

# Bodenbewegungsmonitoring im geodätischen Raumbezug

## Geodetic Spatial Reference: The Monitoring of Ground Movements

Jens Riecken, Bernd Krickel

Mit der Einführung des „Raumbezug 2016“ hat sich die ganzheitliche, integrierte Betrachtung des geodätischen Raumbezugs in der Praxis durchgesetzt. Der Arbeitskreis Raumbezug der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat diesen Ansatz in das Zentrum seiner Richtlinie für den geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland – kurz: Rili-RB-AdV – gestellt. Mit ihr wird die Produktsicht als Grundlage für ein transparentes Qualitätsmanagement beschrieben. Als Baustein zur Qualitätssicherung soll in der vorliegenden Arbeit insbesondere die „neue“ Messmethode der Radarinterferometrie für das Bodenbewegungsmonitoring bewertet werden. Es wird aufgezeigt, wie diese Messmethode klassische terrestrische Messmethoden zumindest ergänzen und in Teilen auch ablösen kann.

**Schlüsselwörter:** Integrierter geodätischer Raumbezug, Qualitätsmanagement, Bodenbewegungen, Radarinterferometrie

*Professional understanding of official geodetic spatial reference in Germany has changed. Today we speak of the “integrated geodetic spatial reference” as holistic conception of the geometrically and physically defined components. AdV-working group “spatial reference” has placed this approach in the center of its new policy for the geodetic spatial reference of official surveying in Germany. In addition, special attention is dedicated to the quality assurance of the reference framework, which is realized by the unified field of geodetic control points. In the present work the “new” measuring method of radar interferometry for ground motion monitoring shall be evaluated. It will be shown that this measuring method can at least supplement and partly replace classical terrestrial measuring methods.*

**Keywords:** Integrated Geodetic Spatial Reference, quality management, ground movements, radar interferometry

## 1 GEODÄTISCHER RAUMBEZUG

### 1.1 Raumbezug 2016

Mit der Einführung des Raumbezugs 2016 hat sich die ganzheitliche, integrierte Betrachtungsweise der geometrisch und physikalisch definierten Komponenten Lage, 3D-Position, Höhe bzw. geopotenzielle Kote und Schwere in Deutschland in der Praxis durchgesetzt. Mit ihr steht eine bestmögliche amtliche Georeferenz zur Verfügung. Sie dient als Nullmessung eines künftigen Monitorings, sie ist Bezugsrahmen für die Qualitätssicherung und hat noch unerschlossenes Potenzial, beispielsweise für Zwecke des inter-

disziplinären Geo-Monitorings. Der Arbeitskreis Raumbezug der AdV hat diese Gesichtspunkte in das Zentrum seiner Richtlinie für den geodätischen Raumbezug des amtlichen Vermessungswesens in Deutschland (Rili-RB-AdV) /AdV 2017/ gestellt. Mit ihr wird die Produktsicht als Grundlage für ein transparentes Qualitätsmanagement festgeschrieben.

Das AdV-Projekt „Wiederholungsmessungen im Deutschen Haupthöhennetz (DHHN)“ bildet die messtechnische Grundlage für dieses neue Verständnis vom geodätischen Raumbezug. Im integrativen Ansatz wurden die Präzisionsnivellements im DHHN ergänzt

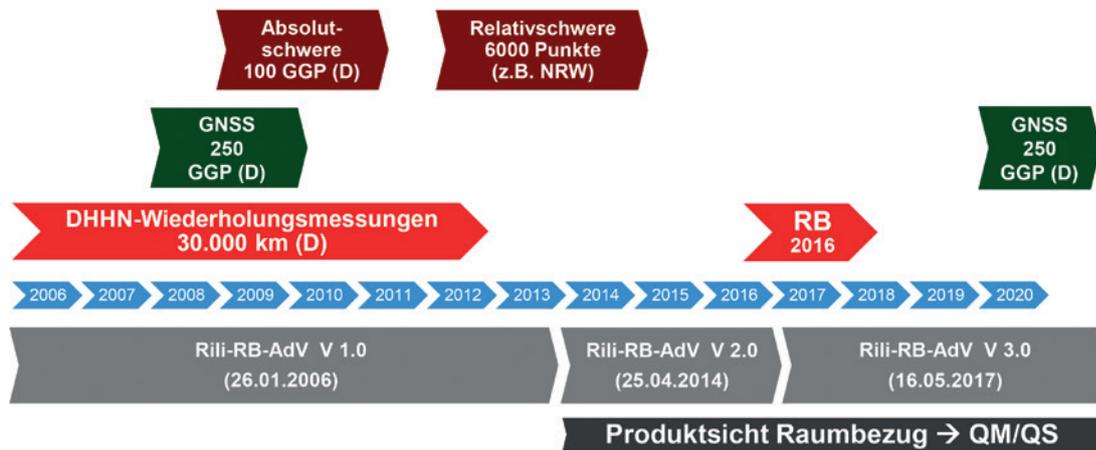


Abb. 1 | Produktsicht und Qualitätssicherung im geodätischen Raumbezug

durch GNSS- und Absolut-schweremessungen. Darüber hinaus wurde seit 2012 die Datengrundlage für das Quasigeoid kontinuierlich verbessert (Abb. 1). Der Raumbezug 2016 stellt aus messtechnischer und wissenschaftlicher Sicht eine bestmögliche Georeferenz zur Verfügung. Auf die Beweggründe, das DHHN zwischen den Jahren 2006 und 2012 neu zu messen, soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Es wird auf die ausführlichen Darstellungen in /Feldmann-Westendorff et al. 2016/ verwiesen.

Mit dem Raumbezug 2016 steht heute ein weltweit einmaliger geodätischer Bezugsrahmen für die Qualitätssicherung und für das Monitoring von Bewegungen zur Verfügung.

Auf dieser Basis und konform zur Rili-RB-AdV wird die GNSS-Kampagne 2020 als periodische Wiederholungs- beziehungsweise Kontrollmessung auf den 250 Punkten des Geodätischen Grundnetzes durchgeführt. Mit der GNSS-Kampagne 2020 wird gleichzeitig der periodische Ansatz der Qualitätssicherung durch Wiederholungsmessungen um einen Ansatz zur kontinuierlichen Qualitätssicherung durch das zurzeit im Aufbau befindliche Referenzstationsnetz-Monitoring ergänzt (Abb. 2). Ziel ist es, für die SAPOS- und GREF-Referenzstationen ein Nahe-Echtzeit-Koordinatenmonitoring zu realisieren. Dadurch, dass vor der GNSS-Kampagne 2020 bundesweit eine ausreichende Anzahl von SAPOS-

Referenzstationen als Bodenpunkte ausgelegt werden, wird gleichzeitig eine Verzahnung zum Geodätischen Grundnetz sichergestellt. Mit dem Referenzstationsnetz-Monitoring wird dann der Einstieg in eine kontinuierliche Qualitätssicherung der geodätischen Infrastruktur möglich. Die GNSS-Kampagne 2020 ist als Bindeglied zwischen periodischer und kontinuierlicher Qualitätssicherung entscheidend für die Nachhaltigkeit der geodätischen Infrastruktur. Dieses wäre auch vor dem Hintergrund der sich abzeichnenden sicherheitskritischen Massenmarktanwendungen, zum Beispiel die des autonomen Fahrens, anzustreben.

Dieser Ansatz hat hinsichtlich der Konzeption das Potenzial zum „Einstieg in den Ausstieg klassischer terrestrischer Messungen im geodätischen Raumbezug“ (Abb. 2). Die Anfänge dieser Entwicklung gehen zurück auf die Etablierung des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) mit dem Ergebnis der Aufgabe der klassischen Festpunktfelder.

Vom „Einstieg in den Ausstieg klassischer terrestrischer Messungen im geodätischen Raumbezug“ kann auch deshalb gesprochen werden, da die Radarinterferometrie als Fernerkundungsmethode klassische terrestrische Messmethoden zumindest ergänzen und in Teilen auch ablösen könnte. Dieser Gesichtspunkt soll im Folgenden näher untersucht werden.

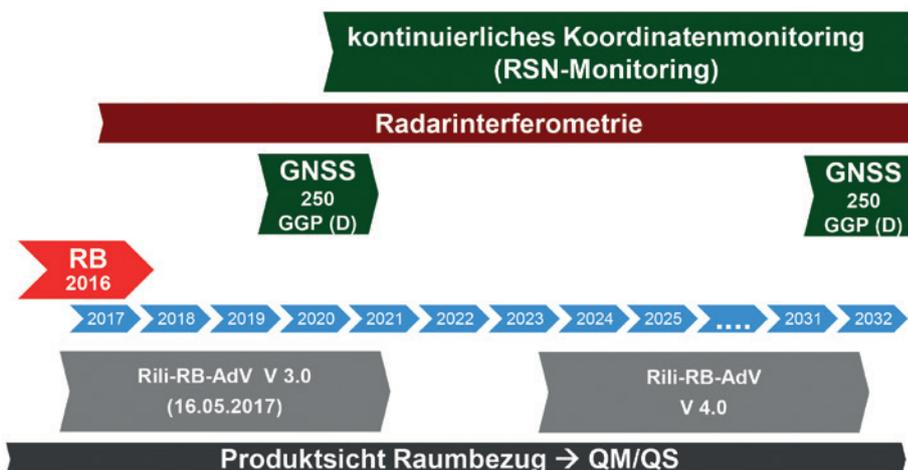


Abb. 2 | Qualitätsmanagement „2020+“ im geodätischen Raumbezug

## 1.2 BODENBEWEGUNGEN UND DESSEN MONITORING AM BEISPIEL VON NRW

In Nordrhein-Westfalen bewirken insbesondere der Steinkohlebergbau und der Braunkohletagebau großflächige, anthropogen verursachte Bodenbewegungen mit unmittelbaren Auswirkungen auf den geodätischen Raumbezug. In den folgenden Darstellungen werden Bodenbewegungen als reine Vertikalbewegungen betrachtet, auch wenn die anthropogen verursachten Bewegungen in der Realität auch horizontale Komponenten aufweisen können, die dann auch im Liegenschaftskataster nachweisbar und zu berücksichtigen sind.

Als Teil des gesetzlichen Auftrags der Landesvermessung werden seit den 1970er-Jahren die sogenannten Leitnivellements (Präzisionsnivellements) zur Überwachung von Vertikalbewegungen und zur Aktualisierung von Höhen in den durch Bergbautätigkeit verursachten Bodenbewegungsgebieten durchgeführt /Heitmann et al. 2012/. *Abb. 3* zeigt die betroffenen Bodenbewegungsgebiete und die Wiederholungszyklen der Leitnivellements.

## 2 RADARINTERFEROMETRIE – DAS POTENZIAL DER „NEUEN“ MESSMETHODE FÜR DEN GEODÄTISCHEN RAUMBEZUG

### 2.1 Bodenbewegungskataster NRW

Im Bodenbewegungskataster NRW wird die Vermessungsverwaltung den Nutzen der Fernerkundungsmethode Radarinterferometrie zur Detektion und zum Monitoring großräumiger Vertikalbewegun-

gen aufzeigen. Als Ergebnis wird ein neues Produkt der Landesvermessung NRW im Rahmen der gesetzlichen Aufgaben definiert. Die Entwicklung wird vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als Teil der nationalen Copernicus-Projekte gefördert. Mit dem Bodenbewegungskataster NRW werden die Schnittstelle zwischen Datenquelle/Fernerkundung (Sentinel-1A/1B-Satelliten) und Datenveredlung (Landesvermessung) sowie die damit zugehörigen Prozesse der „Erhebung – Qualifizierung – Weiterverarbeitung – Präsentation“ definiert.

Basierend auf den terrestrischen Referenzdaten der Landesvermessung sollen mehrere und neuartige Ansätze zur Qualitätssicherung eines amtlichen Produkts im Raumbezug 2016 abgeleitet und bewertet werden /Riecken & Busch 2015/.

### 2.2 Bewertung der Radarinterferometrie für den geodätischen Raumbezug

Für das Bodenbewegungskataster NRW wurden seitens der Landesvermessung NRW radarinterferometrische Beobachtungen in Form von PSI-Werten (Persistent Scatterer Interferometry) von Sentinel-1A in vier großräumigen Segmenten (45 km × 45 km) für einen Bereich „linker Niederrhein/Ruhrgebiet“ verarbeitet, die durch die TU Clausthal vorprozessiert wurden. Das gesamte Testgebiet in den vier Segmenten ist in *Abb. 4* dargestellt.

Jedes Segment bezieht sich auf einen individuellen Referenzpunkt. Die Segmente haben jeweils einen Überlappungsbereich von 15 km. Die Gesamtfläche beträgt rund 75 km × 75 km. Durch die Landesvermessung NRW erfolgt die Zusammenfassung der Beobachtungen in Kacheln mit Diskretisierungsintervallen von

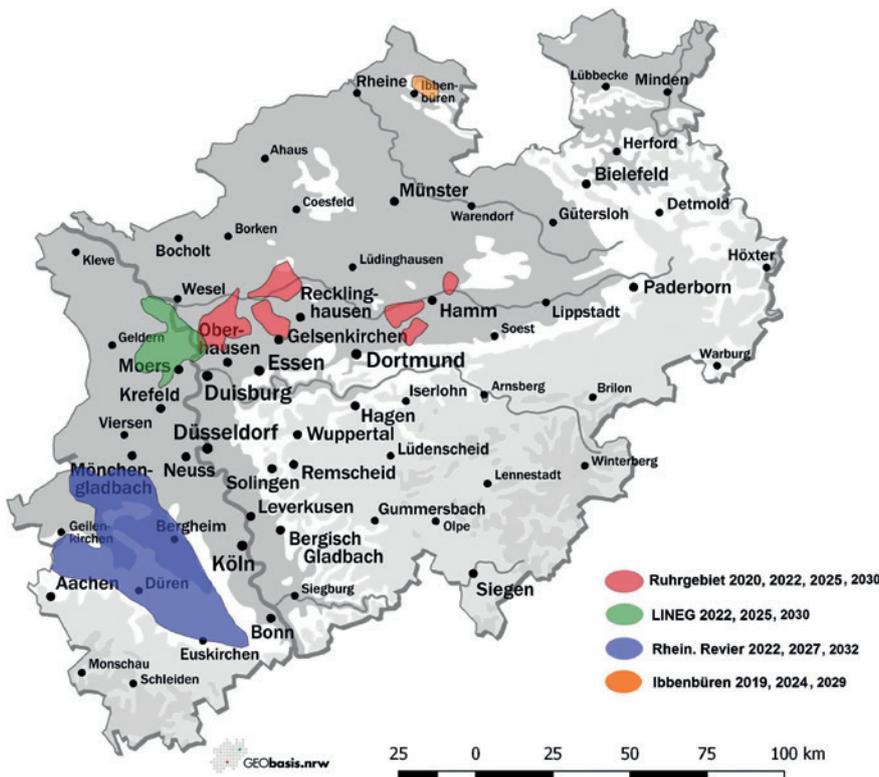


Abb. 3 | Monitoring der Bodenbewegungsgebiete in NRW (Leitnivellement)

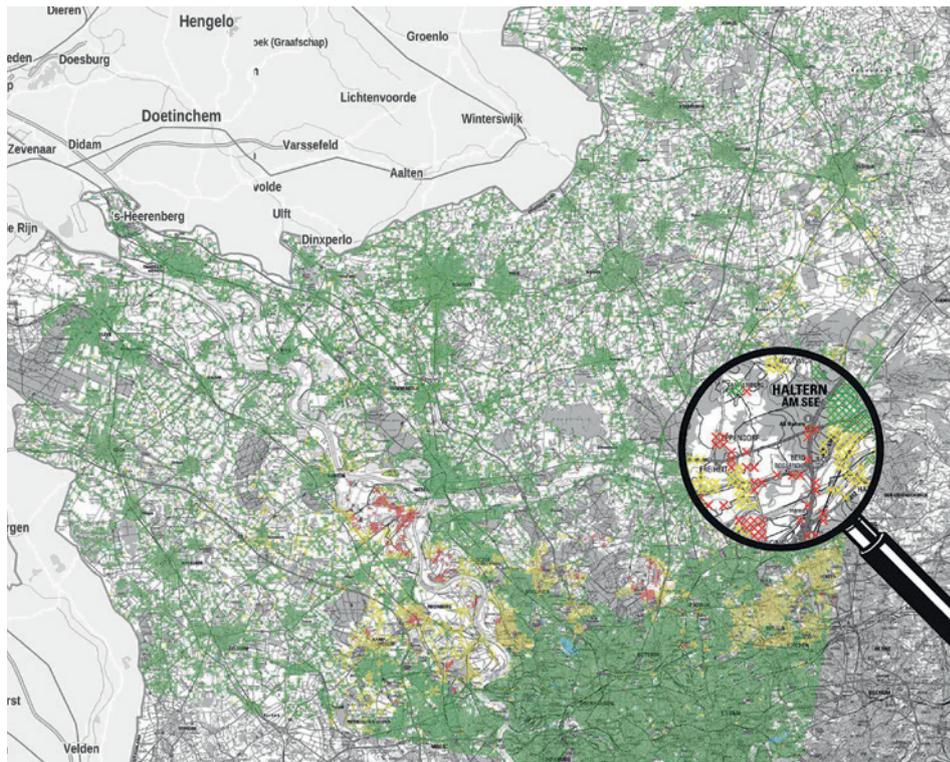


Abb. 4 | Bodenbewegungen im Testgebiet „linker Niederrhein/Ruhrgebiet“ in Millimeter/Jahr

250 m × 250 m und einem zeitlichen Auswertintervall von 1 Kalenderjahr (zuzüglich jeweils ½ Jahr Vor- und Nachlauf der Datenreihen). Dieser Schritt entspricht einer örtlichen und zeitlichen Generalisierung. Innerhalb der Kacheln erfolgt die statistische Bewertung mittels Signalanalyse, verbunden mit einer Ausreißererkennung. Kacheln mit weniger als zwei Beobachtungen (siehe Beispiele in Abb. 5) werden nicht weiter betrachtet.

Die so verworfenen Beobachtungen betragen rund 15 % der Gesamtbeobachtungen. Als Ergebnis liegen für rund 30 % aller Kacheln abgeleitete (generalisierte) Bewegungsraten vor. Die Radarinterferometrie liefert damit einen signifikanten Informations-

gewinn zu den „wenigen“ Informationen der Punkte des Nivellments (vgl. auch Abb. 6).

Die Zusammenführung der vier Segmente im Testgebiet erfolgt über eine Ausgleichung der redundanten Beobachtungen in den Überlappungsbereichen der Segmente bei gleichzeitiger Überführung in den amtlichen geodätischen Raumbezug (Matching-Prozess). Für diesen Matching-Prozess werden bekannte stabile Höhenfestpunkte des DHHN2016 als Soll-Werte genutzt. Dieses ist der erste Qualitätssicherungsschritt im Bodenbewegungskataster NRW:

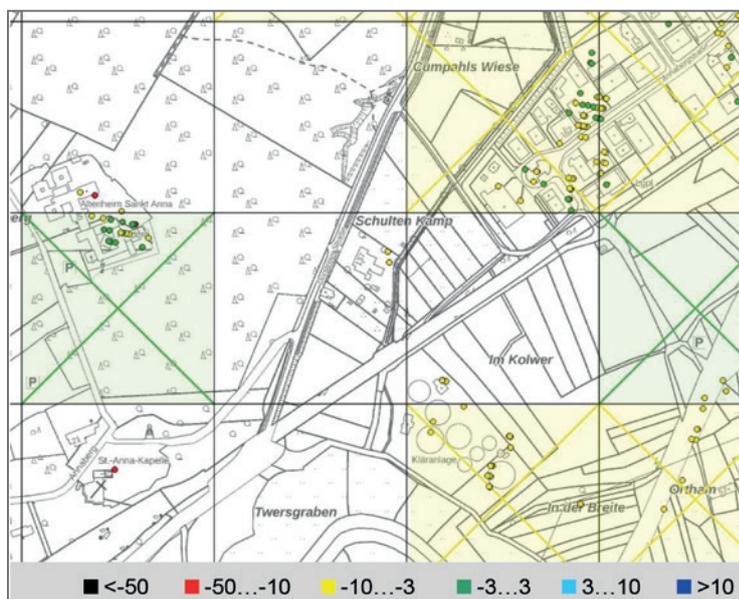


Abb. 5 | Kachelstruktur mit örtlicher Verteilung der PSI-Werte und der daraus abgeleiteten (generalisierten) „Kachelbewegung“ in Millimeter/Jahr

- Q1: Die Überführung in den amtlichen Raumbezug (geodätisches Datum) wird gewährleistet durch die Neulagerung der Segmente inklusive einer Homogenisierung der Übergänge und eines Matching der Segmente unter Nutzung von Zeitfolgen der Höhenfestpunkte des amtlichen Raumbezugs im DHHN2016.

Als Ergebnis zeigt *Abb. 6* sehr gut die bekannten drei Bodenbewegungsgebiete des Bergbaus am linken Niederrhein und im Ruhrgebiet. Grundsätzliche Aussagen zu großräumigen Bodenbewegungen lassen sich folglich mit der Beobachtungsmethode der Radarinterferometrie gewinnen.

Als zweites Alleinstellungsmerkmal des vorliegenden Projekts „Bodenbewegungskataster NRW“ wird ein weiterer Qualitätssicherungsschritt ausgeführt, der gleichzeitig die qualitative Bewertung der Beobachtungsmethode der Radarinterferometrie ermöglicht:

- Q2: Die zweite Qualitätssicherung bzw. Qualitätskontrolle erfolgt durch einen unabhängigen Vergleich mit Referenzdaten der Landesvermessung, konkret mit Ergebnissen des Leitnivelements, die als Vergleichs-Sollwerte im Sinne von unabhängig terrestrisch bestimmten Bodenbewegungen dienen.

*Abb. 6* zeigt deutlich diesen Sachverhalt. Der Vergleich mit unabhängigen terrestrischen Referenzwerten bestätigt die erwartete Präzision der radarinterferometrischen Daten von Sentinel-1A. Aus geodätischer Sicht der Landesvermessung bestätigt sich das Potenzial der Fernerkundung zur Ergänzung und zum Teil auch als Ersatz zu terrestrischen Messungen.

Eine Voraussetzung für das aufgezeigte Vorgehen (Q2) ist das Vorliegen von Soll- und Ist-Werten, also von terrestrischen Leitnivelements und PSI-Daten im gleichen Beobachtungszeitraum. Im vorliegenden Beispiel der *Abb. 6* liegen PSI-Werte zwischen 4/2015 und 4/2016 vor, während sich die Leitnivelements auf 5/2014 und 4/2016 beziehen. Eine bessere Datenbasis ist nicht zu erwarten und wahrscheinlich wegen der in Kapitel 1.2 geschilderten Ausgangslage in NRW eine (weltweit) einmalige Datenbasis.

Durch die aufgezeigten Qualitätssicherungsschritte können als Ergebnis qualitative Aussagen zur Genauigkeit des Verfahrens getroffen werden. Vielfach wird eine Genauigkeit vergleichbar der des terrestrischen Nivellements erreicht. Hierzu erfolgen gegenwärtig noch vertiefte Untersuchungen.

Die Radarinterferometrie hat somit das Potenzial zum Monitoring von Vertikal-Bodenbewegungen, also auch der Ableitung von Bodenbewegungsgebieten, bei gleichzeitiger räumlicher Verdichtung der Datenbasis des Leitnivelements. Für die Ableitung der Grenzen der aktuellen Bodenbewegungsgebiete werden in Nordrhein-Westfalen Bewegungsraten von  $\pm 3$  mm/a als signifikant angesehen /Heitmann et al. 2012/. Im Bodenbewegungskataster NRW wird das Überschreiten dieser Grenze von  $\pm 3$  mm/a auch für eine aus Radar-daten 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. Auch hierzu erfolgen gegenwärtig noch vertiefte Untersuchungen.

### 3 KÜNFTIGE INTEGRATION DER ERHEBUNGSVERFAHREN IN NRW

#### 3.1 Erhebungsmethoden

Neben dem bereits adressierten Erhebungsmethoden des Nivellements und der Radarinterferometrie werden in der nordrhein-westfälischen Landesvermessung GNSS-Messungen, Laserscanning-Befliegungen und auch das Digitalisieren von Höheninformationen in historischen Karten zur Ableitung digitaler historischer Höhenmodelle als Erhebungsquellen genutzt. Ein Vergleich der Methoden ist in *Abb. 7* dargestellt. Ein ähnlicher „Methodenvergleich zur

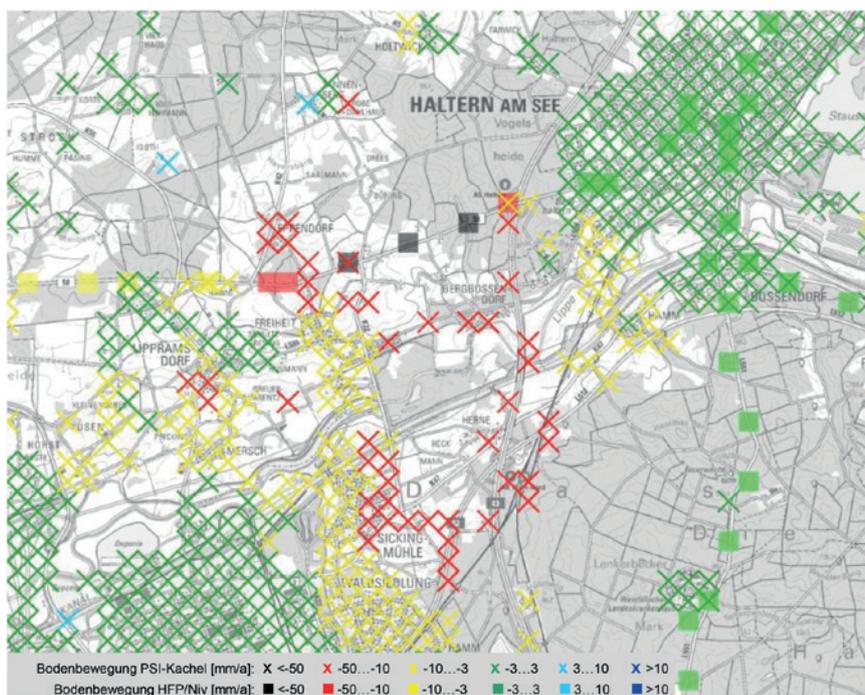


Abb. 6 | Bodenbewegungen im Testgebiet in Millimeter/Jahr

K r i t e r i e n	B e o b a c h t u n g s m e t h o d e					
	Leit- nivele- ment	GNSS- Netz	Laser- Scanning	Höhenlinien historischer Karten	Radar- interfero- metrie (allgemein)	Radar- interfero- metrie (BBK NRW)
Flächen- deckung	punktuell (30% NRW)	punktuell (10% NRW)	100%	100%	partiell > 30%	gekachelt ca. 30%
Epochen- länge	2-5 Jahre	2-4 Jahre	5-6 Jahre	einmalig 120 Jahre	6 Tage	1 Jahr
absolute Höhen	ja	ja	ja	ja	nein	nein
Genauigkeit (absolut/relativ)	1-10 mm 3 mm/a	1-10 mm 3 mm/a	5-10 cm 5 cm/a	ca. 2 m ---	--- ?? mm/a	--- 3 mm/a
Bezug	Punkt	Punkt	< 1 x 1 m	> 5 m	ca. 5 x 20 m	250 x 250 m
Kosten	hoch	hoch	mittel	einmalig mittel	niedrig	niedrig

Abb. 7 | Vergleich und Bewertung der Beobachtungsmethoden in der Landesvermessung

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 von Nivellementsbeobachtungen wird sukzessive auf einen fünfjährigen Abstand „ausgedünnt“. Dieser Zeitraum zwischen den terrestrischen Nivellementsbeobachtungen soll durch radarinterferometrische Daten in der Ausprägung des „Bodenbewegungskatasters NRW“ überbrückt werden. Die in Abb. 3 darge-

stellten Wiederholungszyklen zeigen bereits die Umsetzung dieser Strategie.

Dieser völlig neue integrative Ansatz verschiedener Beobachtungsmethoden – erstmalig in der Landesvermessung in Deutschland vorgesehen – stellt auf die jeweilige Stärke der einzelnen Verfahren ab (Abb. 7). Bei der Radarinterferometrie sind dies insbesondere die bessere Flächendeckung und die Kontinuität der Datenverfügbarkeit. Neben dieser messtechnischen Innovation erwartet die Landesvermessung insgesamt auch wirtschaftliche Vorteile als Folge der Reduktion terrestrischer Nivellements.

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Im 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. Mit dem Bodenbewegungskataster NRW werden die Schnittstellen zwischen Datenquelle/Fernerkundung (Sentinel-

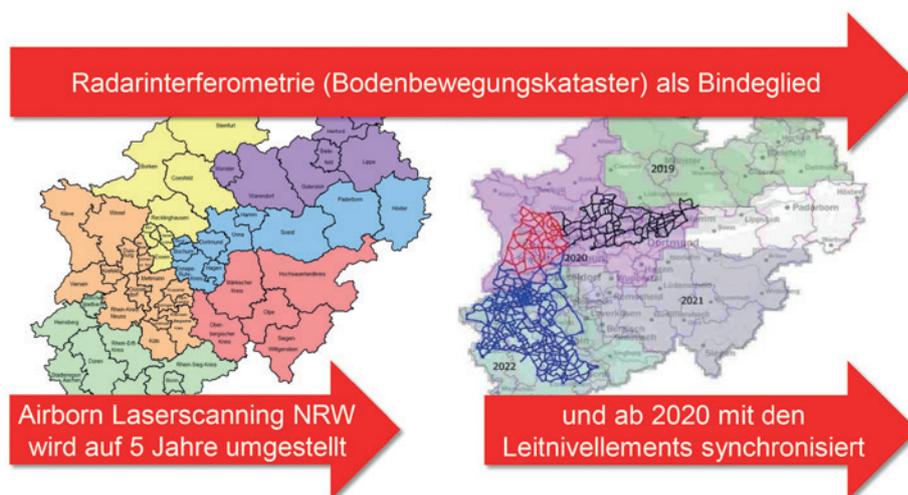


Abb. 8 | Integrativer Ansatz zur Nutzung verschiedener Beobachtungsmethoden

