2024](https://doi.org/10.12902/zfv-0493-2024).
- Kalia, Andre, Michaela Frei und Lege Thomas (2021). „BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform“. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, S. 273–279. ISSN: 1618-8950. DOI: [↪10.12902/zfv-0365-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0365-2021).
- Krzepek, Katrin u. a. (2023). „Raster Representation of Ground Motion Service Data and Automated Hot-Spot Detection“. In: *2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–4. ISBN: 978-1-6654-9373-4. DOI: [↪10.1109/JURSE57346.2023.10144217](https://doi.org/10.1109/JURSE57346.2023.10144217).
- Li, Shaowei, Wenbin Xu und Zhiwei Li (2022). „Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges“. In: *Geodesy and Geodynamics* 13.2, S. 114–126. DOI: [↪10.1016/j.geog.2021.09.007](https://doi.org/10.1016/j.geog.2021.09.007).
- Metzger, S. u. a. (Nov. 2012). „Present kinematics of the Tjornes Fracture Zone, North Iceland, from campaign and continuous GPS measurements“. In: *Geophysical Journal International* 192.2, S. 441–455. DOI: [↪10.1093/gji/ggs032](https://doi.org/10.1093/gji/ggs032).
- Navarro, J. A. u. a. (Okt. 2020). „ADAtools: Automatic Detection and Classification of Active Deformation Areas from PSI Displacement Maps“. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.10, S. 584. ISSN: 2220-9964. DOI: [↪10.3390/ijgi9100584](https://doi.org/10.3390/ijgi9100584).
- Riemer, Maren, Katrin Krzepek und Dorota Iwaszczuk (2024). „Analyse und Bewertung von Fusionsstrategien für Raster- und Punktdaten zur Detektion von Bodenbewegungen in Hessen“. In: *Beiträge 44. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. Hrsg. von Thomas P. Kersten und Nora Tilly. Bd. 32. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Konferenzveröffentlichung, DGPF-Jahrestagung 2024 Stadt, Land, Fluss, - Daten vernetzen, Remagen,

-
- 13.-14. März 2024. Stuttgart: Geschäftsstelle der DGPF, S. 455–465. DOI: [↪10.24407/KXP:1884384242](https://doi.org/10.24407/KXP:1884384242). URL: <https://www.dgpfs.de/dgpfs-2024>.
- Rudolf, Michael u. a. (2024a). „Identification and Analysis of Anomalous Ground Movements in Urban and Rural Areas Using Persistent Scatterer Interferometry in Southern Hesse, Germany“. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 17, S. 10967–10978. ISSN: 2151-1535. DOI: [↪10.1109/jstars.2024.3400698](https://doi.org/10.1109/jstars.2024.3400698).
- Rudolf, Michael u. a. (Jan. 2024b). „Inversion-based Time Series Analysis of PS-InSAR Data: Uncovering the Origins of Subsidence and Annual Fluctuations in Southern Hesse, Germany“. In: DOI: [↪10.5194/egusphere-egu24-10088](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-10088).
- Sudhaus, Henriette und Sigurjón Jónsson (Feb. 2009). „Improved source modelling through combined use of InSAR and GPS under consideration of correlated data errors: application to the June 2000 Kleifarvatn earthquake, Iceland“. In: *Geophysical Journal International* 176.2, S. 389–404. ISSN: 1365-246X. DOI: [↪10.1111/j.1365-246x.2008.03989.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2008.03989.x).
- Tomás u. a. (Juli 2019). „Semi-Automatic Identification and Pre-Screening of Geological–Geotechnical Deformational Processes Using Persistent Scatterer Interferometry Datasets“. In: *Remote Sensing* 11.14, S. 1675. ISSN: 2072-4292. DOI: [↪10.3390/rs11141675](https://doi.org/10.3390/rs11141675).
- Weigl, E. u. a. (2004). *Projekt RADOLAN - Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer)*. Techn. Ber. Letzter Zugriff am 12.04.2023. Deutscher Wetterdienst (DWD). URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan_info/abschlussbericht_pdf.pdf;jsessionid=93915EFC8EEFD08A685A67A887456C6.live21064?__blob=publicationFile&v=2.