

Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug

Jens Riecken, Bernd Krickel, Vincent Gefeller und Peter Reifenrath

Zusammenfassung

Das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus der Europäischen Raumfahrtbehörde (ESA) stellt mit den Satelliten Sentinel-1A und -1B wiederkehrend (12 bzw. 6 Tage) flächendeckende Radardaten der Erdoberfläche kostenlos zur Verfügung. Diese »free and open data policy« zielt auf die Nutzer aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung ab, die wiederum durch Veredelungsprozesse einen Mehrwert aus den Daten generieren.

Die nordrhein-westfälische Landesvermessung (Bezirksregierung Köln/Geobasis NRW) nutzt diese Daten künftig zur Ableitung eines »Bodenbewegungskataster NRW« und zur Qualitätssicherung des amtlichen Raumbezugs 2016. Hierzu findet eine mehrstufige Qualitätssicherung statt, bei der die Beobachtungen nach der Methode der Persistent Scatterer Interferometrie in Kacheln von 250 m × 250 m aggregiert, ihr Bewegungsverhalten gegeneinander validiert und nicht repräsentative Werte eliminiert werden. Abschließend findet, unter Verwendung terrestrischer Referenzdaten (Nivellement), eine Überführung der geprüften Kacheln in den amtlichen Raumbezug sowie eine Ergebnisvalidierung statt. Mit dem vorliegenden Beitrag sollen die methodischen Stärken und das wirtschaftliche Potenzial der Radarinterferometrie für die Aufgabenwahrnehmung im geodätischen Raumbezug und die Optimierung interner Prozesse aufgezeigt werden.

Summary

With the launch of the Copernicus program, the satellites Sentinel-1A and 1B provide regular (12-days/6-days), area-wide radar data, which are free of charge. This »free and open data policy« concept focuses on users from business, science and administration, to generate value added data.

Thus, the North Rhine-Westphalian Surveying and Mapping Administration (District Government of Cologne/Geobasis NRW) will provide the so called »Ground Movement Cadaster« (Bodenbewegungskataster NRW). For this product, a multi-level quality assurance process is defined. In this process the observations of the Persistent Scatterer Interferometry are aggregated into tiles of 250 m × 250 m, their motion behavior is validated against each other and non-representative values are eliminated. Finally, a matching of the tested tiles into the official spatial reference takes place. For this purpose leveling data is used as reference data.

This paper analyzes the potential of radar interferometry as a new method in a geodetic spatial reference.

Schlüsselwörter: Radarinterferometrie, geodätischer Raumbezug, Qualitätsmanagement, Bodenbewegungskataster

1 Bodenbewegungen in NRW

In Nordrhein-Westfalen bewirken insbesondere der Steinkohlenbergbau und der Braunkohletagebau großflächige, anthropogen verursachte Bodenbewegungen mit unmittelbaren Auswirkungen auf den geodätischen Raumbezug. Als Teil des gesetzlichen Auftrags der Landesvermessung (§ 9 (1) VermKatG NRW i. V. m. § 4 (3) DVOz VermKatG NRW) werden seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts die sogenannten Leitnivellelemente (Präzisionsnivellelemente) zur Überwachung von Vertikalbewegungen und zur Aktualisierung von Höhen in den durch Bergbauaktivität verursachten Bodenbewegungsgebieten durchgeführt (Heitmann et al. 2012). Die Abb. 1 zeigt die aktuellen Leitnivellelemente für die jeweiligen Bodenbewegungsgebiete.

Die Bodenbewegungsgebiete mit einer jährlichen Höhenänderung von mehr als ±3 mm bedecken weite Teile der Landesfläche Nordrhein-Westfalens. Die Messungen in diesen Gebieten mittels Präzisionsnivellelement verursachen, je nach Länge der Messstrecke und zeitlichem Turnus, hohe Kosten. Diese Messungen liefern punktuelle Höhenänderungen entlang von Messlinien, flächenhafte Information über das tatsächliche Bodenbewegungsverhalten sind durch Interpolationsverfahren nur beschränkt ableitbar. Für landesweite Aussagen über mögliche Bodenbewegungen ist aufgrund finanzieller und personeller Kapazitäten eine Ausdehnung der Leitnivellelemente nicht umsetzbar. In diesen Regionen lässt sich somit keine Aussage zu Vertikalbewegungen treffen.

Gemäß § 1 Absatz 1 (VermKatG NRW) ist die Landesvermessung im Rahmen ihres gesetzlichen Auftrags dazu angehalten, die Aufgabenerfüllung »[...] ständig dem Fortschritt von Wissenschaft und Technik anzupassen«. Aus diesem Anlass startete Geobasis NRW 2014 ein vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördertes Forschungsprojekt. Darin wurde die Verwendbarkeit der Sentinel-1-Satellitendaten unter Anwendung radarinterferometrischer Auswertemethoden zur Ableitung großräumiger Bodenbewegungen untersucht.

Die satellitengestützte Radarinterferometrie ist ein fernerkundliches Messverfahren und entwickelt sich aufgrund ihrer großflächigen Abdeckung und hohen Genauigkeit zunehmend zu einem Standardverfahren bei der Erfassung von Bodenbewegungen. Die wiederkehrenden Radarmessungen (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) erfolgen aus nahezu identischer Aufnahmeposition, wodurch sich eine Überlagerung (Interferenz) der Radarsignale ergibt. Die Radarinterferometrie (*Interferometrisches SAR*, InSAR) setzt die Phasenwerte zweier SAR-Aufnahmen

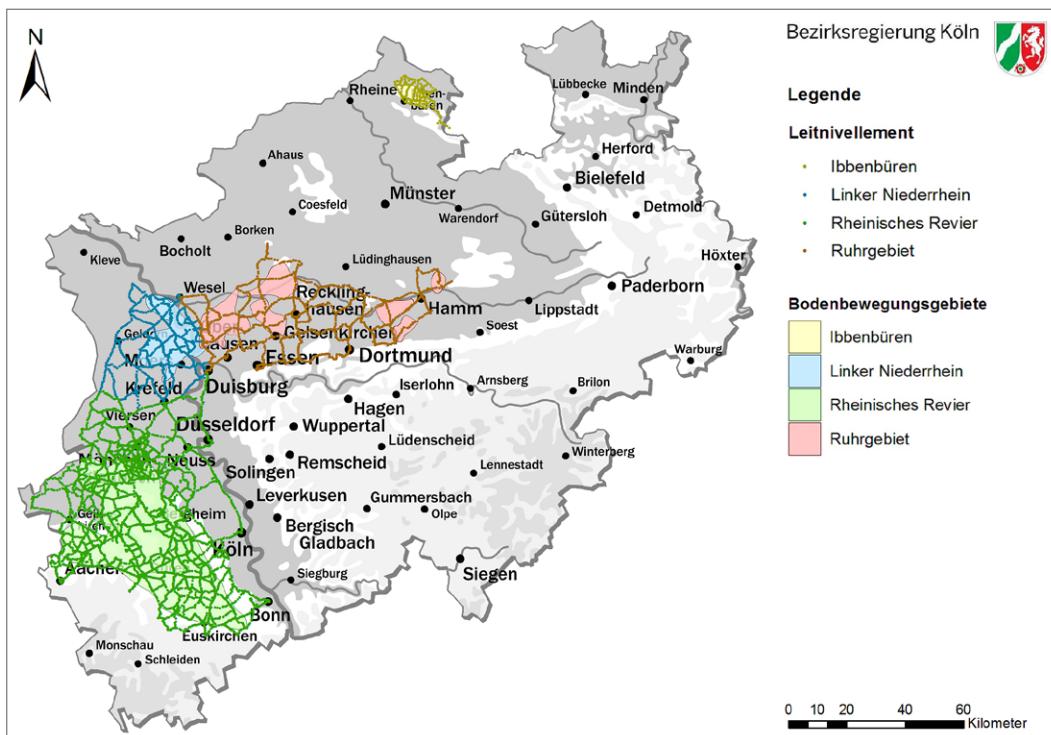


Abb. 1:
Leitnivellelement und
Bodenbewegungs-
gebiete in NRW

pixelweise in Differenz. Das Ergebnis wird als Phasendifferenzbild oder auch Interferogramm bezeichnet und beschreibt die Veränderung zwischen den zwei Aufnahmestypen in Blickrichtung (*Line-of-sight*, LOS) des Sensors. Unter der Annahme, dass keine Horizontalbewegungen stattgefunden haben, lässt sich die LOS-Änderung in ihre Vertikalkomponente (Höhenänderung) umrechnen (Busch 2019).

Für die Beobachtung langfristiger Höhenänderungen und die Bildung von Zeitreihen lässt sich dieses Messprinzip auf große Aufnahmestapel erweitern. Hierbei wird eine Vielzahl an Interferogrammen zwischen den einzelnen SAR-Kombinationen gebildet. Eine bewährte radarinterferometrische Auswertemethode ist die *Persistent Scatterer Interferometry* (PSI). Bei diesem Verfahren werden die Veränderungen an einzelnen langzeitstabilen Punktstreuern in den Radarszenen bestimmt. Dabei handelt es sich um Objekte in der Realität, die aufgrund ihrer Signalrückstreuereigenschaften (Größe, Form, Ausrichtung, etc.) das Radarsignal des Satelliten kohärent reflektieren. Abhängig von der Bodenauflösung des Sensors (z.B. Sentinel-1 = 5 m × 20 m) enthält jedes Pixel daher eine Vielzahl an rückstreuenden Elementen, deren Phasenrückstreuzentrum mit einer gewissen Lageunsicherheit behaftet ist. Daraus ergibt sich eine Pseudopunktschärfe, die im Kontext amtlich-geodätischer Daten zu Fehlinterpretationen führen kann.

Ferner ist zu beachten, dass es sich bei den radarinterferometrischen Ergebnissen um eine statistische Auswertung von räumlich-zeitlichen Massendaten (Big Data) handelt. Dementsprechend sollte dem Einzelergebnis (PSI-Punkt) weder in seiner räumlichen Lage, noch in seinem zeitlichen Verlauf eine allzu große Verlässlichkeit attestiert werden. Vielmehr ist eine übergeordnete statis-

tische Betrachtung der Ergebnisse erforderlich. Um den Mehrwert der Radarinterferometrie für die Aufgabenwahrnehmung in der Landesvermessung richtig beurteilen zu können, ist es daher unumgänglich, die Schwächen und Grenzen der Methode zu kennen. Mit Blick auf die öffentliche Bereitstellung daraus abgeleiteter amtlicher Daten, kommt diesem Aspekt eine umso größere Bedeutung zu.

Aufgrund dessen hat die nordrhein-westfälische Landesvermessung mit dem »Bodenbewegungskataster NRW« ein räumlich und zeitlich generalisiertes Produkt konzipiert, welches den hohen Qualitätserwartungen an amtliche Geobasisdaten Rechnung trägt.

2 Bodenbewegungskataster NRW

Das Projekt Bodenbewegungskataster NRW (BBK) ist seit 2014 im Rahmen des Förderprogramms »Entwicklung und Implementierungsvorbereitung von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland« entstanden. Mit dem Bodenbewegungskataster NRW wird die Schnittstelle zwischen Datenquelle (Sentinel-1) und Datenverarbeitung (Landesvermessung) sowie die damit einhergehende Prozesskette der »Erhebung – Qualifizierung – Weiterverarbeitung – Präsentation« definiert (Riecken und Busch 2015). In den folgenden Abschnitten soll diese Prozesskette näher erläutert werden.

2.1 Erhebung und Qualifizierung

Die Datenerhebung erfolgt im Rahmen des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus entsprechend der in Abb. 2

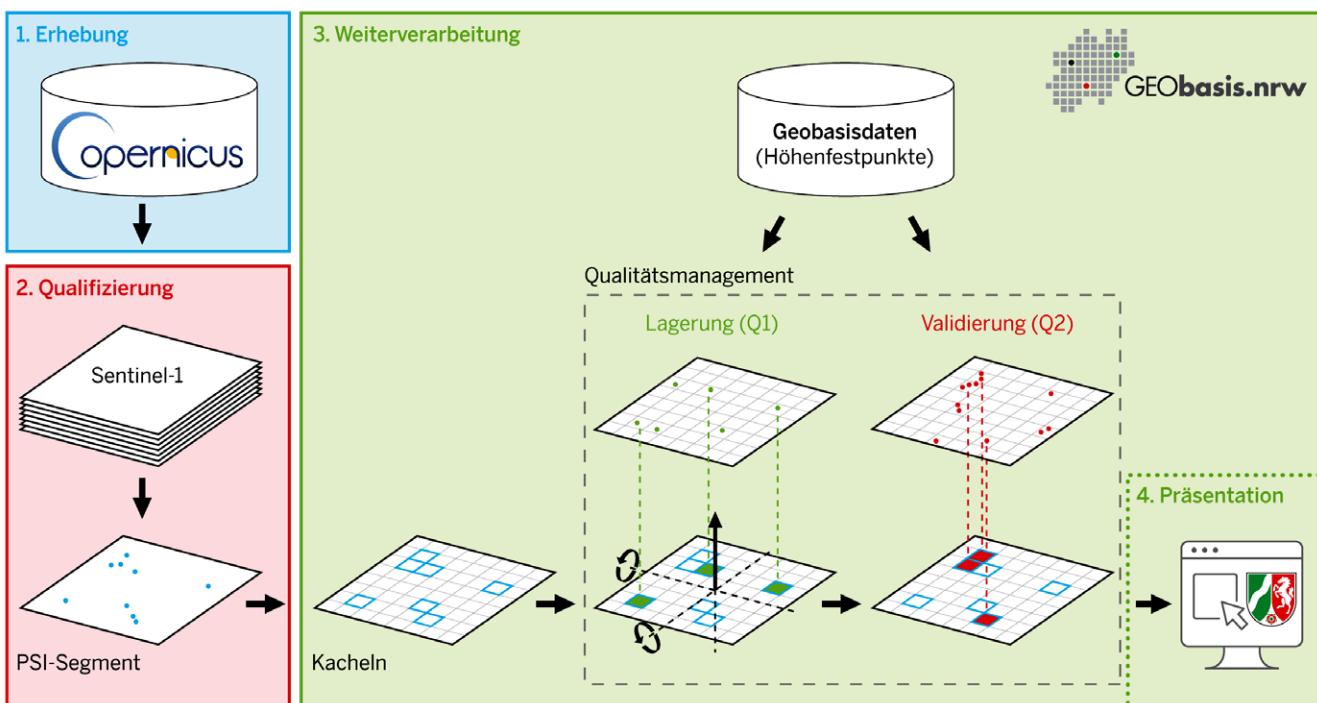


Abb. 2: Prozesskette des Bodenbewegungskatasters NRW

dargestellten Prozesskette. Die Satelliten Sentinel-1A (seit 2014) und Sentinel-1B (seit 2016) stellen wiederkehrend (alle 12 bzw. 6 Tage) flächendeckende Radardaten der Erdoberfläche kostenlos online zur Verfügung.

Um das Potenzial dieser Datenquelle auch in der Landesvermessung künftig zu nutzen, ist in Zusammenarbeit mit der TU Clausthal ein entsprechendes Konzept zur radarinterferometrischen Auswertung (Qualifizierung) der Sentinel-1-Daten konzipiert und getestet worden. Das Konzept »Bodenbewegungskataster NRW« sieht eine Aufteilung der Landesfläche in einzelne Segmente vor, von

denen jedes Segment als eigenständige PSI-Auswertung prozessiert wird.

Durch die TU Clausthal erfolgt die Auswertung eines Testgebiets im Nordwesten von NRW im Bereich des linken Niederrheins und des westlichen Ruhrgebietes (Abb. 3). Es teilt sich in vier Segmente ($45 \text{ km} \times 45 \text{ km}$) mit einer räumlichen Überlappung von rund 15 km. Insgesamt umfasst das Testgebiet eine Fläche von $75 \text{ km} \times 75 \text{ km}$.

Die räumliche Überlappung zwischen den einzelnen Segmenten dient der gegenseitigen Ergebnisvalidierung in der späteren Weiterverarbeitung (Kap. 2.2) sowie im Qualitätsmanagement (Kap. 2.3).

Dieser Schritt dient der Detektion systematischer Einflüsse infolge fehlerhafter Referenzpunkte, z.B. durch Höhenfehler oder Eigenbewegung.

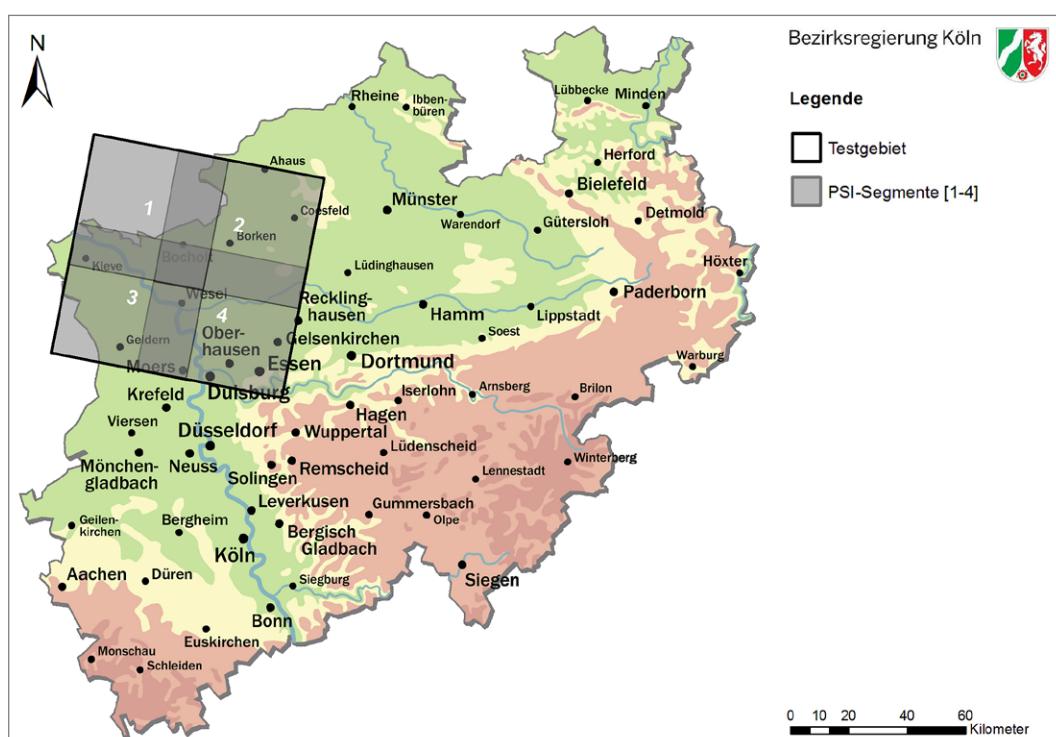


Abb. 3:
Testgebiet für das
Bodenbewegungs-
kataster NRW

2.2 Weiterverarbeitung

Entsprechend den Produktspezifikationen des Bodenbewegungskatasters NRW sollen die Höhenänderungen für

- den Zeitraum eines Kalenderjahres,
- in Kacheln von 250 m × 250 m,
- im amtlichen Höhenbezug (Kap. 2.3)

ausgewiesen werden. Im ersten Schritt erfolgt für jeden PSI-Punkt eine Zeitreihenanalyse. Hierzu werden die PSI-Zeitreihen entsprechend auf ein Kalenderjahr zugeschnitten. Um eine statistisch stabile Schätzung der linearen Deformation zu erhalten, wird die Zeitreihe um ± 6 Monate erweitert. Somit ergibt sich ein Auswertezeitraum von insgesamt 24 Monaten, im Gegensatz beispielsweise zur Langzeitbetrachtung von Esch et al. (2019), die auf Basis der SBAS-Auswertemethode zur Lagerung ebenfalls Nivellementdaten nutzen.

Die Ermittlung der Höhenänderung für das Kalenderjahr erfolgt mit einer Parameterschätzung für die Funktion

$$f(t) = a_0 + a_1 * (t - t_0) + A * \sin((t - t_0) * \pi / 2\lambda).$$

Geschätzt werden die Polynomfaktoren sowie die Amplitude und die Nullstelle der harmonischen Schwingung mit einer festen Phasenlänge von $\lambda = 365,25$ Tagen. Die Schätzung des Jahresganges dient der Abspaltung systematischer Einflüsse. Die gesuchten Höhenänderungen der PSI eines Kalenderjahres leiten sich aus dem linearen Polynomfaktor a_1 ab.

Im zweiten Schritt erfolgt eine räumliche Datenbereinigung, die den Einfluss grob fehlerhafter PSI-Zeitreihen auf das Kachelergebnis minimiert. Hierzu werden innerhalb einer Kachel die Höhenänderungsdifferenzen der PSI zu ihrem Mittelwert gebildet. Als Schwellwert für einen statistischen Ausreißer gilt das Dreifache der Standardabweichung (3-Sigma-Grenze).

Nachdem die PSI-Daten analysiert, bereinigt und die Höhenänderungen gemittelt wurden, findet eine Signifi-

fikanzprüfung statt. Kacheln, die nicht ausreichend gestützt werden (weniger als 3 PSI-Punkte) oder nicht signifikant sind, werden für den weiteren Prozess verworfen und erhalten trotz vorhandener PSI-Punkte keine Höhenänderungswert (Abb. 4). Am Beispiel des Testgebiets handelt es sich dabei um rund 15 % der Kacheln.

2.3 Qualitätsmanagement

Für die Bereitstellung der Ergebnisse des Bodenbewegungskatasters als amtliches Produkt der Landesvermessung folgen zwei Prozesse des Qualitätsmanagements (Abb. 2). Hierzu werden die Kachelergebnisse der vorgenannten Verarbeitung segmentweise im amtlichen Raumbezug gelagert (Q1) und anschließend anhand terrestrischer Referenzdaten validiert (Q2).

Zur Lagerung der Segmente im amtlichen Raumbezug (Q1) werden nur die Höhenfestpunkte ohne anthropogen verursachte Höhenänderungen genutzt, also die Höhenfestpunkte außerhalb der Bodenbewegungsgebiete (Abb. 1). Dies erfolgt über Schätzung der Anpassungsparameter (Translation und zwei Rotationen) einer Korrekturebene. Zusätzlich werden die Klaffungen in den Überlappungsbereichen der Segmente bei der Parameterschätzung berücksichtigt. Dadurch, dass sich alle Höhenwerte im Höhenfestpunkt nachweis auf das DHHN2016 beziehen, werden ausschließlich nicht anthropogen verursachte Höhenänderungen zwischen den Messeepochen von 2008 und 1984 berücksichtigt, dargestellt in Feldmann-Westendorff et al. (2016, S. 361, Abb. 5).

Ein Hypothesentest prüft die Höhenänderungen der Höhenfestpunkte (im DHHN2016), ggf. auch mehrere in einer Kachel, gegen die Höhenänderung der Kacheln der PSI-Auswertung. Nach diesem Ansatz werden im Testgebiet insgesamt 531 Kacheln zur Lagerung im amtlichen Raumbezug ermittelt. Die Abb. 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Differenzen aus dem Höhenfestpunkt nachweis und den Kacheln des Bodenbewegungskatasters.

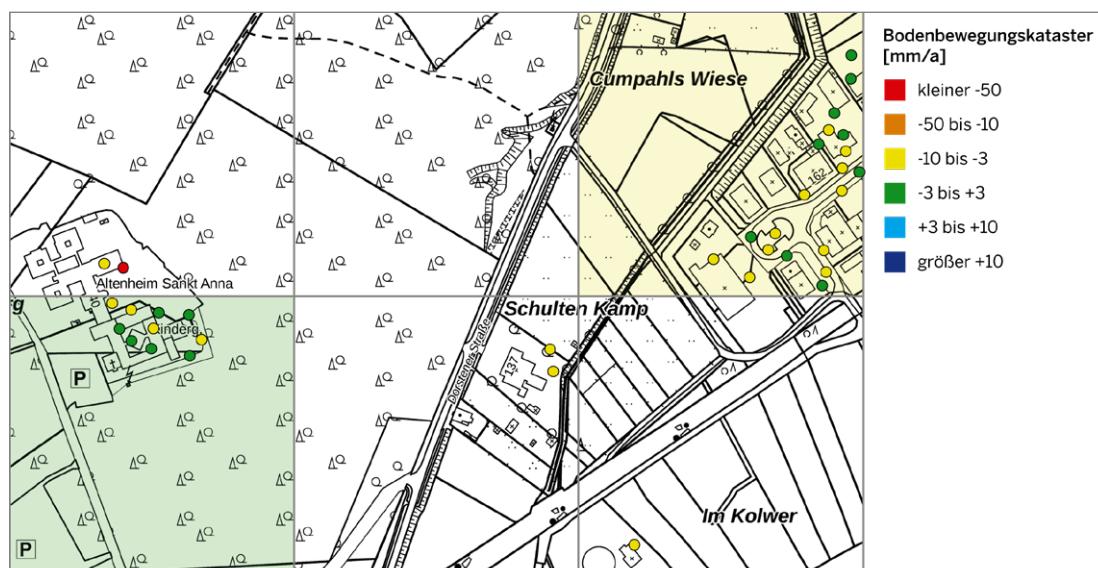


Abb. 4:
Beispielhafte
Überführung
der PSI-Punkte
in das Kachel-
modell

Q1 Die Überführung in den amtlichen Raumbezug (geodätisches Datum) wird durch die Ermittlung einer Korrekturebene je Segment gewährleistet. Hierbei werden auch Klaffungen redundanten Höhenänderungen in den Überlappungsbereichen der Segmente berücksichtigt. Landesweit stehen 4.695 Höhenfestpunkte als Referenz für Q1 zur Verfügung.

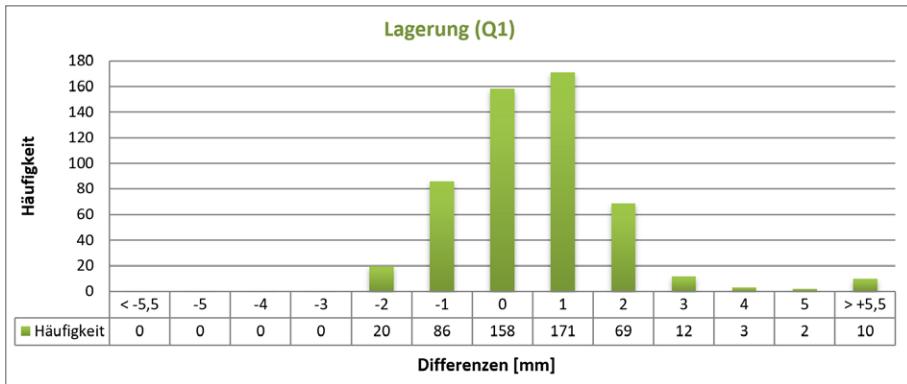


Abb. 5: Histogramm der Differenzen aus dem Höhenfestpunkt nachweis und BBK

Diese Restklaffungen dienen als Qualitätskriterium und beschreiben in einer ersten Näherung die Richtigkeit der radarinterferometrisch bestimmten Kachelergebnisse.

Kacheln, deren Höhenänderungen mehr als ± 3 mm von den Höhenänderungen aus dem Höhenfestpunktfeld abweichen, werden nicht als Referenz verwendet. Für das Testgebiet sind 15 solcher Kacheln mit einer Abweichung größer +3 mm detektiert und von der Lagerung ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Korrekturebene werden an die Höhenänderungen der Kacheln angebracht und liefern damit die endgültigen Werte für das Bodenbewegungskataster. Diese werden im Laufe der Prozesskette in einem zweiten

Qualitätsschritt durch weitere terrestrische Referenzdaten validiert (Abb. 2).

Zur Validierung (Q2) des Bodenbewegungskatasters NRW liegen in den Gebieten, die von Deformationen anthropogenen Ursprungs betroffen sind, hochgenaue terrestrische Referenzdaten des Leitnivelllements vor, die bisher in Wiederholungsintervallen von 2 bis 6 Jahren erhoben werden (Kap. 3). Die Abb. 6 zeigt die Gegenüberstellung der beiden unabhängigen Messmethoden am Beispiel eines Senkungsgebiets bei Kirchhellen.

Entsprechend der Produktspezifikation (Kap. 2.2) des Bodenbewegungskatasters NRW repräsentiert die PSI-Zeitreihe (November

2014 bis Oktober 2016) den Zeitraum von April 2015 bis April 2016. Die zur Validierung verwendeten Punkte des Leitnivelllements beziehen sich auf die Messeepochen Mai 2014 und April 2016. Die Zeitreihen beider Messmethoden werden durch Polynome 1. Grades approximiert.

Für das gesamte Testgebiet können 532 Kacheln für die Validierung der Höhenänderungen im Bodenbewegungskataster NRW durch die dortigen Leitnivelllements ermittelt werden. Die methodisch bedingten gering unterschiedlichen Beobachtungszeiträume, Beobachtungsergebnisse und deren Modellierung und Aggregierung müssen bei der Wertung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Diese fließen in die Differenzbildung mit ein und

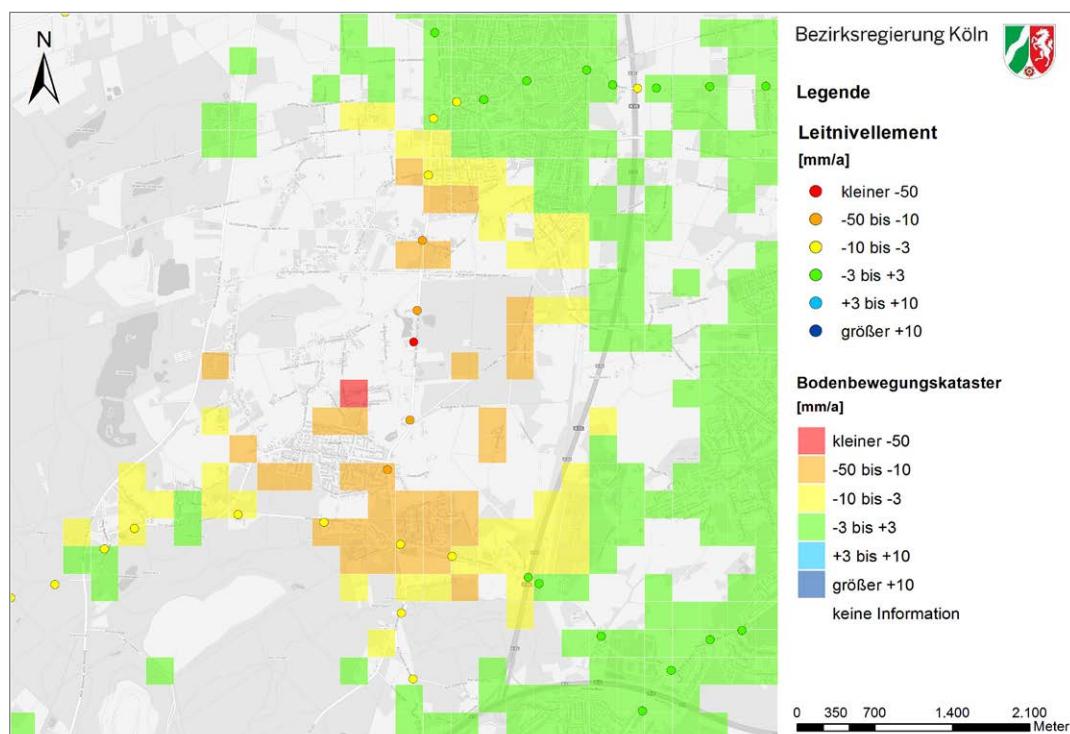


Abb. 6:
Validierung (Q2)
am Beispiel der
Vertikalbewegun-
gen im Senkungs-
gebiet bei Kirch-
hellen

sind als Histogramm in Abb. 7 dargestellt.

Die Häufigkeitsverteilung zeigt die überwiegend geringen Abweichungen zwischen den beiden unabhängigen Messmethoden. Im Mittel liegt diese bei $-1,1$ mm, mit einer Standardabweichung von $2,3$ mm.

Auffällig sind zum einen die groben Abweichungen am oberen und unteren Ende der Verteilung. Dabei handelt es sich überwiegend um Bereiche in den Senkungsschwerpunkten des Bergbaus. Diese können aufgrund der sensorspezifischen Parameter nicht fehlerfrei durch die Radarinterferometrie erfasst werden. Zum anderen fällt der Anstieg der negativen Differenzen im Bereich von -3 mm bis -5 mm auf, der auf eine tendenzielle Unterschätzung durch die Radarinterferometrie hinweist. Dies lässt sich teilweise auf die Umrechnung der LOS-Änderungen in Höhenänderungen zurückführen (Kap. 1).

Insgesamt zeigt die Verteilung jedoch eine gute Übereinstimmung mit den terrestrischen Referenzdaten und bestätigt damit die Ergebnisse der Radarinterferometrie.

2.4 Präsentation

Das künftige Bodenbewegungskataster NRW soll als Web-Dienst öffentlich zugänglich gemacht werden (Abb. 8). Kernelement der Darstellung sind die $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ großen Kacheln. Eine Darstellung der einzelnen PSI-Punkte erfolgt nicht. Damit wird die Quelle einer möglichen Fehlinterpretation ausgeschlossen (nicht repräsentative PSI) und durch die kachelweise generalisierte Darstellung wird dem Datenschutz Rechnung getragen. Diese



Abb. 8:
Symbolbild
für Web-
Dienst des
Boden-
bewegungs-
katasters
NRW

Q2

Die Validierung des Bodenbewegungskatasters erfolgt auf Basis der Kacheln und anhand terrestrischer Referenzdaten aus den Leitnivellelementen. Hierzu werden beide Datenbestände durch Polynome 1. Grades approximiert und die Übereinstimmung ihres zeitlichen Bewegungsverhaltens wird geprüft.

In den Bodenbewegungsgebieten NRW kann durch Nutzung der amtlichen Daten der Landesvermessung eine von Q1 unabhängige Qualitätskontrolle durchgeführt werden. Landesweit stehen durch die Leitnivellelemente für 7.292 Höhenfestpunkte (Stand 2019) Zeitfolgen bereit.

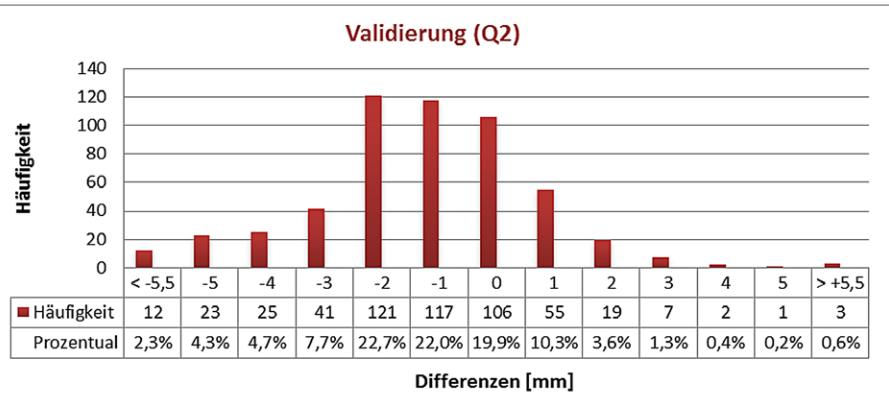


Abb. 7: Histogramm der Differenzen aus dem Leitnivellelement und BBK

Beschränkung bestimmt auch die Interpretierbarkeit der Darstellung. Somit sind Bereiche mit oder ohne Bodenbewegung identifizierbar, die Beträge der Bewegungen sind in Klassen aggregiert (siehe Legenden der Abb. 4 und Abb. 6), jedoch sind keine objektscharfen Aussagen ableitbar.

Der Web-Dienst des Bodenbewegungskatasters NRW soll auf frei wählbarer Kartenbasis die Kacheln mit hinreichender Informationsgrundlage farblich kodiert darstellen. Bereiche ohne signifikante Höhenänderung (kleiner ± 3 mm pro Jahr) werden in grün dargestellt. Dieser Wertebereich berücksichtigt die erreichbare Genauigkeit des Verfahrens und ist in Analogie zu den Abgrenzungen von Bodenbewegungsgebieten gewählt, die ihrerseits auf Grundlage der Leitnivellelemente definiert werden. Die weitere Farbklassenwahl zeigt die signifikanten Hebungen (blau) und Senkungen (gelb und rot) unterschiedlicher Größenordnungen. Ergänzend zu der farbigen Flächendarstellung wird es die Möglichkeit der Sachdatenabfrage geben. Diese liefert neben einer eindeutigen Bezeichnung der Kachel qualitätsbestimmende Kriterien wie die Anzahl der verwendeten PSI-Punkte und ein Maß zur Streuung innerhalb der Kachel.

3 Integration der Erhebungsverfahren

3.1 Erhebungsmethoden

Neben den Erhebungsmethoden des Nivellements und der Radarinterferometrie (InSAR) werden in der nordrhein-westfälischen Landesvermessung GNSS-Messungen,

Tab. 1: Gegenüberstellung der Beobachtungsmethoden in der Landesvermessung NRW

	Nivellement	GNSS	ALS	Digitalisierung	BBK
Flächendeckung	punktuell	punktuell	100 %	100 %	> 40 %
Epochenlänge	mehrere Jahre	mehrere Jahre	mehrere Jahre	einmalig 120 Jahre	Tage bis Jahre
Genauigkeit absolut/relativ	1–10 mm 3 mm/a	1–10 mm 3 mm/a	5–10 cm 5 cm/a	ca. 1 m –	– 3 mm/a
Kosten	hoch	hoch	mittel	mittel	niedrig

Airborne Laserscanning (ALS) und auch das Digitalisieren von Höheninformationen aus historischen Karten (Digitalisierung) zur Ableitung digitaler historischer Höhenmodelle als Erhebungsquellen genutzt. Ein Vergleich der Methoden einschließlich des Bodenbewegungskatasters (BBK) ist in Tab. 1 dargestellt. Ein ähnlicher »Methodenvergleich zur Erfassung von Bodenbewegungen« findet sich auch bei der Österreichischen Geodätischen Kommission (Österreichische Geodätische Kommission 2017).

3.2 Methodenmix: integrative Erhebung unter Nutzung verschiedener Beobachtungsmethoden

Die Landesvermessung hat ein Konzept zur Integration der verschiedenen Erhebungsmethoden (»Methodenmix«) erstellt und mit den anderen Akteuren in Nordrhein-Westfalen, insbesondere der Abteilung 6 der Bezirksregierung Arnsberg »Bergbau und Energie in NRW«, abgestimmt. Als Ergebnis werden ab 2020 die unterschiedlichen Erhebungsmethoden (terrestrisch und Fernerkundung) örtlich und zeitlich aufeinander abgestimmt. Die bisher teilweise enge zeitliche Folge der Leitnivelllements wird sukzessive auf einen einheitlichen fünfjährlichen Turnus ausgedehnt, während das ALS von einem sechsjährlichen auf einen fünfjährlichen Turnus verkürzt wird. Wie in Abb. 9 dargestellt, finden ab 2020 die Leitnivelllements und ALS-Befliegungen in den jeweiligen Gebieten im gleichen Jahr statt. Die Zeiträume zwischen diesen Beobachtungen sollen durch radarinterferometrische Daten in der Ausprägung des »Bodenbewegungskatasters NRW« überbrückt werden. Ziel ist es, jährlich radarinterferometrische Auswertungen für die Bodenbewegungsgebiete durchzuführen und die gesamte Landesfläche in einem noch zu bestimmenden Zyklus wiederkehrend auszuwerten.

Dieser neue integrative Ansatz verschiedener Beobachtungsmethoden stellt auf die jeweilige Stärke der einzelnen Verfahren ab. Er ermöglicht eine bessere Flächendeckung und die Kontinuität der Datenverfügbarkeit. Im Besonderen durch die Einbindung der Radarinterferometrie erwartet die Landesvermessung insgesamt auch wirtschaftliche Vorteile als Folge der Reduktion terrestrischer Nivelllements.

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen der Radarinterferometrie

Die Radarinterferometrie ermöglicht die räumliche und zeitliche Verdichtung der Höhenänderungsinformationen und bietet für die Aufgabenwahrnehmung der Landesvermessung somit ein großes wirtschaftliches Potenzial. Dieses Potenzial lässt sich durch Hochrechnung der Kosten für das Nivellement quantifizieren. Als Referenz dienen hierzu die Daten aus dem »Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD)« der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), welche der Bezirksregierung Köln im Rahmen einer Fallstudie zur Verfügung gestellt wurden.

Um eine Aussage über die räumliche Abdeckung der beiden punktuellen Messmethoden treffen zu können, erfolgt die Analyse auf Basis der Kacheln des Bodenbewegungskatasters. Die Kacheln bilden zugleich die Grundlage für eine quantitative Gegenüberstellung (Tab. 2). Die Tabelle zeigt die kachelbasierte Informationsdichte für die Auswertemethoden Nivellement und Radarinterferometrie (spaltenweise) sowie die unterschiedlichen Bodenbewegungsgebiete (zeilenweise).

Nach dem Ansatz des Bodenbewegungskatasters NRW liefert die Radarinterferometrie eine räumliche Informationsverdichtung um den Faktor 6 in den bekannten Bodenbewegungsgebieten sowie um den Faktor 33 für die Gesamtfläche von Nordrhein-Westfalen.

Im Rahmen des Methodenmix (Kap. 3.2) wird der zeitliche Wiederholzyklus des Nivellements von aktuell zwei bis sechs Jahren auf künftig fünf Jahre (ab 2020) ausge-

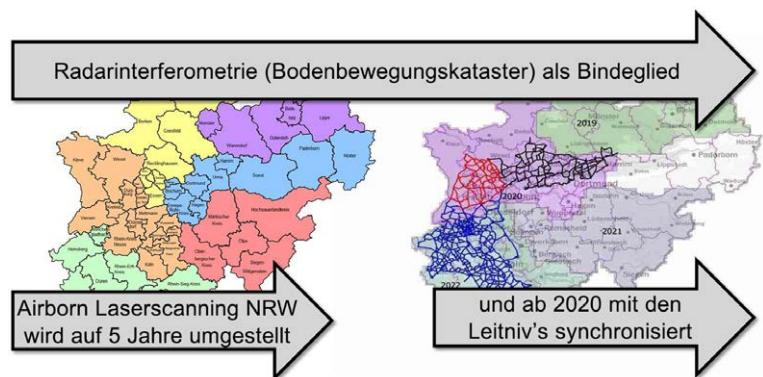


Abb. 9: Integrativer Ansatz zur Nutzung verschiedener Beobachtungsmethoden

Tab. 2: Gegenüberstellung der räumlichen Informationsdichte

Bodenbewegungsgebiete (BBG)	Kacheln [100 %]	Nivellement		Radarinterferometrie		Faktor
		Absolut	Relativ [%]	Absolut	Relativ [%]	
Ibbenbüren	632	80	12,7 %	401	63,4 %	5
Linker Niederrhein	5.194	389	7,5 %	3.170	61,0 %	8
Rheinisches Revier	26.927	2.473	9,2 %	11.207	41,6 %	5
Ruhrgebiet	7.771	314	4,0 %	5.096	65,6 %	16
BBG gesamt	40.343	3.259	8,1 %	19.623	48,6 %	6
NRW gesamt	549.539	6.874	1,3 %	233.517	42,5 %	33

dünnt. Die sich daraus ergebenden Kosteneinsparungen von rund 40.000 Euro pro Jahr (etwa 10 % der Gesamtkosten) bilden den tatsächlich erzielten wirtschaftlichen Mehrwert.

Darüber hinaus ergibt sich bei einer jährlichen Aktualisierung des Bodenbewegungskatasters eine zeitliche Informationsverdichtung um den Faktor 5. Die Radarinterferometrie liefert somit in den Bodenbewegungsgebieten eine insgesamt 30fach höhere räumliche (Faktor 6) und zeitliche (Faktor 5) Informationsdichte. Eine hypothetische Verdichtung des Nivellements würde Kosten von über 10 Millionen Euro bezogen auf fünf Jahre verursachen. Dies verdeutlicht das wirtschaftliche Potenzial der Radarinterferometrie.

5 Zusammenfassung

Mit dem Bodenbewegungskataster NRW weist die Vermessungsverwaltung die grundsätzliche Eignung der Beobachtungsmethode Radarinterferometrie zur Detektion und zum Monitoring großräumiger Vertikalbewegungen nach. Als Ergebnis wird ein neues Produkt der Landesvermessung NRW im Rahmen der gesetzlichen Aufgaben definiert. Basierend auf den terrestrischen Referenzdaten der Landesvermessung werden mehrere und neuartige Ansätze zur Qualitätssicherung eines amtlichen Produktes abgeleitet und bewertet. Es lassen sich qualitative und quantitative Rückschlüsse zum Potenzial der Messmethode der Radarinterferometrie ableiten.

Für die Ableitung der Grenzen der aktuellen Bodenbewegungsgebiete werden in Nordrhein-Westfalen Bewegungsraten von ± 3 mm/a als signifikant angesehen. Im Bodenbewegungskataster NRW wird das Überschreiten dieser Grenze von ± 3 mm/a auch für eine aus Radardaten abgeleitete signifikante Bewegungsrate bestätigt. Nach den vorliegenden Ergebnissen ist eine noch bessere Auflösung nicht erreichbar, sodass beispielsweise geologische Hebungen, z.B. die der Eifel (Klein et al. 2016), mit der Messmethode der Radarinterferometrie eher nicht nachweisbar sind.

Das Potenzial der Radarinterferometrie liegt gegenüber dem Nivellement vor allem in der räumlichen und zeitlichen Verdichtung der Höhenänderungsinformationen.

Das Bodenbewegungskataster NRW belegt eine räumliche Informationsdichte von über 40 % aller Kacheln für Nordrhein-Westfalen, eine Informationsverdichtung im Vergleich zum Nivellement um den Faktor 6 in den Bodenbewegungsgebieten sowie um den Faktor 33 für ganz Nordrhein-Westfalen. Als Ergebnis führt die Landesvermessung ein Konzept zur Integration der verschiedenen Beobachtungsmethoden ein und zielt mit diesem »Methodenmix« auf die jeweilige Stärke der einzelnen Verfahren ab.

Es zeichnet sich ab, dass sich die Nutzung der Radarinterferometrie im geodätischen Raumbezug etablieren wird.

Literatur

- Busch, W. (2019): Radarinterferometrische Erfassung von Bodenbewegungen mit Sentinel-1-Daten – Eine vermessungstechnische Aufgabe?. Frühjahrsveranstaltung des DVW NRW e.V. 2019. www.dvw.de/sites/default/files/landesverein-nrw/anhang/archiv/2019-05-07-II_Bodenbewegungen_mit_Sentineldaten-Busch.pdf, letzter Zugriff 09.10.2019.
- Esch, C., Köhler, J., Gutjahr, K., Schuh, W.-D. (2019): 25 Jahre Bodenbewegungen in der Niederrheinischen Bucht – Ein kombinierter Ansatz aus D-InSAR und amtlichen Leitnivellelementen. *zfv* 3/2019, 144. Jg., 173–186. DOI: 10.12902/zfv-0257-2019.
- Feldmann-Westendorff, U., Liebsch, G., Sacher, M., Müller, J., Jahn, C.-H., Klein, W., Liebig, A., Westphal, K. (2016): Das Projekt zur Erneuerung des DHHN: Ein Meilenstein zur Realisierung des integrierten Raumbezugs in Deutschland. *zfv* 5/2016, 141. Jg., 354–367. DOI: 10.12902/zfv-0140-2016.
- Heitmann, S., Hovekamp, A., Klein, W., Mengede, S., Musiedlak, J. (2012): Die Ermittlung von Bodenbewegungsgebieten in Nordrhein-Westfalen. *NÖV NRW* 2/2012, 24–27.
- Klein, W., Krickel, B., Riecken, J., Salamon, M. (2016): Eine interdisziplinäre Betrachtung der vertikalen Bodenbewegungen in der Eifel. *zfv* 1/2016, 141. Jg., 27–34. DOI: 10.12902/zfv-0103-2015.
- Österreichische Geodätische Kommission (2017): Methodenvergleich zur Erfassung von Bodenbewegungen. www.oegk-geodesy.at/projekte/bodenbewegung/Beilage1.pdf.
- Riecken, J., Busch, W. (2015): Bodenbewegungskataster – Implementierungsansatz eines künftigen Produktes der Landesvermessung NRW. Tagungsband GeoMonitoring 2015, 15–24.

Kontakt

Dr.-Ing. Jens Riecken | Dr.-Ing. Bernd Krickel | M.Sc. Vincent Gefeller | Dipl.-Ing. Peter Reifenrath
Bezirksregierung Köln, Dezernat 71 – Datenstandards, Raumbezug
50606 Köln
raumbezug@bezreg-koeln.nrw.de