

Großräumige, radarinterferometrische Erfassung von Höhenänderungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches von aktiven und stillgelegten Steinkohlebergwerken

PROF. WOLFGANG BUSCH

Im Rahmen eines größeren Untersuchungsprojektes, das durch die Bezirksregierung Arnsberg, Abteilung Bergbau und Energie in NRW, in Auftrag gegeben wurde, hat das IGMC mittels der radarinterferometrischen PSI-Auswertemethode die Bodenbewegungen im Bereich von zwei aktiven und fünf, in jüngerer Zeit stillgelegten Steinkohlenbergwerken der RAG AG untersucht. Die Untersuchungszeiträume erstreckten sich bergwerksspezifisch über 7 – 12 Jahre. Zur Verfügung standen Radarszenen der Satelliten ENVISAT und Radarsat-2. In Summe wurde eine Gesamtfläche von über 2300 km^2 radarinterferometrisch ausgewertet.

In diesem Beitrag werden in erster Linie die für die radarinterferometrische Auswertungen relevante Zielsetzung, Vorgehensweise sowie ausgewählte Ergebnisse und Erfahrungen dargestellt. Weitere, darüber hinaus gehende Ergebnisse sind in insgesamt 8 umfangreichen und öffentlich zugänglichen Publikationen (siehe BUSCH ET AL. 2018) veröffentlicht.

Schlüsselwörter – Bodenbewegungen, Radarinterferometrie, Persistent Scatterer Interferometrie, Steinkohlenbergbau

1. Aufgabenstellung und Grundlagen

Angeregt durch die Ergebnisse des im Jahre 2012 erstellten Gutachtens „Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter bergbaulicher Einwirkungsbereiche des Bergwerks Prosper-Haniel“ (BUSCH ET AL. 2012) hat die Bezirksregierung Arnsberg die Abteilung Markscheidewesen und Geoinformation des Institutes für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) beauftragt, zu untersuchen, ob auch im Bereich der zum Zeitpunkt der Untersuchungen in Betrieb befindlichen Steinkohlenbergwerke der RAG AG

- Auguste Victoria und
- Ibbenbüren

sowie der in jüngerer Zeit stillgelegten Steinkohlenbergwerke

- West,
- Walsum,
- Lohberg/Osterfeld,

- Lippe
- und Ost (mit den Betriebsbereichen Monopol und Heinrich Robert)

außerhalb der in den Rahmenbetriebsplänen dargestellten prognostizierten Einwirkungsbereiche bergbaubedingte Senkungen eingetreten sind. Im Rahmen dieser gutachterlichen Stellungnahmen wurden die räumliche Ausdehnung und die Größenordnung der außerhalb der prognostizierten Einwirkungsbereiche eingetretenen Höhenänderungen bergwerksbezogen ermittelt und vor allem überprüft, ob und inwieweit der Steinkohlenbergbau für die im bergwerksspezifisch festgelegten Untersuchungszeitraum bestimmten Höhenänderungen bzw. Bodenbewegungen ursächlich ist. Grundsätzlich kommen auch nicht bergbaubedingte Ursachen, wie z. B. die Tektonik oder Änderungen der Grundwasserverhältnisse, in Betracht. Diese zeitlich, regional und lokal vorhandenen Ursachen waren nicht nur zu detektieren sondern auch ihre Einflüsse auf die ermittelten Höhenänderungen zu untersuchen und ihre Anteile (wenn möglich) an den bestimmten Höhenänderungen abzuschätzen. Da eine solche Aufgabenstellung nur interdisziplinär lösbar ist, erfolgte die Erarbeitung geologischer und hydrogeologischer Zusammenhänge durch Prof. Dr. rer. nat. W.G. Coldewey (und sein Team) sowie die Bearbeitung spezieller markscheiderischer Fragestellungen zur Qualität der vorausgerechneten bergbaulichen Einwirkungsgrenzen und zur Bergschadensrelevanz außerhalb der prognostizierten Einwirkungsbereiche festgestellter Höhenänderungen durch Prof. Dr. R. Hejmanowski (und sein Team). Grundlage für die radarinterferometrische Ermittlung von Höhenänderungen sind die Festlegung der Untersuchungsräume sowie der Untersuchungszeiträume und die dazu passende Auswahl verfügbarer Zeitreihen von Radarszenen.

1.1. Untersuchungsräume

Die sieben untersuchten Bergwerke mit ihren für unterschiedliche Zeiträume prognostizierten Einwirkungsbereichen erstrecken sich vom linken Niederrhein (Kamp-Lintfort), den Großraum Dinslaken, über Dorsten und Haltern am See sowie Bergkamen bis Hamm. Geographisch davon getrennt befindet sich das nördlich gelegene Bergbauggebiet Ibbenbüren. Einen Überblick über die geographische Lage und Verteilung der Untersuchungsgebiete vermittelt Abbildung 1.

Grundlage für die Festlegung der Untersuchungsräume bilden die bergwerksspezifischen, prognostizierten Einwirkungsbereiche. Diese beziehen sich auf die in den bergwerksbezogenen Rahmenbetriebsplänen enthaltenen, geplanten Abbaue (und damit auch auf geplante Abbauezeiträume). Ihre räumliche Ausdehnung repräsentiert somit nur den Bereich, in dem infolge der für einen bestimmten Zeitraum geplanten Abbaue Senkungen erwartet werden. Die Grenzen dieser prognostizierten Einwirkungsbereiche sind definiert durch prognostizierte Senkungsnulllinien oder 1 cm – Linien (wie im Falle der Bergwerke West und Walsum). Außerhalb dieser prognostizierten Einwirkungsgrenzen dürfen infolge des genehmigten Abbaues keine Senkungen oder keine größer als 1 cm auftreten.

Um Einflüsse anderer nicht bergbaulicher Bodenbewegungsursachen im Umfeld der Einwirkungsgrenzen sowie ggf. altbergbaulicher Ursachen und durch bergbauliche Sumpfangsmaßnahmen hervorgerufene Bodenbewegungen zu ermitteln, wurden die Untersuchungsräume großzügig dimensioniert. Somit ergaben sich die in Abbildung 1 durch rot gestrichelte Linien begrenzten Untersuchungsräume, deren Ausdehnung und Flächengröße in Tabelle 1 zusammengefasst ist.

1.2. Untersuchungszeiträume

Grundlegend für die Festlegung des Untersuchungszeitraumes ist die Gültigkeitsdauer des genehmigten bergwerksspezifischen Rahmenbetriebsplanes, bzw. im Falle einer vorzeitigen Beendigung des Bergbaus das Stilllegungsdatum. Aufgrund einer vom Auftraggeber vorgeschriebenen Bearbeitungsreihenfolge und der erst für Ende 2015 bzw. 2018 geplanten und erfolgten Stilllegung ergaben sich für die zum Zeitpunkt der Untersuchung noch aktiven Bergwerke Auguste Victoria und Ibbenbüren um etwa 14 Monate bzw. um 3 Jahre und 10 Monate kürzere Untersuchungszeiträume (Tabelle 2). Unter

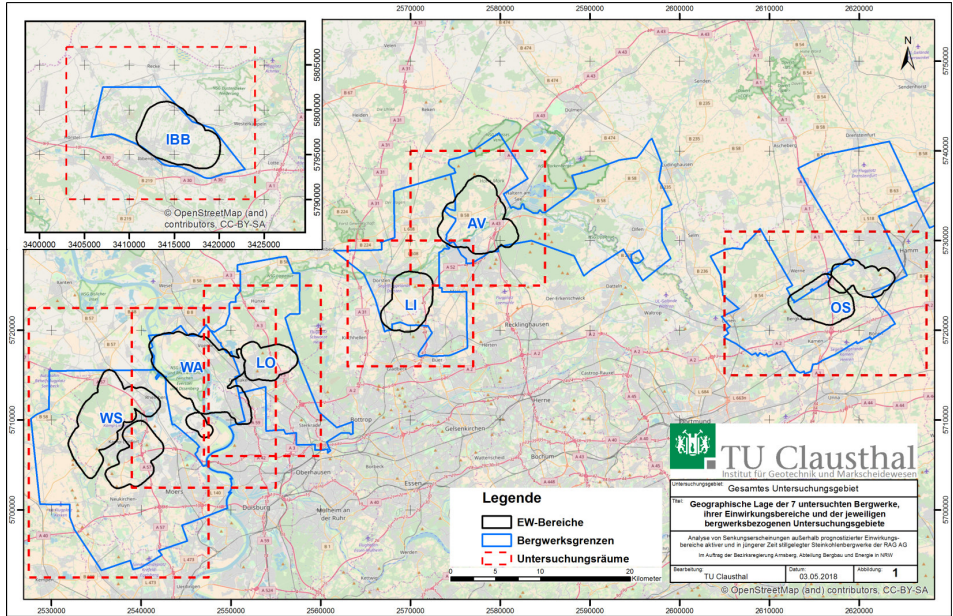


Abbildung 1: Geographische Lage der 7 untersuchten Bergwerke, ihrer Einwirkungsbereiche und der jeweiligen bergwerksbezogenen Untersuchungsgebiete. Copyrights: RAG AG 2015, Bezirksregierung Arnsberg, Abt. Bergbau u. Energie in NRW 2015 - 2017.

Berücksichtigung von vorhandenen und für PSI-Auswertungen geeigneten Zeitreihen von Radarszenen wurden für die anderen 5 Bergwerke die in Tabelle 2 zusammengestellten Untersuchungszeiträume festgelegt. Für diese Bergwerke beträgt der zeitliche Abstand zwischen Stilllegung und Ende des Untersuchungszeitraumes etwa 2,5 Jahre (Bergwerk West) und meist ca. 5 Jahre, um auch über den Stilllegungszeitpunkt hinaus wirkende restliche Bodenbewegungen detektieren zu können. Da für

Tabelle 1: Ausdehnung und Flächengröße der Untersuchungsgebiete

Bergwerk	Ausdehnung [km]	Flächengröße [km ²]
Auguste Victoria	15 x 15	225
Ibbenbüren	21 x 17	357
West	20 x 30	600
Walsum	16 x 20	320
Lohberg/ Osterfeld	13 x 19	247
Lippe	14 x 14	196
Ost	16 x 22,5	360
Summe		2.305

die Ermittlung von Senkungen vorrangig die radarinterferometrische PSI-Methode eingesetzt werden sollte, setzte dies das Vorhandensein von geeigneten Radardaten über die gewünschten Betrachtungszeiträume voraus. Die Datenrecherche ergab bis auf die Bergwerke West und Walsum eine gute Übereinstimmung zwischen den gewünschten Betrachtungszeiträumen und den Zeiträumen, für die Radardaten verfügbar sind. Für das BW West sollten die Senkungen ab dem 11.04.2003 bestimmt werden, geeignete Radardaten liegen jedoch erst ab 21.12.2003 vor. Der fehlende Zeitraum von ca. 8 Monaten war durch Nivellementsdaten zu überbrücken. Im Falle des BW Walsum beträgt der Zeitraum, für den keine Radardaten vorliegen, ca. 18 Monate, nämlich vom 07.06.2002 bis 21.12.2003. Auch für diesen Zeitraum wurde versucht, fehlende Senkungsinformationen über Nivellementsdaten zu gewinnen. Vollständigkeitshalber soll noch auf eine kleine Datenlücke in der Zeitreihe für das BW Ibbenbüren von Anfang Oktober 2010 bis Mitte Januar 2011 hingewiesen werden, die jedoch für die Bewertung und Ableitung von Höhenänderungen sowie Bodenbewegungen keine nennenswerte Bedeutung besitzt.

Tabelle 2: Untersuchte Bergwerke, Zeiträume

Bergwerk	RBP Zeitraum	Stilllegung	Untersuchungszeitraum, PSI-Auswertung
Auguste Victoria	01.01.2005 – 31.12.2015		02.12.2004 – 18.10.2014
Ibbenbüren	01.01.2009 – 31.12.2018		18.12.2003 – 12.02.2015 Datenlücke: 07.10.2010 – 16.01.2011
West	11.04.2003 – 31.12.2019	31.12.2012	21.12.2003 – 25.06.2015
Walsum	07.06.2002 – 31.12.2019	30.06.2008	21.12.2003 – 30.06.2014
Lohberg/ Osterfeld	01.01.2004 – 31.12.2009	31.12.2005	18.12.2003 – 07.10.2010
Lippe	01.01.2007 – 01.01.2010	31.12.2008	07.12.2006 – 27.01.2014
Ost –Heinrich Robert	01.01.2004 – 31.12.2019	30.09.2010	18.12.2003 – 06.11.2015
Ost - Monopol	01.01.2006 – 31.12.2019	30.09.2010	

1.3. Verwendete Radardaten

Die Ermittlung der Höhenänderungen sollte vornehmlich mittels aufgezeichneter Radarsatellitendaten und ergänzt durch bereitgestellte terrestrische Daten erfolgen. Um sowohl eine räumlich wie auch zeitlich vollständige Abdeckung des Untersuchungsraums zu erzielen, mussten (bis auf das BW Lohberg/Osterfeld) Datensätze von zwei verschiedenen Radarsensoren bestellt werden, da kein zeitlich durchgehender Datenstapel eines einzigen Satelliten verfügbar war. Für die älteren Zeiträume bis Oktober 2010 wurden in allen Untersuchungsgebieten Daten des Radarsensors ASAR des europäischen Umweltsatelliten ENVISAT genutzt. Der zweite, jüngere Zeitraum konnte mit Hilfe von Radardaten des kanadischen Satelliten Radarsat-2 der Firma MDA untersucht werden. Angaben über die benutzten Radardaten beinhalten die Tabellen 3 und 4. Die im Standard Mode aufgezeichneten Radarsat-2 Daten besitzen eine Bodenauflösung von etwa 23m × 8m, die vergleichbar ist mit der Bodenauflösung von etwa 23m × 5m der ENVISAT ASAR Daten. Die Szenengröße bei beiden Sensoren beträgt etwa 100km × 100km. Für die Untersuchung im BW Ibbenbüren standen Radarsat-2 – Daten in einem hochauflösenden Modus mit 4,2m × 4,6m zur Verfügung (Szenengröße ca. 50km × 50km). ENVISAT ASAR Szenen werden (von Ausfällen abgesehen) in einem zeitlichen Abstand von 35 Tagen und

Tabelle 3: Bergwerksbezogene Angaben zu den verwendeten Radardaten

Bergwerk	ENVISAT ASAR			Radarsat-2		
	Track	Frame	Flugrichtung	Mode	Beam	Flugrichtung
AV	337	2565	Descending	Standard	S4	Descending
IBB	337	2550	Descending	Multi-Look Fine	MF5F	Descending
WS	380	2550	Descending	Standard	S3	Descending
WA	380	2550	Descending	Standard	S3	Descending
LO	337	2565	Descending			
LI	337	2565	Descending	Standard	S4	Descending
OS	337	2565	Descending	Standard	S4	Descending

Radarsat-2 Szenen in einem zeitlichen Abstand von 24 Tagen aufgezeichnet.

Die für die radarinterferometrischen PSI-Auswertungen benutzten Szenen sind bezüglich des bergwerksbezogenen Auswertzeitraums (jeweils erste und letzte Szene) und der entsprechenden Szenenanzahl in Tabelle 4 zusammengestellt. Die zeitliche Überlappung der beiden Datenstapel der Radarszenen von ENVISAT ASAR und Radarsat-2 beträgt etwa 4 Monate. Eine Ausnahme bilden die beiden Datenstapel für das BW Ibbenbüren, zwischen denen eine zeitliche Lücke von ca. 3 Monaten besteht. Das für die radarinterferometrischen Auswertungen benötigte, aktuelle und hochauflösende digitale Oberflächenmodell (DOM) wurde durch die Bezirksregierung Köln, Geobasis NRW (Abt. 7), in Form von sog. First-Puls-Laser-Rohdaten im ASCII-Format bereitgestellt und vom IGMC in Rasterdaten umgewandelt.

Tabelle 4: Bergwerksbezogene Aufzeichnungszeiträume und verfügbare Radarszenenanzahl

Bergwerk	ENVISAT ASAR		Radarsat-2	
	Zeitraum	Anzahl	Zeitraum	Anzahl
AV	02.12.2004 – 07.10.2010	59	17.06.2010 – 18.10.2014	64
IBB	18.12.2003 – 07.10.2010	68	16.01.2011 – 12.02.2015	54
WS	21.12.2003 – 10.10.2010	71	03.06.2010 – 25.06.2015	77
WA	21.12.2003 – 10.10.2010	71	03.06.2010 – 25.06.2015	77
LO	18.12.2003 – 07.10.2010	69		
LI	07.12.2006 – 07.10.2010	40	17.06.2010 – 27.01.2014	53
OS	18.12.2003 – 07.10.2010	69	17.06.2010 – 06.11.2015	79

2. Ergebnisse der PSI-Auswertungen

2.1. Grundlagen

Um umfangreiche Datenstapel für die Erfassung von Bodenbewegungszeitreihen effizient nutzen und vollständige Zeitreihen ableiten zu können, ist das Auswerteverfahren der so genannten „Persistent Scatterer Interferometry“ (PSI) verwendet worden. Das PSI-Verfahren umgeht das Problem der Dekorrelationen, indem die Schätzung der Bewegungen nur für langzeitstabile Rückstreuer, die so genannten Persistent Scatterer (PS-Punkte), erfolgt. PS-Punkte sind in der Realität meist anthropogene Objekte mit guten Rückstreuereigenschaften, z. B. Hausdächer. Zu Beginn des Auswerteverfahrens werden zunächst die PS-Punkte anhand unterschiedlicher Rückstreu-Kriterien detektiert. Für diese PS-Punkte erfolgt anschließend mittels zweidimensionaler Regressionsanalysen und zeitlicher Phasenabwicklungen (wegen der Phasenmehrdeutigkeiten von 2π) die Ermittlung des Anteils der Objektbewegungen in Blickrichtung des Sensors (LOS – Line of Sight) sowie der Punkthöhenfehler, die u. a. auf Ungenauigkeiten des benutzten DOMs zurückzuführen sind. Des Weiteren können atmosphärische Störeinflüsse auch bei dem PSI-Auswerteverfahren zu Fehlern in den abgeleiteten Bodenbewegungen führen. Teilweise lassen sich Hin-weise auf atmosphärische Störeinflüsse durch Vergleiche von Zeitreihen benachbarter PS-Punkte finden. Eine atmosphärisch stark beeinträchtigte Szene (z.B. aber auch durch Schneebedeckung) führt zu einer Reduktion der Anzahl der PS-Punkte und wird aus dem verwendeten Datenstapel entfernt.

Aufgrund der relativ kleinen Wellenlänge ist das Messverfahren sensibel für Bewegungen im mm-Bereich. Treten jedoch sehr schnelle und starke nichtlineare Lageänderungen von PS-Punkten auf, so können sie mit dem Verfahren nur bedingt ermittelt werden. Die maximal erfassbare Bewegung eines PS-Punktes in Blickrichtung des Sensors beträgt bei ENVISAT ASAR und Radarsat-2 zwischen zwei Aufnahmen etwa 14mm. Hierbei kann sich der kürzere zeitliche Abstand von 24 Tagen zwischen zwei Aufnahmen bei Radarsat-2 gegenüber den 35 Tagen bei ENVISAT ASAR vorteilhaft auswirken. Treten größere Bewegungen als die zuvor für die beiden Sensoren genannten Beträge auf, kommt es zu Mehrdeutigkeiten bei den gemessenen Phasendifferenzen, die wiederum zu Fehlern bei der sog. Phasenabwicklung (Phase Unwrapping) führen können. Phasenabwicklungsfehler bewirken bei ENVISAT als auch bei Radarsat-2 einen Messfehler in LOS in der Größe eines Vielfachen von etwa 28 mm. Bei Verwendung der PSI-Methode sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Szenen, der Entfernung zu einem gewählten Referenzpunkt und der PS-Punktdichte Standardabweichungen für die mittlere Bodenbewegungsrate in LOS von 1-2 mm/a möglich.

2.2. Fehlerdetektion, Datenbereinigung

Die Genauigkeit radarinterferometrischer Ergebnisse ist u. a. abhängig von Qualität und Anzahl der Radardaten, charakteristischen Merkmalen des Untersuchungsraums (wie z. B. der Flächennutzung), den im Untersuchungszeitraum aufgetretenen Bodenbewegungen (Bewegungsraten, Bewegungsrichtung, räumliche Ausdehnung) und dem gewählten Auswerteansatz. So spielt bei der PSI-Methode beispielsweise auch die Entfernung der PS-Punkte zu einem gewählten Referenzpunkt und die PS-Punktdichte eine zusätzliche Rolle. Als Ergebnis einer PSI-Auswertung erhält man für jeden PS-Punkt den zeitlichen Bewegungs-verlauf in LOS-Richtung zwischen der ersten und letzten Aufnahme eines Stapels von Radardaten. Jede dieser punktbezogenen Zeitreihen setzt sich aus einer Trendkomponente sowie stochastischen Schwankungen zusammen. Letztere ergeben sich durch autoregressive Prozesse (Signalschwankungen, deren Ursachen zunächst unbekannt sind), systematische und grobe Messfehler sowie zufällige Fehler. Zufällige Fehler werden durch das Messrauschen verursacht. Aus ihnen lässt sich die innere Messgenauigkeit ableiten.

Systematische Fehler in den LOS-Daten werden durch atmosphärische und topographische Einflüsse verursacht. Grobe Messfehler, wie z. B. Phasenabwicklungsfehler, können durch Modellfehler bei der PSI-Regressionsanalyse entstehen oder bei Überschreitung der maximalen Bewegungsraten, wie in Kapitel 2.1 dargelegt. Einige systematische Messfehler können aufgrund der Auswertung langer

Zeitreihen mit der PSI-Methode ermittelt und weitestgehend korrigiert werden. Die ausgewerteten PS-Punkte (LOS-Daten) wurden anhand folgender Kriterien und Verfahren auf grobe Messfehler (Ausreißer) überprüft und grob fehlerhafte PSI-Zeitreihen bzw. PS-Punkte in der angegebenen Reihenfolge aus den Ergebnisdatensätzen der ENVISAT- und Radarsat-2-Auswertungen eliminiert:

- Detektion von sprunghaften Messwertänderungen in PSI-Zeitreihen aufgrund von Phasenabwicklungsfehlern nach dem von YIN ET AL. (2015) vorgestellten Verfahren.
- Detektion von PS-Punkten mit höheren Standardabweichungen für eine Beobachtung in LOS (oberhalb der 1%-Grenze) nach einer Trendermittlung mit einem bestangepassten Polynommodell für jede PSI-Zeitreihe (BUSCH & LINKE 2014).
- Überprüfung der räumlichen Ähnlichkeit der Ergebnisse, d. h. Bewegungen bzw. Bewegungsraten benachbarter PS-Punkte, anhand einer Clusteranalyse nach dem von XI ET AL. (2015) und XI (2017) vorgestellten Verfahren und einem Clusterradius von 200 m.
- Manuelle Detektion von Ausreißern anhand einer Plausibilitätsprüfung unter Einbeziehung von Kenntnissen über den Untersuchungsraum und das Bewegungsfeld sowie der fachlichen Expertise des Bearbeiters.

Insgesamt sind durch die vier Schritte der Datenbereinigung jeweils ca. 10 % der PS-Punkte der beiden Datenstapel eliminiert worden, so dass für die weiteren Analysen in den Untersuchungsgebieten die in Tabelle 5 aufgeführte Anzahl von PS-Punkten zur Verfügung stand. Da die ermittelten „Objekt“-Bewegungen in Blickrichtung des Sensors (LOS) eine eindimensionale Messgröße darstellen, liegt es nahe, daraus die Höhenänderung unter Berücksichtigung des jeweiligen Einfallswinkels θ_i (Abbildung 3) als eindimensionale Größe abzuleiten.

Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass die Bewegung eines Objektes im Raum vollständig nur durch einen dreidimensionalen Verschiebungsvektor beschreibbar ist. Ein Radarsensor besitzt nur eine Blickrichtung (schräg nach unten; gekennzeichnet durch den Blickwinkel θ (Abbildung 2, rechts)), der in einer azimutalen Blickrichtung etwa von Osten (Descending) oder von Westen (Ascending) in Richtung auf das Objekt gerichtet ist (Abbildung 2, links). Um die dreidimensionalen Bewegungskomponenten eines Objektes zu erfassen, müssten Radardatenstapel vorliegen und ausgewertet werden, die in verschiedenen Azimut-Blickrichtungen und unter verschiedenen Blickwinkeln (bezogen

Tabelle 5: Bergwerksbezogene PS-Punktzahl vor und nach der Datenbereinigung

Bergwerk	ENVISAT ASAR		Radarsat-2	
	PS-Punktzahl		PS-Punktzahl	
	unbereinigt	bereinigt	unbereinigt	bereinigt
AV	23.310	20.730	37.454	33.566
IBB	29.778	28.297	242.250	237.404
WS	50.132	43.246	87.143	72.140
WA	33.827	30.124	70.022	63.253
LO	46.532	42.913		
LI	47.459	44.408	64.883	58.406
OS	49.390	44.812	85.140	77.146

auf die Nadirrichtung) aufgenommen werden. Aufgrund der Nord-Süd- (absteigend = descending) bzw. Süd-Nord-Flugrichtung (aufsteigend = ascending) aller nutzbaren Radarsensoren könnten Objekte maximal aus zwei unterschiedlichen Azimut-Blickrichtungen (aus etwa Osten oder Westen), jedoch unter verschiedenen Blickwinkeln, beobachtet werden (siehe Abbildung 2). Liegen zwei zeitlich wie auch räumlich sich überlappende Radarstapel vor, die von einem Sensor (oder zwei ähnlichen Sensoren) jeweils aus Ascending- und Descending-Flugrichtung aufgenommen wurden, können (nach separaten PSI-Auswertungen) die Höhenänderungen mit einer deutlichen Verbesserung sowie auch die Ost-West-Bewegungskomponente der horizontalen Bewegungen berechnet werden (YIN & BUSCH 2018). Diese Möglichkeit ist neuerdings durch die kontinuierlich aufgenommenen Ascending- und Descending -Sentinel-1-Daten für Untersuchungszeiträume ab Ende 2014 / Anfang 2015 gegeben und durch ihre kostenfreie Nutzung wirtschaftlich vertretbar.

Für die Untersuchungen standen jedoch pro Zeitraum nur Radardatenstapel in Descending-Flugrichtung zur Verfügung. Infolge der durch den untertägigen Steinkohlenabbau eintretenden Senkungen bildet sich nicht nur eine Senkungsmulde aus, sondern sie erzeugen auch örtlich in Richtung und Größe unterschiedliche Horizontalbewegungen. Somit ist die Voraussetzung, dass keine Horizontalbewegung eingetreten ist, für eine Umrechnung der eindimensionalen LOS-Bewegung in eine Höhenänderung, nicht erfüllt.

Die fehlerhaften Auswirkungen sind systematischer Natur und in ihrer Größe lokal unterschiedlich sowie abhängig vom Blickwinkel, bzw. Einfallswinkel (siehe Abbildung 3) und der relativen Beziehung zwischen der azimutalen Richtung der Horizontalbewegungen und der azimutalen Aufnahme-richtung (vgl. Abbildung 2). Wie das Beispiel in Abbildung 3 (ein Senkungstrogprofil etwa in Ost-West-Richtung) zeigt, weisen die Höhenänderungen (Δr_z , Radar) am Punkt P_1 , die durch die Umrechnung der gemessenen LOS-Bewegungen ermittelt wurden, gegenüber den tatsächlich eingetretenen Senkungen (Δr_z , wahr) Überschätzungen auf, da sich der Punkt vom Sensor weg bewegt. Auf der gegenüberliegenden Seite der Senkungsmulde, z.B. im Umfeld von Punkt P_3 , kommt es dagegen zu einer Unterschätzung der aus den LOS-Daten abgeleiteten Senkungen, da sich der Punkt auf den Sensor zu bewegt. Abgesehen von dem Sonderfall am Punkt P_3 lässt sich verallgemeinert feststellen, dass umgerechnete Höhenänderungen auf der dem Sensor zugewandten Seite des Senkungstrog zu groß (Überschätzung) und auf der dem Sensor abgewandten Seite zu klein (Unterschätzung) berechnet werden. Dies gilt in gleicher Weise bei Verwendung von PSI-Ergebnissen abgeleitet aus Ascending-Daten. Lageverschiebungen senkrecht zur LOS-Richtung haben keinen Einfluss auf die gemessenen LOS-Bewegungen und damit können in diesen Bereichen auch „fehlerfreie“ Höhenänderungen berechnet werden. Da bei der Umrechnung der LOS-Bewegungsdaten in Höhenänderungen unter den o.g. Bedingungen z.T. erhebliche systematische Verfälschungen (insbesondere bei Verwendung von Daten eines relativ flach blickenden Radarsensors, wie im Falle des BW Ibbenbüren, Tabelle 3) entstehen können, wurden entsprechende Abschätzungen, z.T. auf Grundlage verfügbarer, den Abbau begleitender GPS-Horizontalbewegungsdaten, durchgeführt und als Ergebnis Bereiche definiert, in denen die berechneten Höhenänderungen potentiell zu starke Über- und Unterschätzungen aufweisen und deshalb nicht weiter zu verwenden waren. Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit von Vergleichen mit Nivellementsergebnissen in Gebieten an, für die keine oder nur unzureichende Angaben über tatsächliche Horizontalverschiebungen (Richtung und Betrag) vorliegen.

3. Datenqualität

3.1. Genauigkeit

Bei Bodenbewegungen, die durch verschiedene geogene und anthropogene Ursachen hervorgerufen werden, können in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitraum zeitlich sowohl lineare Bodenbewegungstrends auftreten als auch Trends, die mit einem Polynom höherer Ordnung als 1 (= Gerade) be-

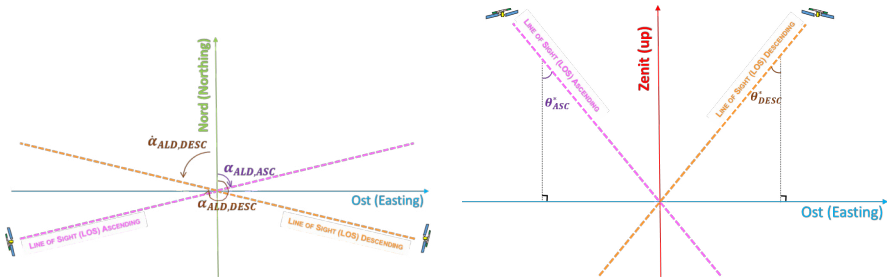


Abbildung 2: Projektionen der Blickrichtungen von ASC- und DESC-Aufnahmen: (links) auf die horizontale Nord-Ost-Ebene und (rechts) auf die vertikale Zenit-Ost-Ebene

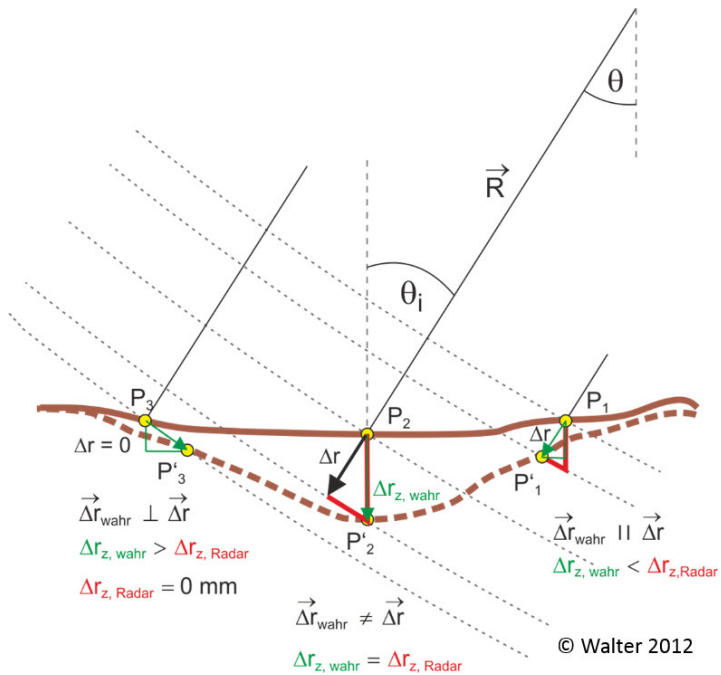


Abbildung 3: Radar-Aufnahmegeometrie und Punktbewegungen. Mögliche Fehlschätzungen von Höhenänderungen bei der Umrechnung von LOS-Bewegungen (Δr) in Vertikalbewegungen unter der Annahme, dass keine horizontalen Bewegungen aufgetreten sind (nach WALTER 2012)

geschrieben werden können. Beispiele hierfür sind das nichtlineare Senkungsverhalten nach Einstellung bergbaulicher Aktivitäten oder die Umkehr des Senkungstrends in einen Hebungstrend, z. B. infolge der Einstellung der Grubenwasserhaltung. Ziel einer am Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal (IGMC) durchgeführten Entwicklung war es deshalb, automatisiert für jeden der im Rahmen einer PSI-Auswertung erhaltenen PS-Punkte aus der Zeitreihe seiner Bewegungen in LOS-Richtung (oder daraus abgeleiteten Höhenänderungen) den Polynomgrad für die statistisch optimale Anpassung zu ermitteln. Hierzu wurde auf das bewährte Modell orthogonaler Polynome zurückgegriffen und zur Parameterschätzung die Methode der kleinsten Quadrate verwendet (nähere Erläuterungen in BUSCH & LINKE 2014). Als ein weiteres Ergebnis dieser Polynomausgleichung lässt sich aus den Residuen für jede Zeitreihe die Standardabweichung einer Beobachtung (vom Gewicht 1) ableiten. Sie stellt ein statistisches Maß für die innere Genauigkeit der Beobachtungen (hier der LOS-Bewegungen) dar. Diese ist auch vom jeweiligen Radarsensor abhängig. Aus den 7 durchgeführten ENVISAT - PSI-Auswertungen und den 6 Radarsat-2 – Auswertungen ergaben sich die in Tabelle 6 zusammengestellten Ergebnisse über die innere Qualität einer Beobachtung in LOS-Richtung. Diese Zusammenstellung lässt (mit aller Vorsicht) den Schluss zu, dass die für die PSI-Auswertungen verwendeten Radarsat-2 – Daten zu einer etwas höheren inneren Genauigkeit der Beobachtungswerte als die verwendeten ENVISAT-Daten führen.

Tabelle 6: Standardabweichungen einer Beobachtung in LOS-Richtung

Untersuchungs- gebiet, Bergwerk	ENVISAT ASAR		Radarsat-2	
	Anzahl PS- Punkte	Standardabweichung Median [mm]	Anzahl PS- Punkte	Standardabweichung Median [mm]
AV	20.730	3,9	33.566	3,6
IBB	28.297	3,9	237.404	3,2
WS	43.246	3,9	72.140	2,8
WA	30.124	4	63.253	3,1
LO	42.913	3,9		
LI	44.408	3,6	58.406	2,9
OS	44.812	3,9	77.146	3
Mittel		3,9		3,1

3.2. Plausibilität – Vergleich mit terrestrischen Daten

Ein Vergleich von Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Verfahren und unabhängig voneinander ermittelt wurden, bestärkt, im Falle einer Übereinstimmung, die Richtigkeit der Ergebnisse oder ermöglicht die Aufdeckung von fehlerhaften Messungen, im Falle deutlich unterschiedlicher Ergebnisse.

Da in diesen Untersuchungen die Höhenänderungen an und außerhalb der prognostizierten Einwirkungsgrenzen im Vordergrund stehen, erfolgten umfangreiche Vergleiche radarinterferometrisch und nivellistisch ermittelter Höhenänderungen in den entsprechenden Gebieten. Nivellistisch bestimmte Höhenänderungen konnten vor allem aus den genauen Leit- und Feinnivellements sowie geeigneter Nivellements der RAG abgeleitet werden. Bei einem solchen Vergleich völlig unabhängig erzielter Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass Nivellements nur in deutlich größeren Zeitabständen wiederholt werden und deshalb die durch Differenzbildung der zeitlich variierenden Höhenwerte an den Nivellementspunkten abgeleiteten Höhenänderungen nur einen Trend beschreiben können. Ferner sind die Unterschiede

in der Vermarkung von Nivellementspunkten und der Qualität der verschiedenen Nivellementsergebnisse bei einem Vergleich zu beachten. Da grundsätzlich ein Nivellement bei jeder Messung (zu einem Zeitpunkt) an einen zuvor höhenmäßig bestimmten Punkt angeschlossen werden muss, können zudem unbekannte Höhenänderungen des Anschlusspunktes seit der letzten Messung zu einer systematischen Verfälschung der abgeleiteten Höhenänderungen führen.

Da mit unterschiedlichen Verfahren gemessene Höhenänderungen streng genommen nur an ein und demselben Punkt vergleichbare Ergebnisse liefern, aber PS-Punkte im Regelfall nicht unmittelbar an einem Nivellementspunkt vorliegen, bieten sich für einen Vergleich der zeitlichen Höhenänderungsverläufe nur PS-Punkte in der Nachbarschaft von Nivellementspunkten an. Um einen flächenhaften Vergleich zwischen den Ergebnissen der Nivellements und der radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen zu ermöglichen, bietet sich auch an, für durch die vorhandenen Nivellements bestimmte Zeiträume nivellitisch ermittelte Höhenänderungen und zeitlich vergleichbare radarinterferometrisch ermittelte Höhenänderungen (abgeleitet aus den Trendfunktionen, mittels IDW-Interpolation überführt in Rasterdaten) zu verwenden (Abbildung 4).

Während die flächenhaften Vergleiche zwischen nivellierten und radarinterferometrisch ermittelten Höhenänderungen in erster Linie Aufschlüsse über räumliche Zusammenhänge ermöglichen, können Vergleiche von Höhenänderungszeitreihen an ausgewählten Punkten Übereinstimmungen oder Unterschiede in Trend und Betrag über den Betrachtungszeitraum aufzeigen. Voraussetzung für entsprechende Vergleiche mit nivellitisch gemessenen Höhenänderungen sind PS-Punkte, die sich in geringem Abstand zu den Nivellementspunkten befinden. Da im Hinblick auf den Untersuchungsschwerpunkt Gebiete am Rande und außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches von Interesse sind, wur-

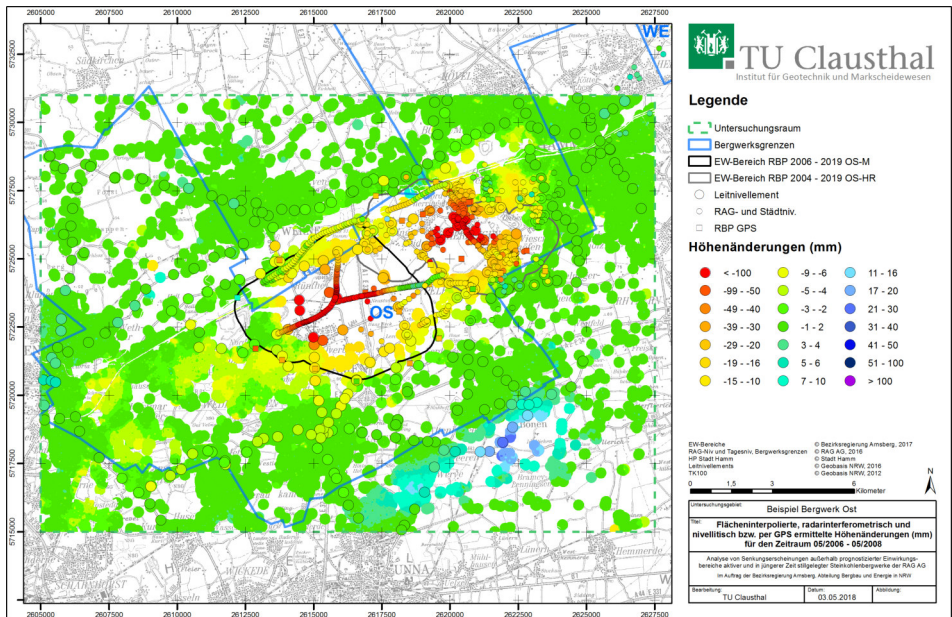


Abbildung 4: Vergleich flächeninterpolierter, radarinterferometrisch und nivellitisch bestimmter Höhenänderungen (mm) für den Zeitraum 05/2006 - 05/2008, Beispiel Bergwerk Ost

Tabelle 7: Bergwerksbezogene Anzahl dokumentierter Einzelpunkt-Zeitreihenvergleiche

Bergwerk	Anzahl der dokumentierten Vergleiche	
	Mit Leit- und Feinnivellements	Mit sonstigen Nivellements
AV	14	26
IBB	20	26
WS	86	12
WA	95	–
LO	53	–
LI	45	–
OS	102	–

den Nivellementsunkte in diesen Gebieten für diese punktbezogenen Vergleiche ausgewählt. Für diese Vergleiche wurden vorwiegend Leitnivellementsmessungen benutzt, die für den jeweiligen Untersuchungszeitraum vorlagen. Vereinzelt wurden auch Vergleiche auf Grundlage von RAG – Nivellements durchgeführt. Im nahen Umfeld der Nivellementsunkte befindliche PS-Punkte wurden für die Vergleiche ausgewählt und die nivellistisch bestimmten mit den radarinterferometrisch abgeleiteten Höhenänderungen in Abbildungen mit Zeitreihenvergleichen gegenübergestellt. Der in Abbildung 5 dargestellte Vergleich der beiden Höhenänderungszeitreihen demonstriert exemplarisch den charakteristischen Informationsgehalt. Zusammenfassend kann als Ergebnis aus allen durchgeführten Vergleichen (siehe Tabelle 7) festgestellt werden, dass die meisten Unterschiede in den Höhenänderungszeitreihen überwiegend sehr gering sind und im Rahmen der fehlertheoretischen Unsicherheiten beider Messverfahren liegen.

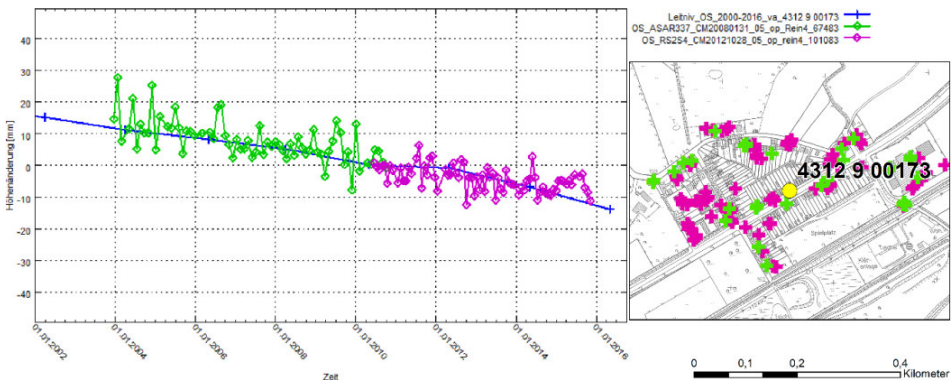


Abbildung 5: An einem Leitnivellementsunkt in zweijährigem Abstand nivellistisch bestimmte Höhenänderungen (blau) und die radarinterferometrisch abgeleitete Höhenänderungszeitreihe eines benachbarten PS-Punktes der ENVISAT-Zeitreihe (grün) und der Radarsat-2-Zeitreihe (rot) (Beispiel Bergwerk Ost)

In Gebieten und in Zeiträumen mit relativ starken Senkungen (hohe Senkungsgeschwindigkeiten) führten ggf. Phasenabwicklungsfehler bei der radarinterferometrischen Auswertung zu unterschätzt abgeleiteten Senkungen. Ebenfalls konnte durch den Vergleich an einer Reihe von Punkten der Einfluss von in ihrer Größe unbekannter und bei der Umrechnung der LOS-Daten in Höhenänderungen nicht berücksichtigbarer Horizontalbewegungen nachgewiesen werden. Aufgrund ihrer Ortslage im Bezug zu den Senkungsschwerpunkten und der Aufnahme richtung ergaben sich radarinterferometrisch unter- als auch überschätzte Senkungen, jedoch nur in einem Zeitraum bis zur Einstellung des aktiven Bergbaus.

Literatur

- BUSCH, W. & LINKE, J. (2014): Räumliche Höhenänderungsanalyse auf Grundlage einer automatisierten Ausgleichung massenhaft vorliegender PSI-Zeitreihen mittels Orthogonaler Polynome. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 121 (2014), Heft 8/9, S. 298 – 310.
- BUSCH, W., COLDEWEY, W.G., WALTER, D., WESCHE, D. & TIELMANN, I. (2012): Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb prognostizierter bergbaulicher Einwirkungsbereiche des Bergwerks Prosper-Haniel. – Gutachten der TU Clausthal und der WWU Münster vom 31.08.2012 im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg (Abt. 6); Clausthal-Zellerfeld.
https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/presse/2012/09/160_12/gutachten.pdf.
- BUSCH, W., YIN, X., COLDEWEY, W.G. & HEJMANOWSKI, R. (2018): Zusammenfassende Stellungnahme. Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlenbergwerke der RAG AG. Gutachten im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/presse/2018/06/091_18_06_08/index.php.
- WALTER, D. (2012): Systematische Einflüsse digitaler Höhenmodelle auf die Qualität radarinterferometrischer Bodenbewegungsmessungen. Dissertation TU Clausthal, Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld.
- XI, F., BUSCH, W. & ZHANG, C. (2015): Multikriterielle Clusteranalysen zur Detektion von Ausreißern in flächenhaft vorliegenden PSI-Ergebnissen zur Bestimmung von Bodenbewegungen. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7.-9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 209 – 220.
- XI, F. (2017): Detektion von anormalen Zeitreihen an Persistent-Scatterer – Punkten im Zusammenhang mit der Ableitung flächenhafter Bodenbewegungen. Dissertation TU Clausthal.
- YIN, X. & BUSCH, W. (2018): Nutzung der Sentinel-1 Aufnahme konfigurationen zur Ableitung von Bodenbewegungskomponenten im Rahmen eines radarinterferometrischen Bodenbewegungsmonitorings. In: Busch, W. (Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2018, 1. bis 2. März 2018 in Clausthal-Zellerfeld, S. 119 – 138.
- YIN, X., BUSCH, W. & WALTER, D. (2015): Detektion von sprunghaften Messwertänderungen in PSI-Zeitreihen zur Bestimmung von Bodenbewegungen. In: Tagungsband Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, 7.-9. Oktober 2015, Freiberg, Wagner Digitaldruck, Nossen, S. 181 – 195.