

Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Detektion und Interpretation von Bodenbewegungen in Hessen

Usage of Remote Sensing Data to Detect and Interpret Ground Motion in the State of Hesse

Benjamin Homuth | Katrin Krzeppek | Michael Rudolf |
Maren Riemer | Dorota Iwaszczuk | Andreas Henk

Zusammenfassung

Die Feststellung von großräumigen Bodenbewegungen und die dazugehörige Ursachenforschung sind wichtige Bestandteile der Arbeit eines geologischen Dienstes. Um betroffene Regionen ausfindig zu machen, müssen unterschiedliche Datenquellen zusammengeführt und analysiert werden. Die Fernerkundung, insbesondere die Radarinterferometrie, bietet eine hohe räumliche und zeitliche Abdeckung für die Überwachung von Bodenbewegungen. Um Bewegungs-Hot-Spots automatisch zu detektieren, werden mittels eines erstellten GIS-Tools, dem Ground Motion Analyser, Gebiete mit signifikanten Bodenbewegungen identifiziert. Bewegungsursachen werden untersucht und dokumentiert. Um die räumlichen Lücken der radarinterferometrischen Daten in unbebauten Regionen zu füllen, werden Differenzkarten aus digitalen Geländemodellen erstellt und ausgewertet.

Schlüsselwörter: Radarinterferometrie, Persistent Scatterer Interferometrie, Laserscanning, Bodenbewegungen, Hessen

Summary

The determination of large-scale ground motion and the associated determination of causes are an important part of the work of a geological survey. In order to identify affected regions, different data sources must be combined and analysed. Remote sensing, especially radar interferometry, offers high spatial and temporal coverage to monitor ground motion. In order to automatically detect the ground motion hot spots, areas with significant ground motion are identified using a specific GIS tool, the ground motion analyser. To analyse the causes of ground motion, the time series are examined and further compared with possible causes of ground motion in the region and documented within a ground motion database. In order to fill the spatial gaps in the persistent scatterer data in rural regions, difference maps from digital terrain models are created and evaluated.

Keywords: Radarinterferometry, Persistent Scatterer Interferometry, Laserscanning, Ground Motion, Hesse

1 Geofahren und Bodenbewegungen in Hessen

Geofahren – wie Hochwasser, Rutschungen, Felsstürze, Erdfälle, Senkungsmulden oder Erdbeben – stellen geologisch bedingte Naturgefahren dar, die zu Schäden an Infrastruktur und Gebäuden sowie zur Bedrohung von Menschenleben führen können. Die Art und Verteilung von Geofahren steht in Korrelation zu geologischen, klimatischen und morphologischen Faktoren sowie der Nutzung gefährdeter Gebiete durch den Menschen. Zu den dominierenden Geofahren in Hessen zählen gravitative Massenbewegungen (Rutschungen/Felsstürze), Subrosion (Erdfälle/Senkungsmulden), setzungsempfindliche Schichten (Schrumpfen/Quellen), Hochwasser und Erdbeben (Aderhold et al. 2024).

Eine Quelle für Bodenbewegungen in Hessen stellen setzungsempfindliche Schichten dar. Als besonders setzungsempfindlich zählen Böden mit einem hohen Maß an organischem Anteil oder einem Feinkornanteil (Ton) über 20 %. In Hessen gehören dazu die tertiären Tone, Auen-sedimente, tonig-schluffige Verwitterungsprodukte sowie Torf. Diese Schichten treten in ganz Hessen, insbesondere in Tälern und Senken auf (Abb. 1). Tertiäre Tone treten u. a. als sog. »Frankfurter Ton« in den Hydrobienschichten oder als »Rupelton« in der Bodenheim-Formation im Rhein-Main-Ballungsgebiet auf (Aderhold und Heinrichs 2021). Sie besitzen je nach Wassergehalt ein sehr hohes Schrumpfbzw. Quellvermögen.

Schäden, die durch Setzungen hervorgerufen werden, ereignen sich vor allem dort, wo der Boden einer unregelmäßigen Schrumpfung unterliegt. Durch die darauffolgende starke Beanspruchung der Gebäude können typische Schäden, wie Rissbildungen und Verkipnungen, auftreten. Bei einer gleichmäßigen Setzung sind die Auswirkungen auf Bauwerke meist geringfügig. Neben den bekannten tonhaltigen Schichten können auch andere Baugrundbedingungen, wie kleinräumig wechselnde Bodenschichten (z. B. tonig-kiesig), Übergänge von Fest- zu Lockergesteinsschichten, Durchnässung von Bodenabschnitten sowie künstliche Geländeauffüllungen, Setzungen verursachen.

In Hessen rückt die Problematik dieser Geofahr immer mehr in den Fokus. Der Klimawandel und die damit

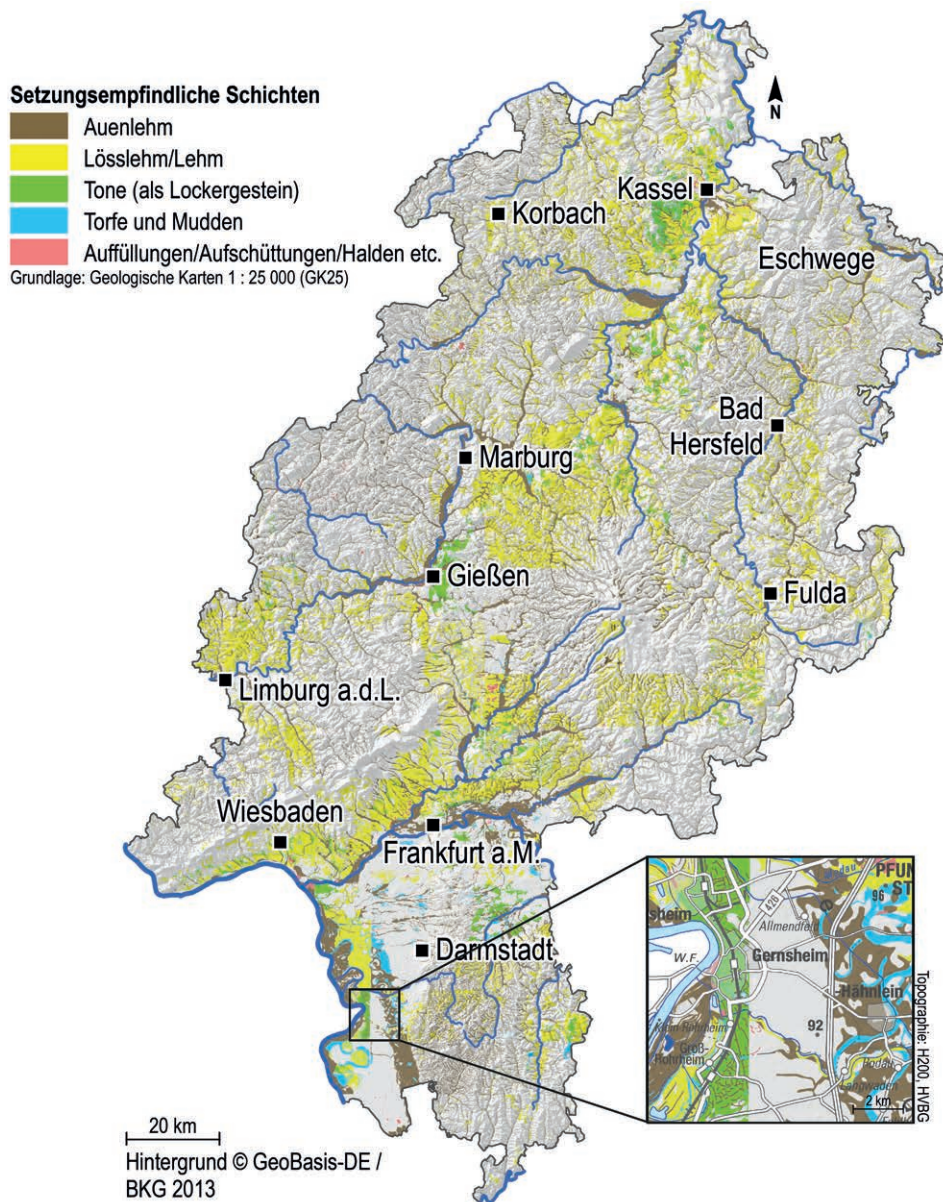


Abb. 1: Karte der setzungsempfindlichen Schichten auf Grundlage der geologischen Karten 1 : 25000 von Hessen

einhergehenden niederschlagsarmen »Trockenjahre« lassen die Böden immer weiter austrocknen. Durch die immer tiefer reichende Bodenaustrocknung und die teils lokale Absenkung des Grundwassers kommt es vermehrt zu Verformungen des Untergrundes, die durch Schrumpfung der tonhaltigen und organischen Schichten hervorgerufen werden. Weitere Ursachen stellen z. B. auch ältere (Laub-) Bäume dar, die dem Boden verhältnismäßig viel Wasser durch ihre Wurzeln entziehen. Komplette Versiegelungen der Geländeoberfläche sorgen dafür, dass kein Niederschlagswasser in den Boden versickert. Beide Faktoren verstärken den Effekt der Austrocknung des Untergrundes.

Zur Detektion und Beschreibung von solchen Bodenbewegungen in der Fläche sind daher weiterführende Daten notwendig, die flächendeckend aufgrund von zu großem wirtschaftlichem und personellem Aufwand durch terrestrische Messungen nicht erfasst werden können.

HLNUG verschnitten werden. Dafür muss auch eine verstärkte Nutzung der digitalen Geländemodelle (berechnet aus Laserscandaten) erfolgen, z. B. unter Nutzung sogenannter »Differenzenpläne«, d. h. der Nachverfolgung von Geländeänderungen über längere Zeiträume. Die Datenbewertung hat u. a. das Ziel, die Auswirkungen von klimawandelbedingten Dürreperioden auf das Setzungsverhalten von entsprechend sensiblen Sedimentschichten zu bewerten. Sinkende Grundwasserstände und geringe Grundwasserneubildung während Trockenperioden können großflächige Setzungen auslösen, durch die Schadenereignisse an Gebäuden auftreten können. Dies kann mittlerweile in verschiedenen hessischen Städten wie z. B. Kassel, Offenbach und Wiesbaden beobachtet werden. Parallel hierzu können auch Massenverlagerungen (z. B. Rutschungsereignisse oder Erdfälle) ausgewertet werden.

Im Zuge des Projektes »Umwelt 4.0 – Cluster I – Nutzung digitaler Geländemodelle und Copernicus-Daten«, welches durch das Hessische Ministerium für Digitalisierung und Innovation finanziert wird, soll in Kooperation mit der Technischen Universität Darmstadt am Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) die Nutzung von Copernicus-Daten der Höhenvermessung (Bodenbewegungsdaten, Sentinel-1) zur Verwendung in der ingenieurgeologischen Landesaufnahme und der Geogefahrenbearbeitung intensiviert werden. Das Projekt dient zur Bereitstellung, Erweiterung und Modernisierung für interne Arbeitsabläufe in der Landesverwaltung wie auch zur öffentlichen Verfügbarkeit für externe (Öffentlichkeit, Universitäten, etc.) Nutzer. Dabei sollen vor allem entwickelte und abgeleitete Produkte und Informationen zu Setzungen/Hebungen und deren Bewertungen bereitgestellt werden.

Die bundesweiten Copernicus-Datensätze müssen für die Nutzung auf Landesebene aufbereitet und mit zusätzlichen Informationen hessischer Behörden und des

2 Detektion von Bodenbewegungen mittels Fernerkundungsdaten

2.1 Datenverfügbarkeit

Zur Detektion von eher langsam ablaufenden, großräumigeren Bodenbewegungen sollen in Zukunft zwei wesentliche Datensätze für das Bundesland Hessen dauerhaft verwendet werden. Zum einen sind dies Daten der Radarinterferometrie (InSAR), hauptsächlich beruhend auf frei zugänglichen Daten der Sentinel-Missionen des Copernicus-Raumfahrtprogramms der Europäischen Union.

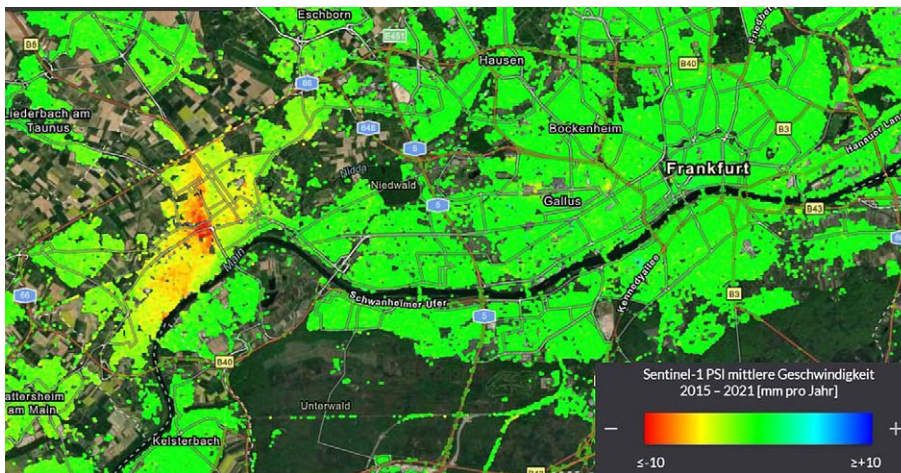


Abb. 2: Auszug für das Rhein-Main-Gebiet aus dem Viewer des Bodenbewegungsdiensstes Deutschland. Dargestellt sind die mittleren vertikalen Geschwindigkeiten der Sentinel-1 PSI-Daten für den Zeitraum 2015–2021.

Zum anderen werden flugzeuggestützte Laserscanning-Daten (Airborne Laserscanning, ALS) – verarbeitet als Digitales Geländemodell (DGM) – verwendet, die von der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HVBG) bereitgestellt werden (HVBG 2024). Die InSAR-Daten können aus öffentlich zugänglichen Quellen über Viewer (Viewer des Bodenbewegungsdiensstes Deutschland (BBD, Kalia et al. 2021, Abb. 2) oder des European Ground Motion Service (EGMS, Crosetto et al. 2020)) bezogen werden und erfahren in der Regel ein jährliches Daten-Update. Die Daten weisen einen Fehlerbereich von ± 3 mm/a auf. Die Laserscan-Daten können vom OpenData-Download-Center der HVBG bezogen werden. Aktuell findet alle sechs Jahre ein neuer Befliegungszyklus statt. Die Daten weisen eine flächendeckende Genauigkeit von ± 30 cm auf. Alle Genauigkeiten stellen dabei Standardabweichungen dar (95%-Konfidenzintervall).

2.2 Datenbearbeitung, Visualisierung und Automatisierung

2.2.1 InSAR-Daten

Die InSAR-Daten des BBD wurden nach Bereitstellung für eine flächenhafte Darstellung innerhalb eines Geoin-

formationssystems (GIS) aufbereitet. Die Persistent Scatterer Interferometry (PSI) stellt eine spezielle Anwendung von differenziellem InSAR dar, bei der Persistent Scatterer (PS) identifiziert und überwacht werden. Einzelne PS sind hierbei besonders gut erkennbare und dauerhaft auftretende Radarreflektoren auf der Erdoberfläche, beispielsweise Dachkanten, Schornsteine, Masten, aber auch Felsen oder Klippen. Für jeden dieser PS kann über den Beobachtungszeitraum die genaue räumliche Lage, und somit die Bewegung, gemessen werden. Zunächst wird lediglich die Bewegung in Blickrichtung der Satelliten gemessen (L2 Daten) und anschließend aus mehreren Beobachtungen

in einem Punktgitter von $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ in eine vertikale und eine Ost-West-Bewegung umgerechnet (L3 Daten). Aufgrund der polaren Orbits der Satelliten kann die Nord-Süd-Bewegung leider nicht erfasst werden. Diese Daten können als Punktdatensatz vom BBD heruntergeladen werden. Um diese hohe Anzahl an Punktdaten flächig gezielter auswerten zu können und Belange des Datenschutzes zu wahren, wurden Tests mit verschiedenen geostatistischen Methoden (Kriging-, Triangulated Irregular Network-, Inverse Distance Weighted-Verfahren) durchgeführt. Insbesondere die ungleiche Verteilung der

PS im ländlichen und städtischen Raum und die daraus resultierenden Lücken sollten dadurch etwas abgeschwächt werden. Aufgrund nicht zufriedenstellender Ergebnisse wurde schließlich eine einfache Kacheldarstellung gewählt. Es wurde ein Workflow zur flächenhaften Darstellung der PSI-Daten in vertikaler und Ost-West-Richtung erarbeitet. Im ersten Schritt wurden die PS in einer Kachel anhand der Varianz σ^2 ihrer durchschnittlichen linearen Bewegungsgeschwindigkeit im Beobachtungszeitraum gefiltert. Die gewählte maximale Varianz ist $\sigma^2 \leq 1$. Durch diese Filterung wird ein gleichmäßigeres Erscheinungsbild mit weniger Ausreißern erreicht. Innerhalb des GIS-Tools kann die Rastergröße der resultierenden Kacheldarstellung beliebig eingestellt werden. Als sinnvoll beurteilt wurde eine Rastergröße von 250 m in Anlehnung an Riecken et al. (2019). Die Kachelgröße von 250 m eignet sich als guter Kompromiss zwischen der detaillierten Punkt-Darstellung und der Wahrung des Datenschutzes (Abb. 3).

Ausgehend von dieser Kacheldarstellung wurde ein automatisiertes Verfahren zur Bestimmung von Bodenbewegungs-Hot-Spots entwickelt. Für diese Identifikation der Bewegungsgebiete wurde ein GIS-Tool erstellt, der Ground Motion Analyser (GMA). Dieser verrechnet für jede Rasterzelle die Anzahl der PS, die eine Hebung/Setzung angeben, und die Summe der Hebungen/Setzungen innerhalb der Rasterzelle. Dieser Wert wird anschließend

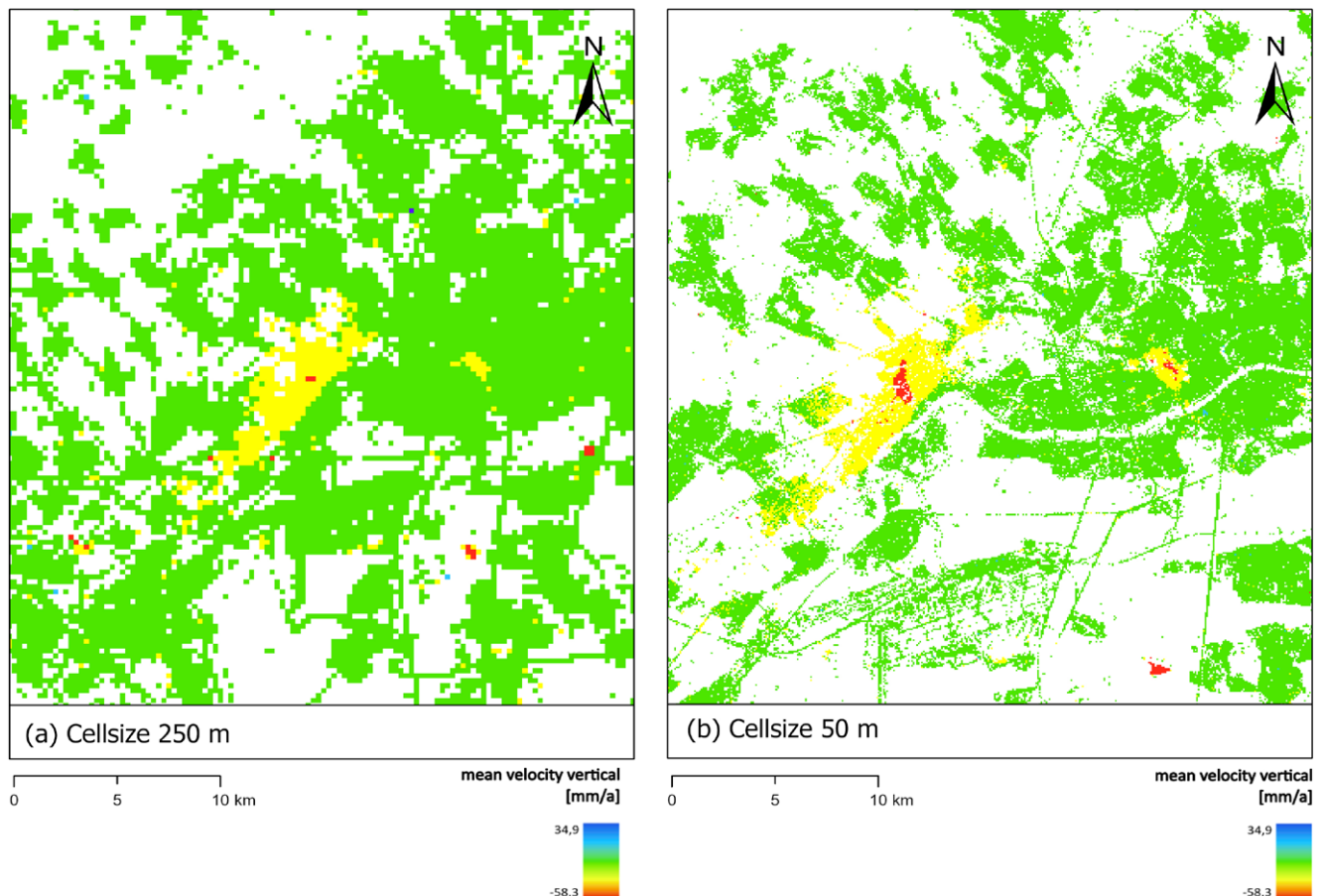


Abb. 3: Flächenhafte Darstellung von Bodenbewegungen im Rhein-Main-Gebiet für eine Kachelgröße von (a) 250 m und (b) 50 m

logarithmiert und Werte mit einem score höher als -1 als Hotspots hervorgehoben.

$$GMA\ Score = \log_{10}(N_{PSI} \cdot d_v). \quad (1)$$

Je mehr PS eine Hebung/Setzung anzeigen und je gravierender diese ist, desto höher ist der Wert der Zelle. Es können innerhalb des Tools beliebige Rasterweiten eingestellt werden. Für die hessenweite Auswertung entschied man sich für eine Rastergröße von 500 m (Abb. 4). So ist es in Zukunft möglich, bei jeder Datenaktualisierung eine automatische Auswertung von Bodenbewegungs-Hot-Spots ohne zeitaufwendige manuelle Datendurchsicht zu erlangen.

2.2.2 Laserscan-Daten

Da PSI-Daten der Beschränkung unterliegen, dass PS häufig nur in urbanen Gebieten detektiert werden können, werden zur Detektion von Bodenbewegungen zusätzlich digitale Geländemodelle ausgewertet. Für das Bundesland Hessen liegen DGMs zweier Epochen vor. Die ersten Überfliegungen fanden von 2007 bis 2014 statt. In diesem Zeitraum wurde ganz Hessen mit Laserscannern befliegen. Die zweiten Überfliegungen fanden von 2015 bis 2021 statt. Aktuell wird das DGM der dritten Epoche erstellt.

Um aus den DGMs Bodenbewegungen ermitteln zu können, werden Differenzkarten aus den verschiede-

nen Epochen durch Differenzenbildung berechnet. Da die Daten der ersten und zweiten Epoche jedoch auf unterschiedlichen Höhenbezugssystemen beruhen, musste vor der Differenzenbildung zuerst eine Anpassung des Höhenbezugssystems der ersten Epoche erfolgen. Die DGMs der älteren Epoche (2007–2014) beziehen sich auf das Höhenbezugssystem DHHN92, die DGMs der neuen Epoche (2015–2021) auf das DHHN2016. In Hessen liegen die Änderungen zwischen beiden Höhenbezugssystemen zwischen $-6,6$ cm und $+3,5$ cm. Nach erfolgter Korrektur können dann durch Subtraktion die Differenzkarten erstellt werden. Auch nach der Korrektur der unterschiedlichen Höhenbezugssysteme fallen Bereiche in den Differenzkarten auf, die nicht natürlichen Ursprungs sind. Diese Bereiche zeichnen sich durch sehr scharfe rechtwinklige Kanten oder großflächige Streifenmuster aus, die keinen Zusammenhang mit der Vegetation, Geologie oder Topographie haben. Ursachen für diese Abweichungen sind u. a.:

- Veränderte Punktdichte von der alten zur neuen Epoche,
- Verarbeitungsalgorithmen und Klassifizierungssoftware (Ergebnisse können sich durch unterschiedliche Strategien und individuell gesetzte Parametrisierung unterscheiden),
- Höhenunterschiede an den Flugstreifen (kommen durch unterschiedliche Strategien der Ausgleichung und Streifenanpassung zustande).

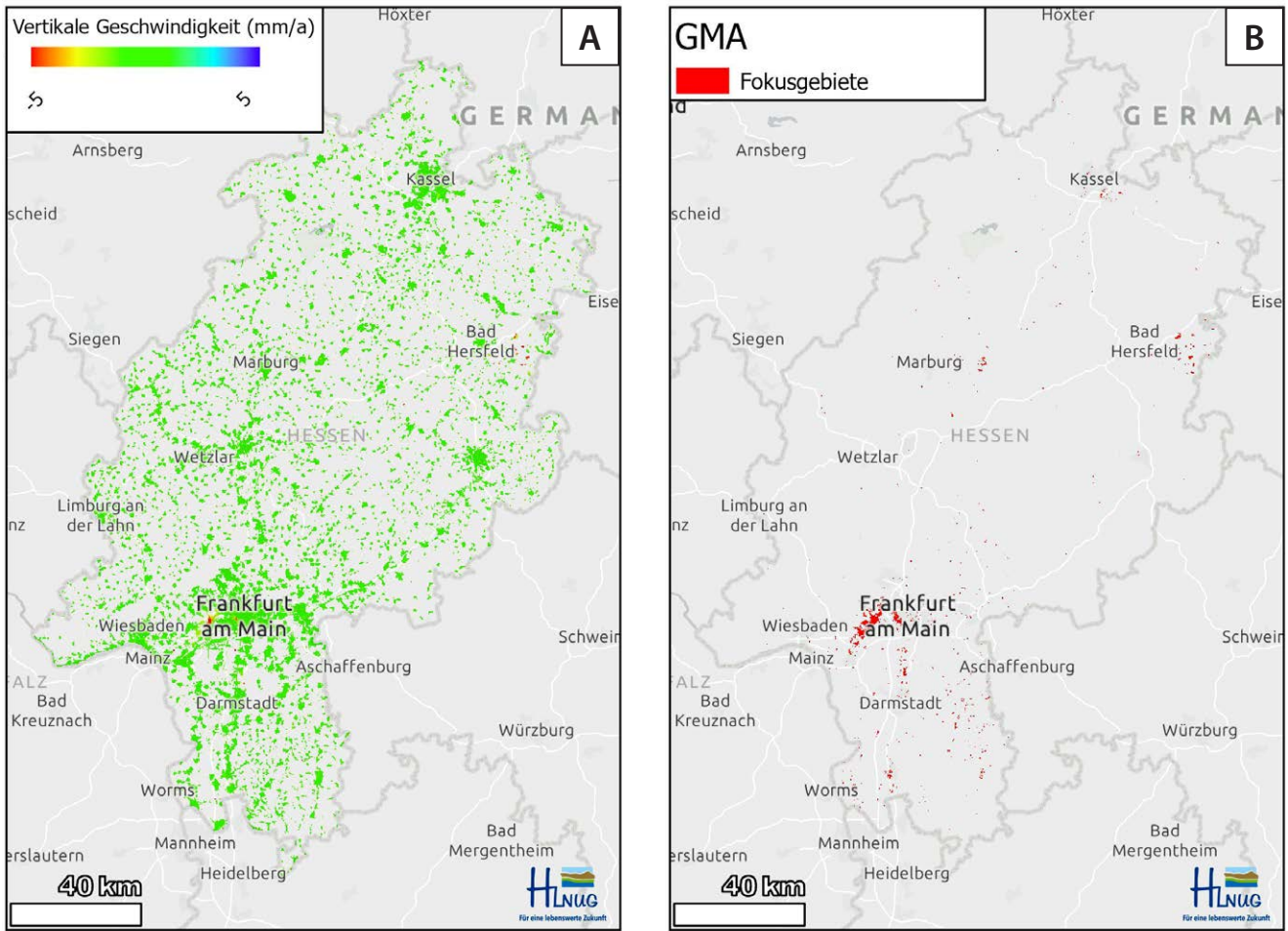


Abb. 4: (A) Kachelansicht der vertikalen Geschwindigkeit (mm/a) für das Gebiet des Bundeslandes Hessen, (B) Ergebnis des Ground Motion Analyser mit Bodenbewegungs-Hot-Spots (Fokusgebiete) in Hessen

Diese Abweichungen liegen im Toleranzbereich der Spezifikation des digitalen Geländemodells, müssen aber für die Zwecke dieser Studie korrigiert werden. Zur Korrektur der

systematischen Abweichungen werden Polygone erstellt, die diese Bereiche eingrenzen, und es erfolgt eine manuelle Durchsicht der Daten. Auf diese Weise konnten für

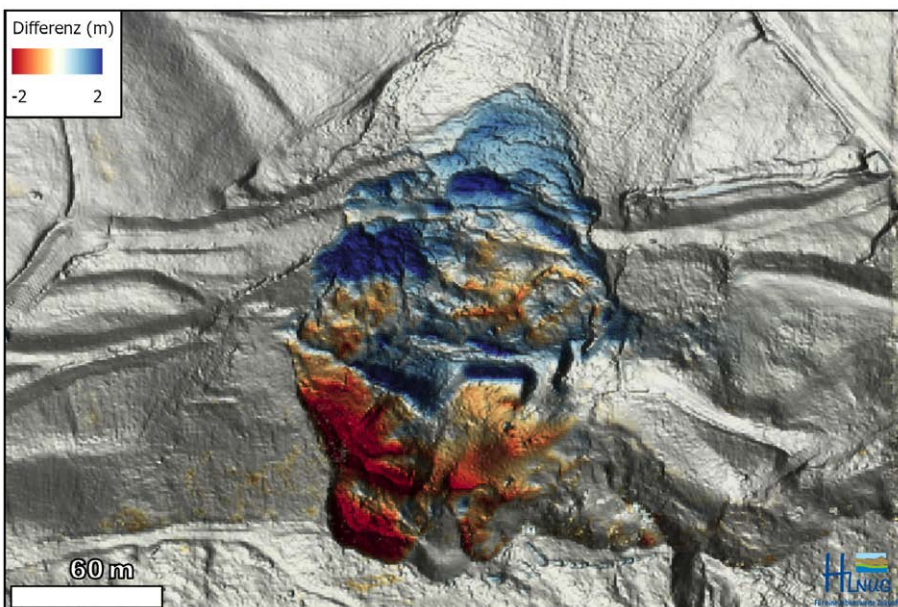


Abb. 5: Beispiel einer Differenzkarte im Bereich einer Hangrutschung nördlich Hirschberg bei Großalmerode in Nordhessen

ganz Hessen 43 auffällige Bereiche identifiziert werden, in denen eine Auswertung der Differenzkarten aufgrund dieser systematischen Abweichungen nur erschwert und mit großer Vorsicht stattfinden kann. Mit Bereitstellung der Daten der dritten Epoche verbindet sich die Hoffnung, dass diese systematischen Abweichungen deutlich verringert werden können. Differenzkarten sind jedoch generell zur Detektion von Bodenbewegungen geeignet (Abb. 5), 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,

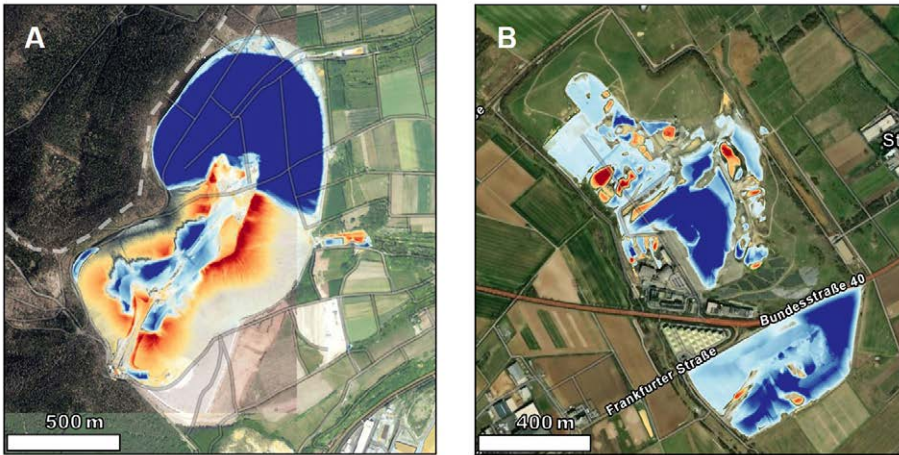


Abb. 6: Anthropogene Massenbewegungen, die auf den Differenzenplänen im Bereich von z. B. (A) Halden (Phillipsthal) und (B) Deponien (Flörsheim) sichtbar werden. Blau ist Auffüllung, Rot ist Absenkung.

markantere Bewegungen wie Rutschungen oder Abbrüchkanen im Datensatz erkannt werden. Auch Auswaschungen können in den Schummerungen sichtbar werden.

Die Messungenauigkeiten der ersten Epoche führen zu einer eingeschränkten Nutzbarkeit der aktuellen Differenzenkarten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass viel Potenzial in den Differenzenkarten liegt. Die zukünftigen Messkampagnen werden aufgrund von technischen Neuerungen und gewonnener Erfahrung bei den Befliegungsfirmen eine höhere Genauigkeit aufweisen. Auf lange Sicht sollte es daher möglich sein, auch geringere Bodenbewegungen in den Differenzenkarten zu detektieren, sobald für eine ausreichende Zeitspanne Daten vorhanden sind. Besonders gut detektieren lassen sich bereits jetzt anthropogene Auffüllungen oder Abtragungen im Zusammenhang mit Steinbrüchen, Halden und Deponien. Diese liegen in den

markanteren Bewegungen wie Rutschungen oder Abbrüchkanen im Datensatz erkannt werden. Auch Auswaschungen können in den Schummerungen sichtbar werden.

3 Interpretation

Aufbauend auf den aufbereiteten InSAR-Daten und DGM-Differenzenkarten, werden alle auffälligen Bewegungsgebiete von Hessen nach einer möglichen Ursache für die Bodenbewegung klassifiziert (Abb. 7) und unter Einbeziehung zusätzlicher geologischer, hydrologischer, topografischer Daten etc. und anhand von Zeitreihenanalysen interpretiert (Rudolf et al. 2024). Ziel ist die Erstellung eines Bodenbewegungsatlas, basierend auf Fernerkundungsdaten für das Bundesland Hessen als Ergänzung zu bereits vorhandenen Daten zu Bodenbewegungen.

In einer ersten Auswertung zeigten sich bereits weitere Einschränkungen in der Nutzbarkeit der Differenzenpläne. Zwei wesentliche Faktoren sind Artefakte aus der Datengenerierung und der große Einfluss von menschlicher Aktivität. Die Artefakte entstehen vor allem bei der Berechnung des digitalen Geländemodells aus den digitalen Oberflächenmodellen. Das Oberflächenmodell beinhaltet die Gesamtheit der Erdoberfläche inklusive der Vegetation und darauf befindlicher Strukturen. Bei der Berechnung des Geländemodells wird die Vegetation durch die unterschiedliche Streuung der Baumkronen und des Bodens erkannt und entfernt.

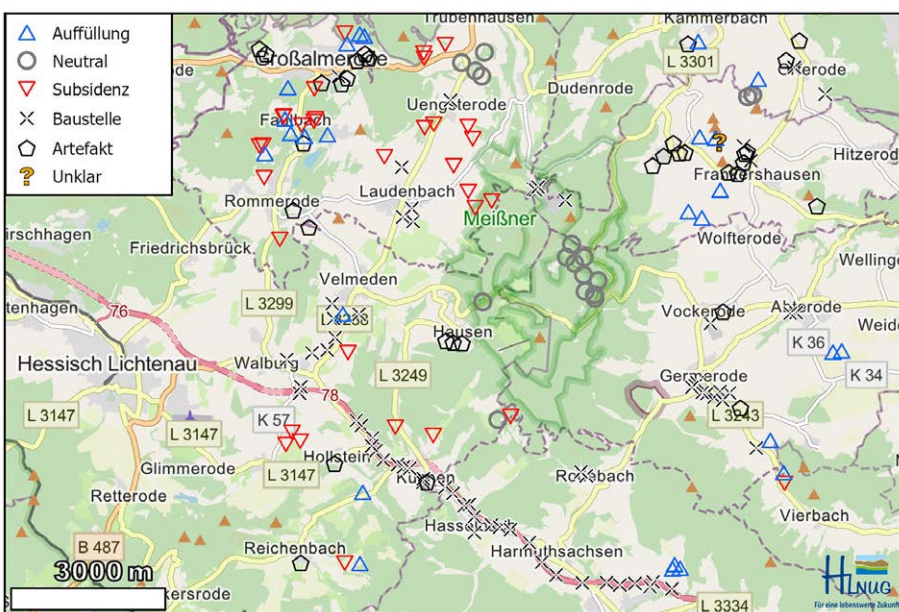


Abb. 7: Beispiel einer Karte basierend auf visueller Klassifizierung mit deutlich erkennbaren Mustern z.B. im Nord-Westen auftretende Senkungen um die Ortschaft Großalmerode und der Neubau der Autobahn A44 im Süden

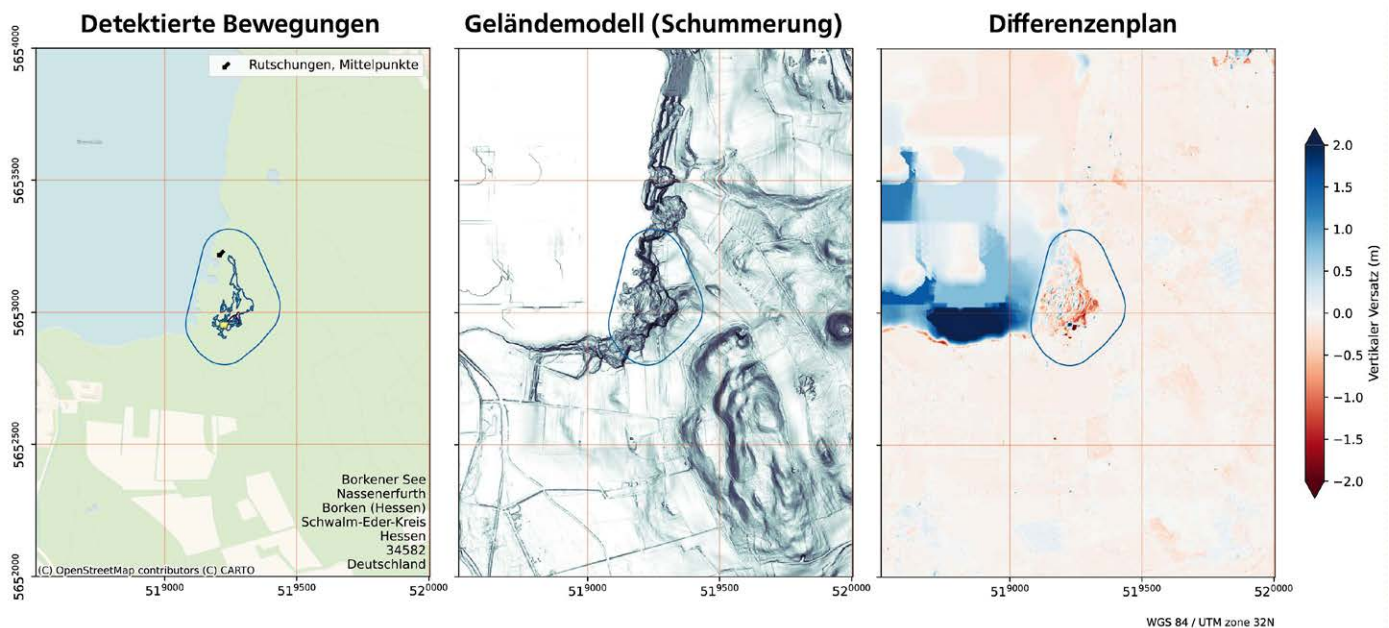


Abb. 8: Detektierte großräumige Reaktivierung bekannter Rutschungen am Rande des Borkener Sees im Schwalm-Eder-Kreis. Der See ist ein gefluteter Braunkohletagebau dessen südöstlicher Rand aufgrund teilweise untertägigen Abbaus, auch mehr als 20 Jahre nach der vollständigen Flutung, noch aktiver Bewegung unterliegt.

Dies sorgt in stark bewaldeten Regionen zu leicht erhöhtem Rauschen und daher können Bodenbewegungen, die geringe Geschwindigkeiten auf kleiner Fläche aufweisen, nicht erkannt werden. Wasserflächen, Gebäude und Infrastruktur (z. B. Brücken) werden mit Hilfe zusätzlicher Kartendaten entfernt. Diese können allerdings, je nach Befliegungszeitraum und ausführenden Dienstleistern, leichte Abweichungen beinhalten. Auch werden die entfernten Bereiche mittels Interpolation aufgefüllt, was teilweise zu extremen Verzerrungen führen kann (z. B. blaue Bereiche im Differenzenplan in Abb. 8). Ein weiterer Faktor ist die weitverbreitete Bodenverlagerung durch menschliche Aktivität. Vor allem in der Nähe von Straßen, besonders im Bereich von Autobahnen, und in Steinbrüchen und Kiesgruben kommt es zu sehr starken oder großflächig auftretenden Bodenbewegungen im Rahmen der (Ab-)Bautätigkeit. Dies lässt sich allerdings durch Verschneiden der Differenzenpläne mit entsprechenden Kartendaten herausfiltern (z. B. Straßennetze, Gebäude). Extremwerte, wie sie beispielsweise durch Interpolation oder Abbautätigkeit entstehen, können mit einem einfachen Grenzwert entfernt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen konnten nach aktuellem Stand in ganz Hessen mehr als 21.000 Bewegungen zwischen +10 m und -10 m detektiert werden. Diese verteilen sich auf mehrere tausend Lokalitäten. Die meisten dieser Verdachtsfälle sind allerdings noch immer vorhandene Artefakte oder Baustellen, die nicht ausreichend gefiltert wurden. Daher müssen die Filterkriterien weiter angepasst werden. Eine Vorauswertung von Bewegungsanomalien in Regionen bekannter Gefährdung ergab ca. 150 Verdachtsfälle, wovon einige bereits bekannt sind oder unmittelbar in der Nähe bekannter Vorfälle auftreten (Abb. 8). Dies zeigt, dass der Workflow grundsätzlich dafür

geeignet ist, kritische Bodenbewegungen automatisiert zu erkennen und für eine anschließende manuelle Inspektion aufzubereiten.

4 Fazit und Ausblick

Innerhalb des hier dargestellten Projektes konnten für das Bundesland Hessen die Bodenbewegungsdaten der Radarinterferometrie der Sentinel-1-Satelliten neu aufbereitet und als Kachelansicht visualisiert werden. Durch die Entwicklung einer automatisierten Detektion von Bodenbewegungs-Hot-Spots ist es in Zukunft möglich, bei jeder Aktualisierung der PSI-Daten automatisch die Bodenbewegungsgebiete in Hessen zu ermitteln. Mittels der Durchführung von Zeitreihenanalysen und dem Vergleich mit weiteren Daten können mögliche Ursachen für die beobachteten Bodenbewegungen abgeleitet werden. Darauf aufbauend findet eine Klassifizierung der Bodenbewegungen und die Erstellung eines Bodenbewegungsatlas für das Bundesland Hessen aufgrund von Fernerkundungsdaten statt. Durch den Verschnitt mit Laserscandaten kann der Anwendungsbereich von urbanen Räumen (viele Rückstrahler zur Nutzung der Radarinterferometrie) auf ländlichere Räume (wenige Rückstrahler) erweitert werden. Die Ergebnisse des Projektes sollen der Öffentlichkeit über den Geologie-Viewer des HLNUG (geologie.hessen.de) zur Verfügung gestellt werden. Eine Bereitstellung und Implementierung der Daten für die Nutzung in Geo-Daten-Portalen Dritter (z. B. Kommunen in Hessen) ist denkbar und für eine möglichst weiträumige Nutzung der Dateninformationen erstrebenswert.

Literatur

- Aderhold, G., Alberti, M., Heinrichs, C., Homuth, B. (2024): Geogefahren in Hessen – Gravitative Massenbewegungen und Erdbeben. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Aderhold, G., Heinrichs, C. (2021): Geologie, Boden, Georessourcen und Geogefahren – Rhein-Main-Gebiet, Band 1. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Crosetto, M., Solari, L., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D.A. (2020): Ground Deformation Monitoring at continental scale: The European Ground Motion Service. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B3-2020, 293–298. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-293-2020.
- Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (2024): ATKIS DGM Digitale Geländemodelle. <https://hvbg.hessen.de/landesvermessung/geotopographie/3d-daten/digitale-gelaendemodelle>, letzter Zugriff 11.01.2024.
- Kalia, A., Frei, M., Lege, T. (2021): BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2021, 146. Jg., 273–279. DOI: 10.12902/zfv-0365-2021.
- Riecken, J., Krickel, B., Gefeller, V., Reifenrath, P. (2019): Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 6/2019, 144. Jg., 354–361. DOI: 10.12902/zfv-0281-2019.
- Rudolf, M., Krzepek, K., Homuth, B., Henk, A., Iwaszczuk, D. (2024): Identification and analysis of anomalous ground movements in urban and rural areas using persistent scatterer interferometry in southern Hesse, Germany. In: Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. In review.

Kontakt

Dr. Benjamin Homuth
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie –
Dezernat G2 Geologische Belange der Landesplanung, Georisiken
Reingaustraße 186, 65203 Wiesbaden
benjamin.homuth@hlnug.hessen.de

Dr. Michael Rudolf, Prof. Dr. Andreas Henk
Technische Universität Darmstadt – Institut für Angewandte
Geowissenschaften – Fachbereich Ingenieurgeologie
Schnittspahnstraße 9, 64287 Darmstadt
rudolf@geo.tu-darmstadt.de
henk@geo.tu-darmstadt.de

Katrin Krzepek, Maren Riemer, Prof. Dr.-Ing. Dorota Iwaszczuk
Technische Universität Darmstadt – Institut für Geodäsie – Fachgebiet
Fernerkundung und Bildanalyse
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
katrin.krzepek@tu-darmstadt.de
maren.riemer@tu-darmstadt.de
dorota.iwaszczuk@tu-darmstadt.de

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