

Auswirkungen von Geländehebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier

Peter Rosner, Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH

Michael Heitfeld, Ingenieurbüro Heitfeld-Schetelig GmbH

Volker Spreckels, RAG Aktiengesellschaft

Peter Vosen, RAG Aktiengesellschaft

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Monitoring im Altbergbaubereich“ (ABSMon) der RAG wurden erstmals umfassende Modellvorstellungen über Ursachen, Kinematik und Risikofaktoren von Bodenhebungen in den nordrhein-westfälischen Flutungsbereichen des Steinkohlenbergbaus entwickelt. Davor wurden bereits auf der Grundlage einer detaillierten Auswertung der Bodenhebungen insbesondere in den Flutungsbereichen des Aachener, Südlimburger (NL) und Erkelenzer Reviers die zeitlichen Abläufe der Bodenbewegungen nach Einstellung der Wasserhaltung und die Bedeutung der hydraulischen Wechselwirkung mit den basalen Deckgebirgsaquiferen nach vollständiger Flutung der Grubenbaue aufgezeigt. Dabei ist mit dem Blick auf die im Erkelenzer Revier aufgetretenen Bergschäden ein wesentlicher Aspekt die Identifikation von Risikofaktoren, die eine Ausbildung von ungleichmäßigen, möglicherweise schadensrelevanten Bodenhebungen begünstigen. Auf dieser Grundlage sollen schon in der Planungsphase der im Ruhrrevier anstehenden Bergwerksflutungen Risikobereiche identifiziert, das Einwirkungspotenzial bewertet und ein entsprechend angepasstes Monitoring durchgeführt werden.

1. Einführung

Im Rahmen der Flutung von Steinkohlenbergwerken kommt es zu gleichmäßigen oder ungleichmäßigen Bodenhebungen; unter ungünstigen Randbedingungen können bei ungleichmäßigen Bodenhebungen auch Bergschäden auftreten.

Zur Schaffung der Grundlagen für eine fachlich fundierte Risikobewertung hinsichtlich der potenziellen Einwirkungen solcher Bodenhebungen auf die Geländeoberfläche und den Aufbau eines optimierten Monitoringsystems wurde durch die RAG das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Monitoring im Altbergbaubereich“ (ABSMon) initiiert.

Die Forschungsinhalte umfassen einerseits die Umsetzung eines Messkonzeptes der RAG zur flächenhaften Erfassung von Bodenbewegungen mittels hochpräzisen satellitengestützten langzeit-statischen GPS-Messungen sowie radarinterferometrischen PSI-Auswertungen der TU Clausthal, das SPRECKELS & MUSIEDLAK (2010) vorstellten. In einem weiteren Arbeitspaket werden Ursachen und Risikofaktoren von Bodenhebungen im Zuge der Flutung von Steinkohlenbergwerken im Ruhrrevier erforscht. Der vorliegende Beitrag erläutert den aktuellen Stand dieser Bearbeitung.

Im Rahmen dieser Risikoanalyse wurde zunächst eine Auswertung der bereits vorliegenden Informationen zur Entwicklung von Bodenhebungen aus den Stilllegungsbereichen des Erkelenzer Reviers sowie des Aachener und Südlimburger Reviers vorgenommen. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der Ermittlung der Faktoren, die zu den Bergschäden im Zuge der Flutung des Erkelenzer Reviers geführt haben. Auf der Grundlage dieser Auswertungen wurden die Charakteristika der Bewegungsabläufe und der Entwicklung von Bodenhebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs herausgearbeitet und Risikofaktoren für die Entwicklung von schadensrelevanten Hebungs differenzen formuliert.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Arbeitsergebnisse auf das Ruhrrevier übertragen und anhand von ausgewählten Flutungsbereichen verifiziert.

2. Bisheriger Kenntnisstand zur Entwicklung von Bodenhebungen

2.1 Dokumentation von Bodenhebungen in Flutungsbereichen

Mit der Einstellung der Grubenwasserhaltung und dem Wiederanstieg des Grubenwassers kommt es auch zu Hebungen der Geländeoberfläche. Entsprechende Phänomene wurden in der Literatur bereits in den 1940er Jahren für die Wittener Mulde beschrieben (OBERSTE-BRINK, 1940). Für das Südlimburger Revier (NL) veröffentlichte PÖTTGENS (1985) erstmals eine Übersicht über Ausmaß und mögliche Ursachen von Bodenhebungen im Zuge eines großräumigen Grubenwasseranstiegs. Für die in den 1990er Jahren stillgelegten Reviere im Raum Erkelenz und Aachen liegen Veröffentlichungen zu Bodenbewegungen u.a. von HEITFELD ET AL. (2003), BAGLIKOW (2003), HEITFELD ET AL. (2004) und BAGLIKOW (2010) vor.

Für das Aachener und Südlimburger Revier wurde eine umfassende Darstellung der Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs von ROSNER (2011) vorgelegt.

Eine differenzierte Darstellung von Hebungs differenzen als Folge eines Grubenwasseranstiegs wurde auf der Grundlage von Detail-Messprofilen erstmals durch HEITFELD ET AL. (2004) für das Erkelenzer Revier veröffentlicht.

Die im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg im Erkelenzer Revier aufgetretenen Schadensereignisse (Wassenberg) haben zu einer breiten öffentlichen Diskussion über die Risiken für die Geländeoberfläche infolge differenzieller Bodenhebungen auch für den Grubenwasseranstieg im Ruhrrevier geführt.

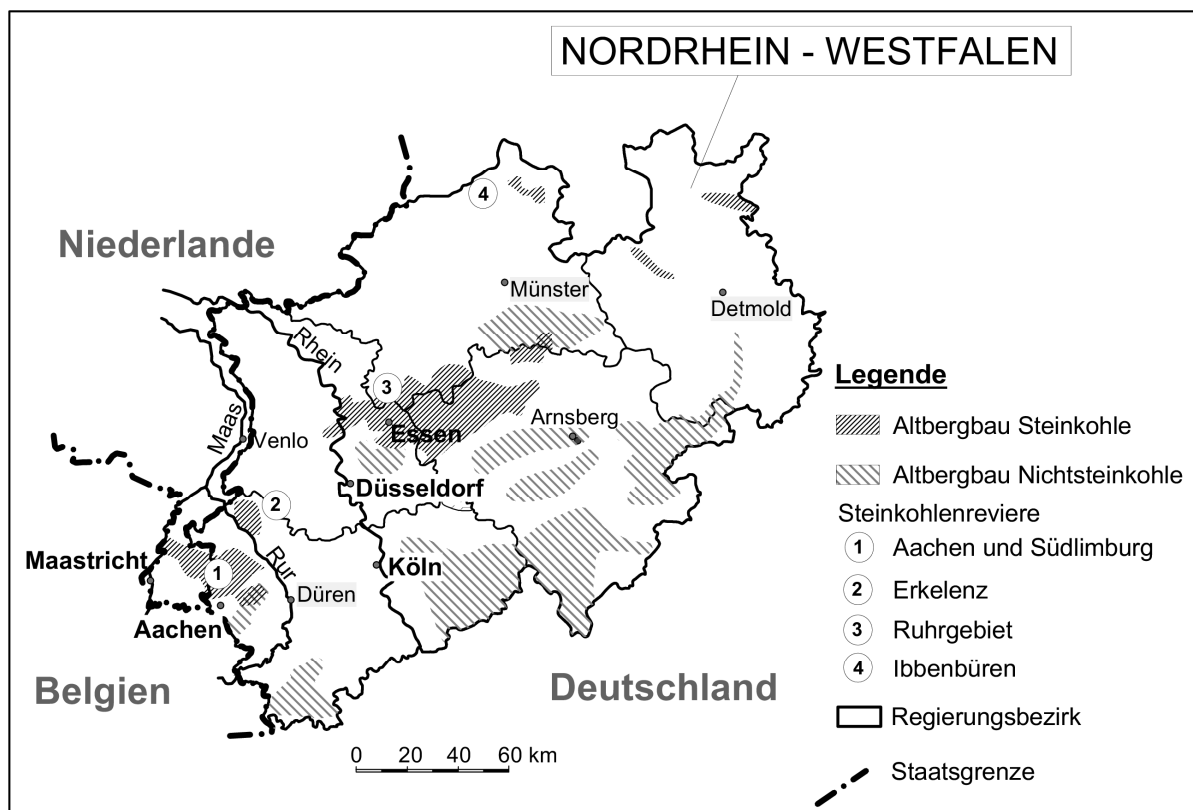


Abbildung 1: Übersichtskarte der Altbergbaubereiche in Nordrhein-Westfalen und Südl limburg (NL) (Kartengrundlage BR Arnsberg)

Im Zusammenhang mit der geplanten Stilllegung des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier 2018 wurde im Auftrag der Bergbehörde NRW ein Musterkatalog von Maßnahmen zur Überwachung der Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Ruhrrevier erarbeitet und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt (s. GRIGO ET AL., 2007). Dabei wurde auch auf die Notwendigkeit zur Klärung der Ursachen von schadensrelevanten Bodenhebungs differenzen im Zuge des Grubenwasseranstiegs, einer Identifikation von Risikobereichen und eines entsprechend angepassten Monitorings hingewiesen.

2.2 Ursachen von Bodenhebungen

Die Kenntnisse zu den Ursachen der Bodenhebungen können grundsätzlich wie folgt zusammengefasst werden:

- Bodenhebungen im Verlauf des Grubenwasseranstiegs resultieren im Wesentlichen aus Dehnungsvorgängen infolge des durch die Auftriebskräfte veränderten Spannungsfeldes im Gebirge.
- Solche Dehnungsvorgänge treten im Zuge der Flutung im bergbaulich aufgelockerten Steinkohlegebirge, aber auch bei Druckhöhenänderungen im überlagernden Deckgebirge auf.

Die grundsätzliche Kinematik solcher Bodenbewegungen (Senkungen und Hebungen) infolge veränderter Druckhöhen im Deckgebirge ist u.a. aus den Sumpfungsbereichen der Braunkohlentagebaue in der Niederrheinischen Bucht gut bekannt.

2.3 Zeitliche Entwicklung im Zuge des Grubenwasseranstiegs

Auf der Grundlage der bisherigen Arbeitsergebnisse wurde ein erster Ansatz für einen Leitfaden zur Bewertung von Bodenhebungen im Rahmen des Grubenwasseranstiegs aufgestellt. Die grundlegenden Charakteristika der Kinematik flutungsbedingter Bodenhebungen sind beispielhaft anhand der Flutungs- und Bodenbewegungsverläufe für die im Bereich der Niederrheinischen Bucht gelegenen Gruben Sophia-Jacoba (Erkelenzer Revier, Abb. 2) und Julia (Südlimburger Revier, NL, Abb. 3) dargestellt. Die Bodenbewegungen sind dabei für repräsentative Festpunkte relativ zu einer jeweils festgelegten Bezugsmessung aufgetragen.

Folgende Charakteristika flutungsbedingter Bodenbewegungen lassen sich festhalten:

- In der ersten Phase des Grubenwasseranstiegs im Niveau des Steinkohlegebirges sind im Allgemeinen über einen Zeitraum von rd. fünf Jahren keine signifikanten Bodenhebungen zu erwarten (Abb. 2, Abb. 3).
In der Anfangsphase des Grubenwasseranstiegs müssen zunächst die Restsenkungen aus dem Abbau kompensiert und das aufgelockerte Gebirge soweit verdichtet werden, dass sich die Dehnungsbewegungen bis zur Geländeoberfläche als Hebungen durchpausen können. Diese Vorgänge erfordern einerseits einen gewissen zeitlichen Vorlauf sowie auch ein entsprechendes eingestautes Volumen mit ausreichendem Dehnungspotenzial. Daraus resultiert, dass in Abhängigkeit von der gebauten Teufe und der Abbauintensität neben dem zeitlichen Vorlauf eine gewisse „Grenzteufe“ überstaut sein muss, bevor signifikante Bodenhebungen einsetzen. Beobachtungen aus dem Bereich

Niederberg (Bergwerk West) zeigen, dass bei einem Grubenwasseranstieg in Teufen unterhalb rd. 1.000 m keine signifikanten Bodenhebungen auftreten.

- Vielmehr wurde in einigen Bereichen (u.a. Erkelenzer Revier) nach weitgehendem Abklingen der abbaubedingten Bodensenkungen mit der Einstellung der Wasserhaltung eine kurzfristige erneute Zunahme von Bodensenkungen festgestellt (Abb. 2).

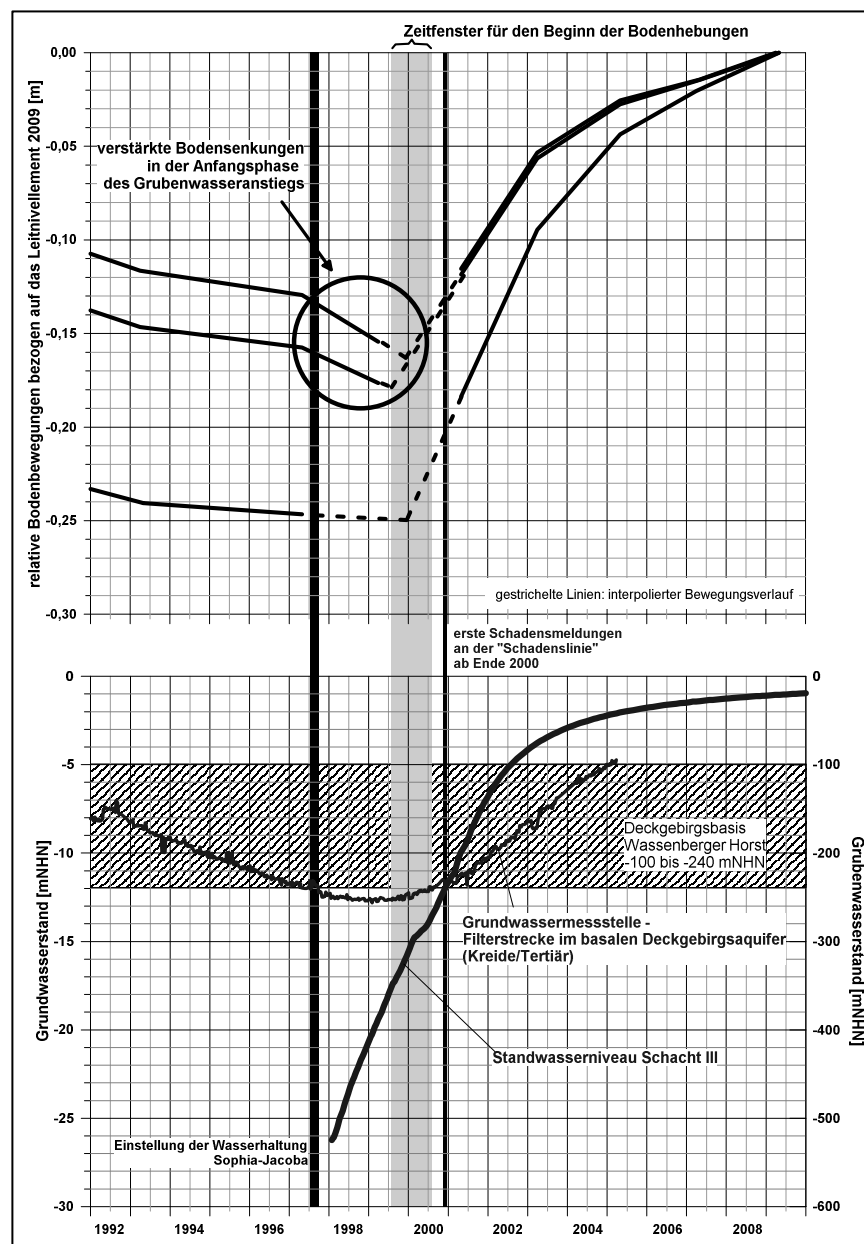


Abbildung 2: Grubenwasseranstieg im Erkelenzer Revier - Entwicklung der Druckhöhen im basalen Deckgebirge und Verlauf der Bodenbewegungen im Zuge der Flutung

Diese Entwicklung kann auf eine Sättigungssetzung zurückgeführt werden, bei der die Scherfestigkeit des Gebirges infolge der Wasserbenetzung der Korngrenzen reduziert wird.

- Weiterhin zeigen langjährige Messreihen an Höhenpunkten in älteren Stilllegungsbereichen, dass auch 10 bis 20 Jahre nach Abbauende, d.h. deutlich nach der in der Bergschadenskunde allgemein zugrunde gelegten Frist von etwa 5 Jahren, Bodensenkungen beobachtet werden.
- Die Bodenhebungen verlaufen etwa parallel zum Verlauf des Grubenwasseranstiegs; nach Abschluss einer Teilflutung kommen auch die Hebungsbewegungen wieder zur Ruhe (Abb. 3).

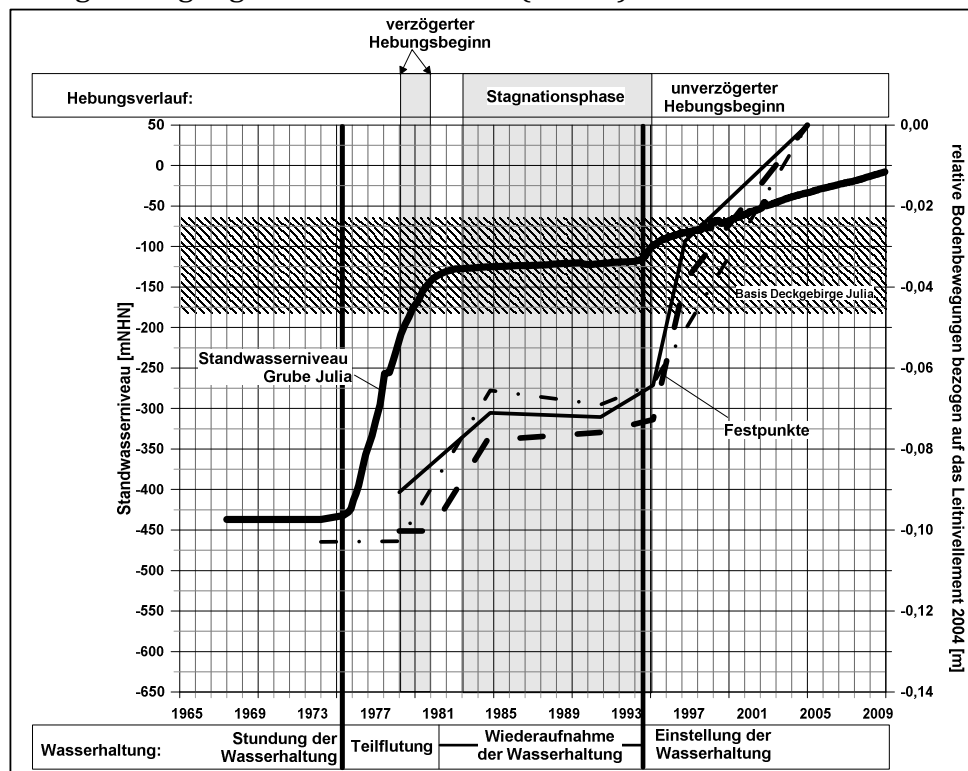


Abbildung 3: Beispielhafter Anstiegs- und Hebungsverlauf im Südlimburger Steinkohlenrevier (Grube Julia, Eygelshoven (NL))

- Wo es im Zuge des Grubenwasseranstiegs auch zu einem Anstieg der Druckhöhen im basalen Deckgebirgsaquifer kommt, überlagern sich die Dehnungsvorgänge im Steinkohlen- und im Deckgebirge; die Bodenhebungen werden dadurch verstärkt (Abb. 3). Dies kann auch dazu führen, dass nach vollständiger Flutung einer Steinkohlengrube mit dem Einstau der Deckgebirgsbasis die Bodenhebungen deutlich zunehmen.

- Bei einem schnellen Einstau des Deckgebirges können die zusätzlichen Dehnungs-vorgänge im Deckgebirge auch zu einem frühzeitigen Beginn der Bodenhebungen (d.h. vor der oben benannten mittleren 5-Jahresfrist; Beispiel: Erkelenzer Revier) führen (Abb. 2).
- Die stärksten Hebungen erfolgen in den Bereichen mit den stärksten Abbaueinwirkungen/Bodensenkungen.

In den betrachteten Stilllegungsbereichen sind bisher in Summe maximale Hebungsbeträge zwischen rd. 0,2 und 0,3 m, in einer mittleren Größenordnung um 3 % der abbaubedingten Bodensenkungen aufgetreten.

2.4 Risikofaktoren im Hinblick auf schadensrelevante Unstetigkeiten

Hinsichtlich des Auftretens von schadensrelevanten Bodenhebungsdifferenzen sind zunächst folgende grundsätzliche Feststellungen zu berücksichtigen:

- Schadensrelevante Bodenhebungsdifferenzen im Zuge der Flutung einer Steinkohlengrube in NRW und den Niederlanden sind bisher nur aus dem Bereich der tektonischen Störungszone Rurrand im Erkelenzer Revier (Wassenberg-Hückelhoven) bekannt geworden.
- In den anderen Stilllegungsbereichen wurden weder entsprechende Schäden festgestellt noch vergleichbare Unstetigkeiten ermittelt.
- Dies zeigt, dass die Voraussetzungen für die Ausbildung einer schadensrelevanten Unstetigkeit im Rahmen des Grubenwasseranstiegs sehr spezifisch sind und die Auftrittswahrscheinlichkeit insgesamt gering ist.

Die Charakteristika der Schadensentwicklung am Rurrand im Erkelenzer Revier können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die im Erkelenzer Revier aufgetretene Schadenslinie orientiert sich an einer im Grund- und Deckgebirge tektonisch vorgezeichneten Bewegungsbahn und nicht primär an den durch Abbaueinwirkungen entstandenen Unstetigkeiten/Schadensbereichen (z.B. an Abbaurändern; Abb. 4).
Einen Überblick über die räumliche Verteilung der Bodenhebungen im Erkelenzer Revier für den Haupthebungszeitraum 2001 bis 2007 zeigt Abb. 4.

Die beim Abbau entstandenen Unstetigkeiten/Schadensbereiche außerhalb von tektonischen Störungszonen hinterlassen im Gebirge eine deutlich geringer ausgeprägte Bewegungsbahn. Weiterhin werden die beim Abbau entstandenen

Unstetigkeiten vielfach im Zuge des weiteren Abbaus in größeren Teufenniveaus überprägt.

Diese tektonisch nicht vorgezeichneten Bewegungsbahnen lassen sich offensichtlich im Zuge des Hebungs Vorganges, der ja auch nur einen Bruchteil des Senkungsvorganges ausmacht, nicht reaktivieren.

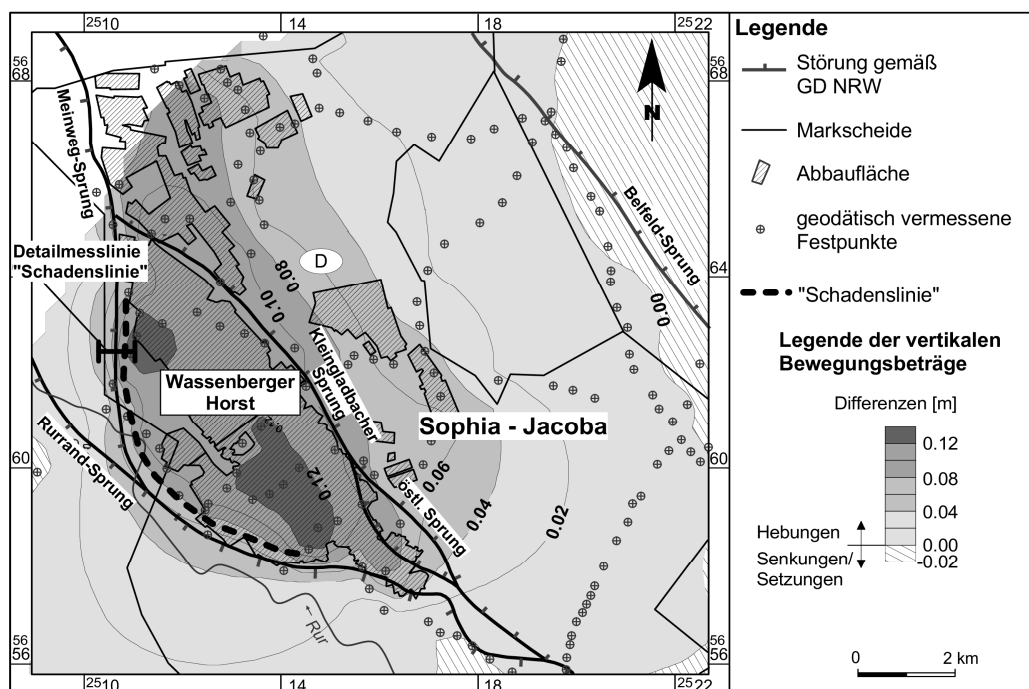


Abbildung 4: Bodenhebungen im Erkelenzer Revier (Zeitraum 2001-2007)

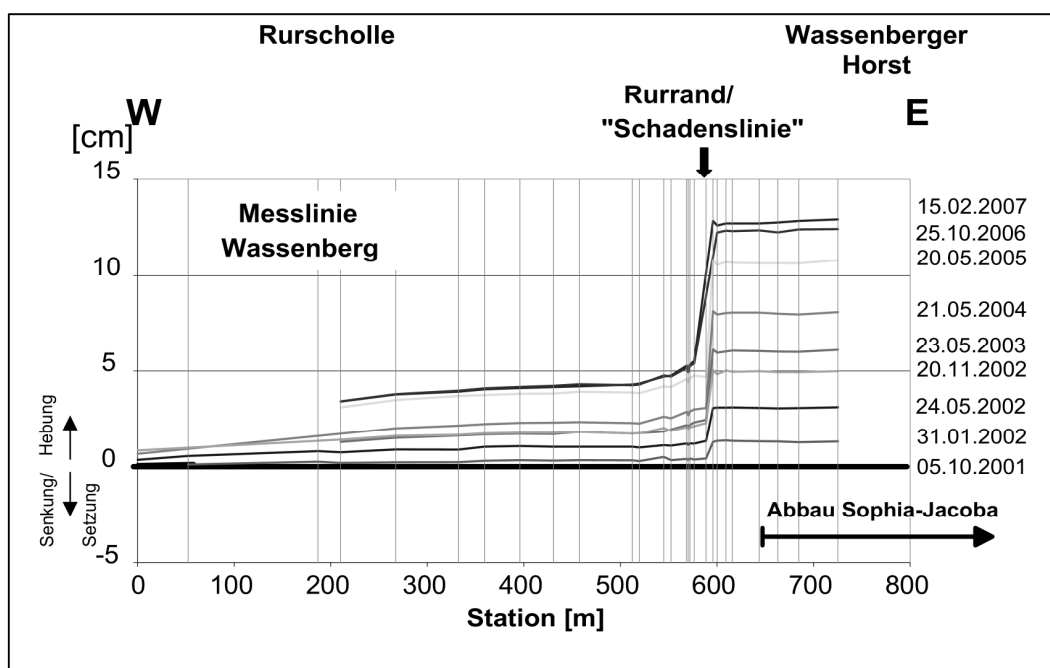


Abbildung 5: Ausbildung des Geländesprunges an der Schadenslinie im Erkelenzer Revier (Zeitraum 2001 bis 2007; Lage der Detailmesslinie s. Abb. 4)

Die Besonderheit der im Erkelenzer Revier als Schadenslinie aktivierten Bewegungsbahn besteht darin, dass diese eine noch heute tektonisch aktive Zone darstellt (z.B. Beben von Roermond und Düren), an der die Karbonoberfläche um über 1.000 m versetzt ist und die das Gebirge bis in das Niveau der quartären Deckschichten als ein System von Trennfugen durchschlägt. Zugleich erleichtern die Tonbesteige in dieser Störungszone die Aktivierung einer Bewegung.

- Eine derart scharf im Gebirge vorgezeichnete Bewegungsbahn bildet bei den im Zuge des Grubenwasseranstiegs auftretenden vergleichsweise begrenzten Hebungsbeträgen eine wesentliche Voraussetzung für die Ausbildung einer scharfen, schadensrelevanten Geländestufe (Abb. 5).
- Das erhöhte Aktivierungspotenzial der Bewegungsbahn sowie die hydraulische Wirksamkeit dieser Störung sind zugleich eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die Hebungsbewegungen der bergbaulich beeinflussten tektonischen Scholle auf eine Seite der tektonischen Scholle begrenzt bleiben und dadurch an dieser Störungszone schadensrelevante Bodenbewegungsdifferenzen entstehen können (Abb. 4, Abb. 5).
- Die spezifischen Charakteristika des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Revier lagen in der vergleichsweise sehr schnellen Flutung der Grube und der frühzeitigen Einbeziehung des Deckgebirges in den Anstieg der Druckhöhen (Abb. 2). Dadurch kam es einerseits zu einem verstärkten Bewegungsimpuls (Auftriebskräfte) sowie andererseits zu einer frühzeitigen Überlagerung mit Dehnungsvorgängen im Deckgebirge und damit insgesamt zu einer Verstärkung der Bodenbewegungen. Durch diese Überlagerung der Bewegungsvorgänge wurde die Aktivierung der im Gebirge vorgezeichneten Bewegungsbahn begünstigt.

Im Hinblick auf die Identifizierung von Bereichen mit einem erhöhten Risiko für die Ausbildung schadensrelevanter Bodenhebungsdifferenzen können folgende maßgebliche Faktoren benannt werden:

Ein erhöhtes Schadensrisiko durch die Ausbildung von Geländesprüngen infolge unterschiedlicher Geländehebungen muss an hydraulisch wirksamen tektonischen Störungszonen dort angenommen werden, wo

- der Abbau nur auf einer Seite der hydraulisch wirksamen Störung erfolgte und
- infolge des Grubenwasseranstiegs auch ein einseitiger Anstieg von Grundwasserständen/Druckhöhen im Deckgebirge erfolgt bzw. zu beiden Seiten der Störungszone aus anderen Gründen eine gegenläufige Entwicklung der Grundwasserstände im Deckgebirge vorliegt.

Darüber hinaus sind das spezifische Spannungs-/Verformungsverhalten der von einem Druckhöhenanstieg betroffenen Deckgebirgsschichten sowie die Scherfestigkeit der potenziellen Bewegungsbahn zu bewerten.

3. Projektbereiche im Ruhrrevier

3.1 Übersicht

Das Ruhrrevier (Abb. 6) lässt sich heute gliedern in die verbliebenen aktiven Zechen Prosper-Haniel (PH) und Auguste Victoria (AV), die Stilllegungsbereiche der Zentralen Wasserhaltungen (Wasserhaltungsprovinzen) sowie die eigenständigen Flutungsbereiche im östlichen Randbereich des Reviers (Königsborn bis Westfalen).

In einigen Stilllegungsbereichen sind Teilflutungen erfolgt bzw. vorgesehen; bis 2018 werden auch die heute aktiven Bergwerke stillgelegt und teilweise geflutet.

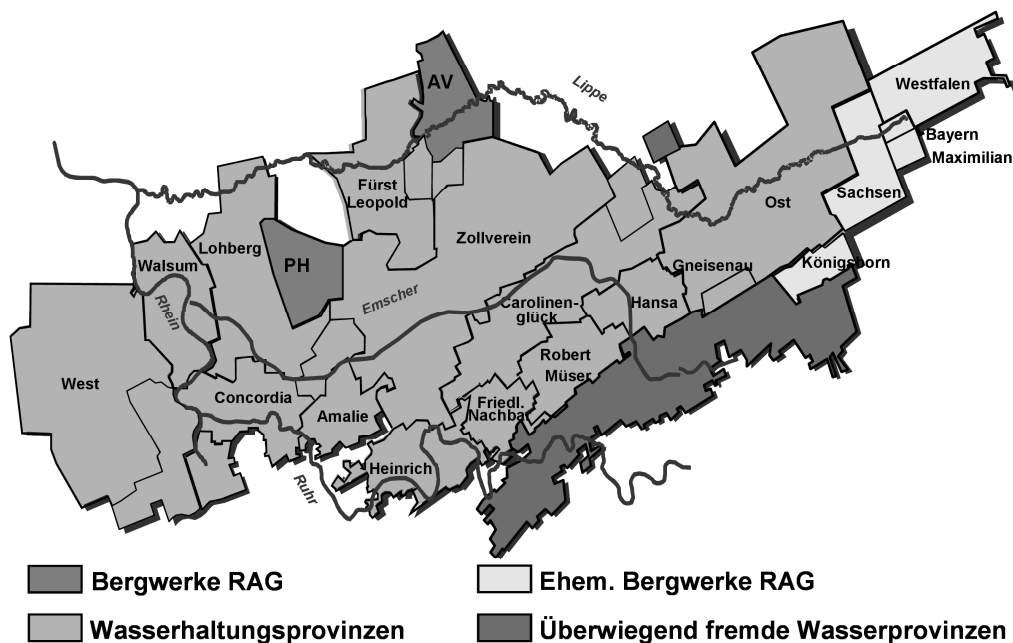


Abbildung 6: Übersicht Ruhrrevier (Bergwerke RAG: PH – Prosper-Haniel, AV - Auguste Victoria)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war in einem weiteren Bearbeitungsschritt zu prüfen, inwieweit die Erfahrungen aus den oben beschriebenen Flutungsbereichen für eine Risikobewertung in den zukünftig im Ruhrrevier anstehenden Flutungsbereichen herangezogen werden können. Für eine vergleichende Betrachtung wurden daher u.a. die aktuellen Flutungsbereiche der ehemaligen Bergwerke Königsborn und Westfalen

im östlichen Randbereich des Reviers ausgewählt; hier sind die Flutungen bereits so weit fortgeschritten, dass eine Analyse der Bewegungsvorgänge sinnvoll ist. Im Folgenden sind beispielhaft die Arbeitsergebnisse für das ehemalige Bergwerk Königsborn dargestellt.

3.2 Bergwerk Königsborn

3.2.1 Übersicht

Das ehemalige Bergwerk Königsborn liegt im südöstlichen Randbereich des Ruhrreviers zwischen Unna und Bönen (Abb. 7). Die Abbaubereiche erstreckten sich über eine Grundfläche von rd. 12 km² und liegen nahezu in einer Insellage; nur im Südwesten schließen sich jenseits des Unnaer Sprungs die Abbaubereiche der bereits in 1925 stillgelegten Grube Massener Tiefbau an. Das Bergwerk Königsborn wurde 1981 stillgelegt; 1996 wurde die Wasserhaltung eingestellt.

Das Bergwerk Königsborn baute in der SW-NE-verlaufenden Königsborner Mulde, in deren Kern im Wesentlichen die Bochumer Schichten an der Karbonoberfläche ausbeissen. Der Aufbau des gefalteten Steinkohlengebirges wird vor allem von den NW-SE-verlaufenden Querstörungen (Unnaer, Königsborner und Fliericher Sprung) überprägt. Der Abbauschwerpunkt lag im nordöstlichen Teil des Königsborner Grabens (Abbauteufen bis 1.000 m; abgebaute Mächtigkeit rd. 20 m); der Fliericher Sprung begrenzt die Lagerstätte im Nordosten.

Die Deckgebirgsmächtigkeit beträgt zwischen rd. 120 m im Südwesten bei Unna und 370 m im Nordosten bei Bönen. Das Deckgebirge wird aufgebaut von den Schichten der Oberkreide mit den Cenoman/Turon Kalksteinfolgen an der Basis und dem Emscher Mergel im Hangenden.

Die Schichten im Liegenden des Emscher Mergels bilden ein hydraulisch eigenständiges tiefes Grundwasserstockwerk, das mit dem Steinkohlengebirge hydraulisch kommuniziert. Die basalen Deckgebirgswässer sind stark mineralisiert. Die Wasserzuläufe in der Betriebsphase des Bergwerks Königsborn (rd. 3 bis 4 m³/min) waren sehr stark durch Deckgebirgswasserzuläufe geprägt.

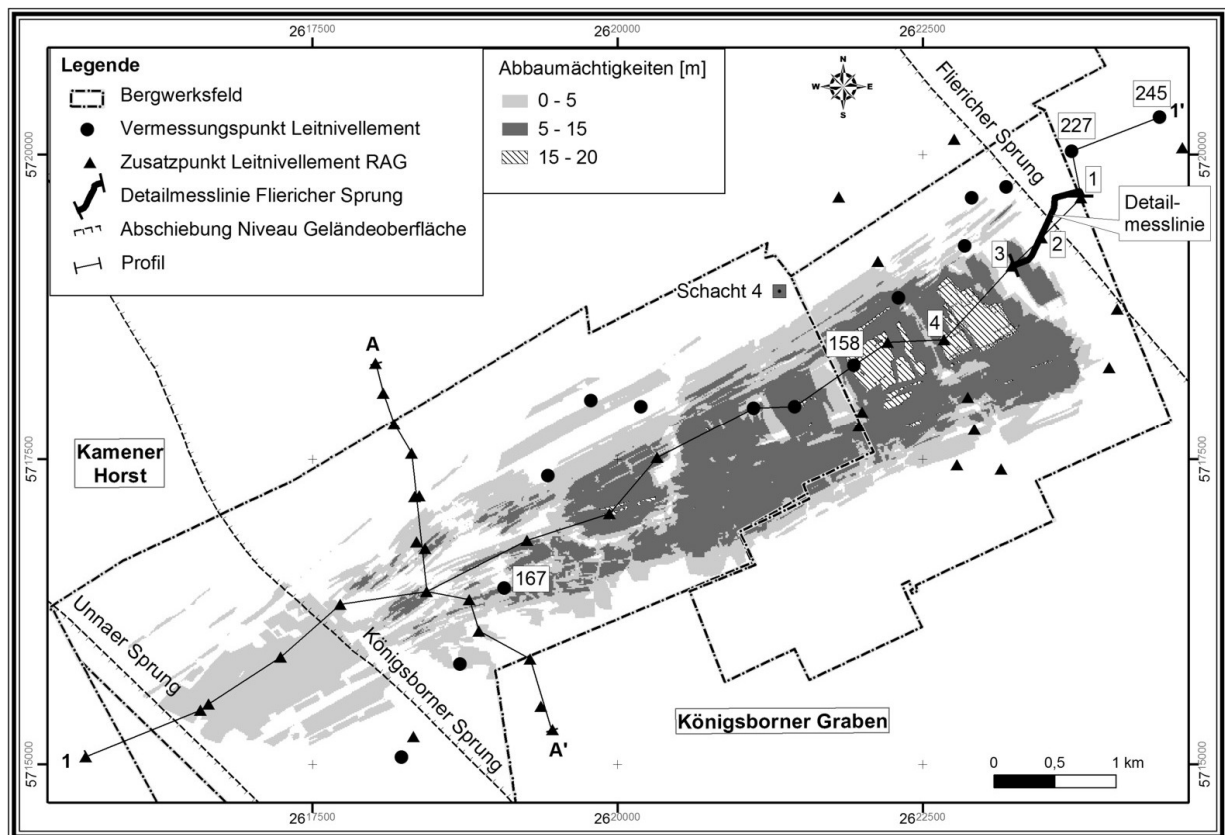


Abbildung 7: Bergwerk Königsborn - Lage und Mächtigkeit der Abbaubereiche, tektonische Störungen, Festpunkte der geodätischen Vermessung

3.2.2 Flutungsverlauf und zeitliche Entwicklung der Bodenbewegungen

Im Zuge der Flutung des Grubengebäudes stellte sich nach dem Einstau der 4. Sohle (rd. -500 mNHN) eine weitgehend konstante mittlere Anstiegsgeschwindigkeit von 30 bis 40 m/a ein (Phase 2, Abb. 8). Im Zusammenhang mit der vollständigen Flutung der Grube und dem sukzessiven Einstau der Deckgebirgsbasis war ab 2010 eine starke Zunahme der Anstiegsgeschwindigkeit des Druckniveaus bis auf rd. 94 m/a zu beobachten (Phase 3).

Dieser markante Anstieg des Druckniveaus geht zurück auf die Reduzierung des zu flutenden Hohlraumvolumens, zeigt aber zugleich die anhaltend gute hydraulische Wechselwirkung mit den überlagernden Kreideschichten und dem damit verbundenen Potenzial zum Druckausgleich. Nach der Flutung des Grubengebäudes gehen die Wasserzuläufe aus dem Deckgebirge sukzessive zurück; dies führt gleichzeitig auch zu einem Anstieg der Druckhöhen im basalen Deckgebirgsaquifer. Entsprechende Hinweise liefern zwei in dem unmittelbar nördlich gelegenen Feld Grillo beobachtete Tiefpegel der RAG (Ost 3.1, Ost 4.2), wo seit einigen Jahren ein signifikanter Anstieg der Druckhöhen in den basalen Kreidekalksteinen beobachtet wird.

Seit 2012 nimmt die Anstiegsgeschwindigkeit der Druckhöhen im Steinkohlengebirge sukzessive ab; hier machen sich nunmehr der langsame Druckausgleich mit den Druckhöhen im Deckgebirgsaquifer und das damit verbundene Auslaufen des Grubenwasseranstiegs bemerkbar (Phase 4).

Die Entwicklung der Bodenbewegungen zeigt eine deutliche Parallelität zum Verlauf des Grubenwasseranstiegs. Der Hebungsbeginn lässt sich auf ein Zeitfenster von etwa vier bis fünf Jahren nach Einstellung der Wasserhaltung eingrenzen. Die Gesamthebungen haben sich bis 2013 auf maximale Beträge um 0,2 m aufaddiert.

Markant ist die deutliche Zunahme der Bodenhebungen nach dem Einstau der Deckgebirgsbasis (Phase 3). Die Bewegungsverläufe an den in Abb. 8 dargestellten repräsentativen Festpunkten zeigen, dass sich der größte Anteil der bis 2013 insgesamt ermittelten Bodenhebungen erst nach dem Einstau der Deckgebirgsbasis (Phase 3) entwickelt hat. Dabei steht ein Anstieg des Standwasserniveaus um rd. 700 m in den Phasen 1 und 2 einem Druckhöhenanstieg um nur rd. 200 m in Phase 3 gegenüber.

Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass mit dem Anstieg der Druckhöhen im Deckgebirge die Dehnungsvorgänge im Steinkohlengebirge durch weitere Dehnungsvorgänge im Deckgebirge überlagert werden; es ist eine deutliche Zunahme der Bewegungsgeschwindigkeit zu erkennen.

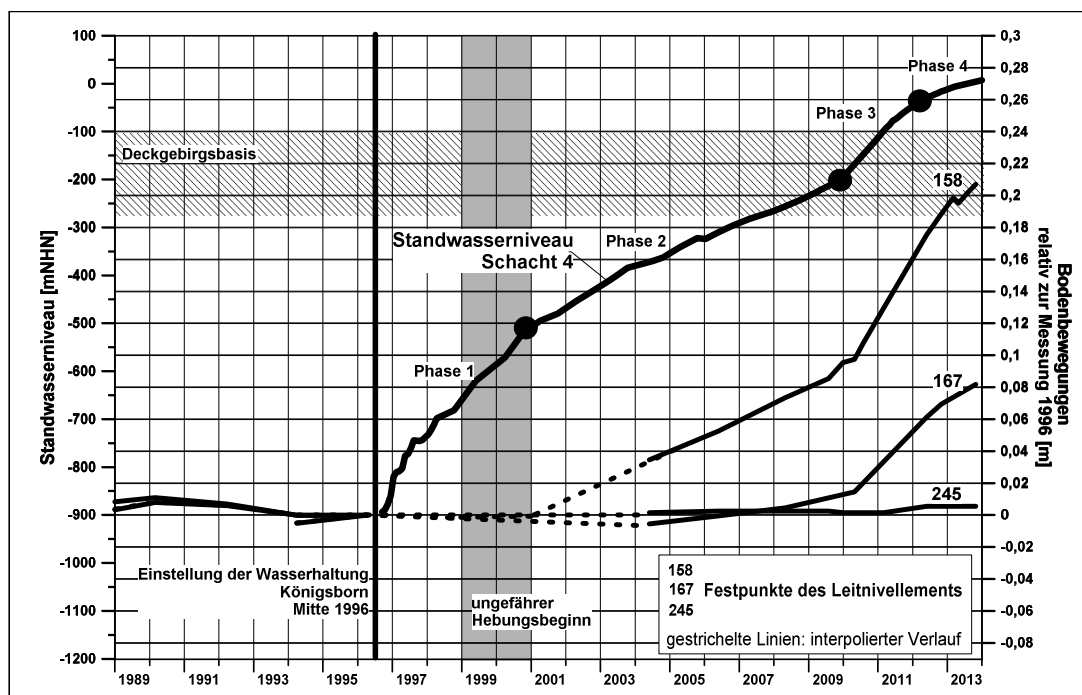


Abbildung 8: Bergwerk Königsborn - zeitliche Entwicklung von Grubenwasseranstieg und Bodenhebungen am Beispiel repräsentativer Festpunkte (Lage der Festpunkte s. Abb. 7)

Der zeitlich verzögerte Beginn der Bodenhebungen und die deutliche Zunahme der Hebungsbewegungen mit dem Einstau der Deckgebirgsbasis korrelieren sehr gut mit den Beobachtungen aus dem Aachener und Südlimburger Revier (vgl. Abb. 3).

Diese Entwicklung veranschaulicht sehr eindrucksvoll, dass in Abhängigkeit von der Anstiegsgeschwindigkeit die im Hinblick auf potenzielle Schäden durch Bodenhebungen kritische Phase des Grubenwasseranstiegs erst viele Jahre nach Einstellung der Wasserhaltung einsetzen kann und belegt zugleich die Bedeutung der hydraulischen Wechselwirkung zwischen Steinkohleengebirge und dem basalen Deckgebirge.

3.2.3 Räumliche Entwicklung der Bodenbewegungen

Die im Bereich des Bergwerks Königsborn vorhandenen Höhenfestpunkte des Leitnivellements (Abb. 7) erlauben nur eine grobe Abschätzung der räumlichen Entwicklung der Bodenbewegungen nach Einstellung der Wasserhaltung 1996. Anhand der Höhendifferenzen 1996-2013 zeigt sich aber deutlich das Hebungsmaximum mit rd. 0,2 m im Bereich des Abbaumaximums im nordöstlichen Teil des Königsborner Grabens (Festpunkt 158, s. Abb. 8), wo auch die stärksten abbaubedingten Senkungsbeträge anzunehmen sind. Für den gleichen Zeitraum wurden im südwestlichen Teil des Königsborner Grabens Hebungsbeträge von 0,08 m ermittelt (Festpunkt 167, s. Abb. 8).

In 2009 und 2012 wurde das geodätische Festpunktnetz durch die RAG erweitert, so dass ein repräsentatives Längsprofil und mehrere Querprofile zur Erfassung der räumlichen Ausdehnung der Hebungsbereiche zur Verfügung stehen (Abb. 7). Die für den Zeitraum 10.2012 bis 10.2013 ermittelten Bodenbewegungen sind bezogen auf die Messung von 10.2012 in Abb. 9 (Längsprofil 1-1') und Abb. 10 (Querprofil A-A') dargestellt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Gesamtbewegungen sind die Ergebnisse der einzelnen Messkampagnen untereinander im Rahmen der Messgenauigkeit deutlichen Schwankungen unterworfen. Die grundsätzliche Kinematik ist dennoch deutlich erkennbar.

Entlang der im Zentrum der Königsborner Mulde verlaufenden Messlinie (1-1', Abb. 9) nehmen die Hebungen mit der Zunahme der abgebauten Mächtigkeit von SW (Kamener Horst) nach NE (Königsborner Graben/Fliericher Sprung) sukzessive zu und erreichen im Zeitraum 10.2012 bis 10.2013 Beträge um rd. 0,02 m in dem im nordöstlichen Teil des Königsborner Grabens gelegenen Abbauschwerpunkt. Am nordöstlichen Abbaurand am Fliericher Sprung zeichnet sich eine markante Abnahme der Hebungen ab; die Hebungsbewegungen klingen wenige hundert Meter nordöstlich des Abbaurandes aus.

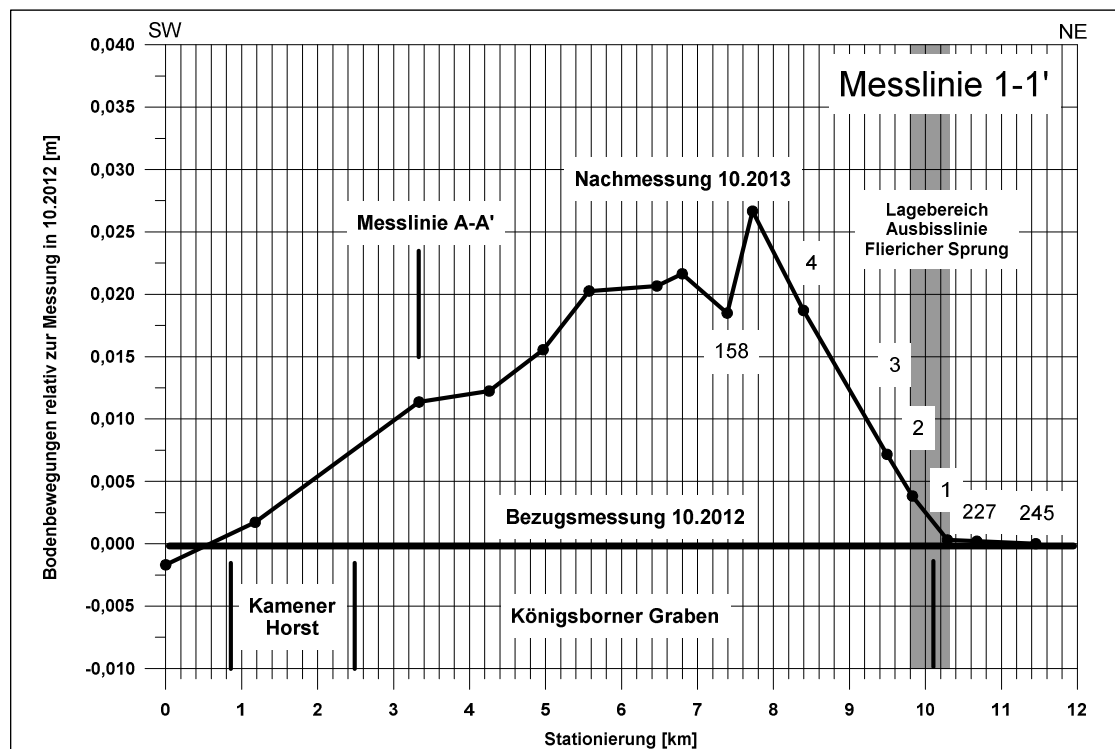


Abbildung 9: Bergwerk Königsborn – Bodenbewegungen entlang der Messlinie 1-1' (SW-NE) Zeitraum 10.2012 bis 10.2013

Die im südwestlichen Teil des Königsborner Grabens angeordnete in NW-SE-Richtung, quer zur tektonischen Mulde verlaufende Messlinie (A-A', Abb. 10) zeigt einen typischen Uhrglas förmigen zentralen Haupthebungsbereich, der mit Hebungsbeträgen von rd. 0,012 m für den Zeitraum 10.2012 bis 10.2013 im Wesentlichen auf die eigentliche Abbauzone konzentriert ist. Die seitlichen Übergänge in die abbaufreien Zonen sind fließend. Die Hebungsbewegungen klingen nach Südosten in einem mehrere hundert Meter breiten Streifen aus.

In nordwestlicher Richtung deutet sich dagegen eine wesentlich breitere, bis an das Ende der Messlinie reichende Übergangszone an, in der im Beobachtungszeitraum noch leichte, aber signifikante Hebungen um 0,003 m auftraten. Diese breite Hebungszone im nordwestlichen Umfeld des Abbaubereichs deutet auf die Einwirkung des weiträumigen Druckanstiegs im basalen Deckgebirgsaquifer hin, die hier auch weit außerhalb des eigentlichen abbaubedingten Einwirkungsbereiches zu Dehnungsvorgängen im Deckgebirge führt. Die asymmetrische Entwicklung der Bodenhebungen in den südöstlichen und nordwestlichen Abbaurandbereichen ist durch die hydrogeologischen Besonderheiten des basalen Deckgebirgsaquifers bedingt.

Diese Feststellungen zur räumlichen Entwicklung der Bodenhebungen basieren hier nur auf einem vergleichsweise kurzen Beobachtungszeitraum, korrelieren aber sehr gut mit den Erkenntnissen aus anderen Stilllegungsbereichen.

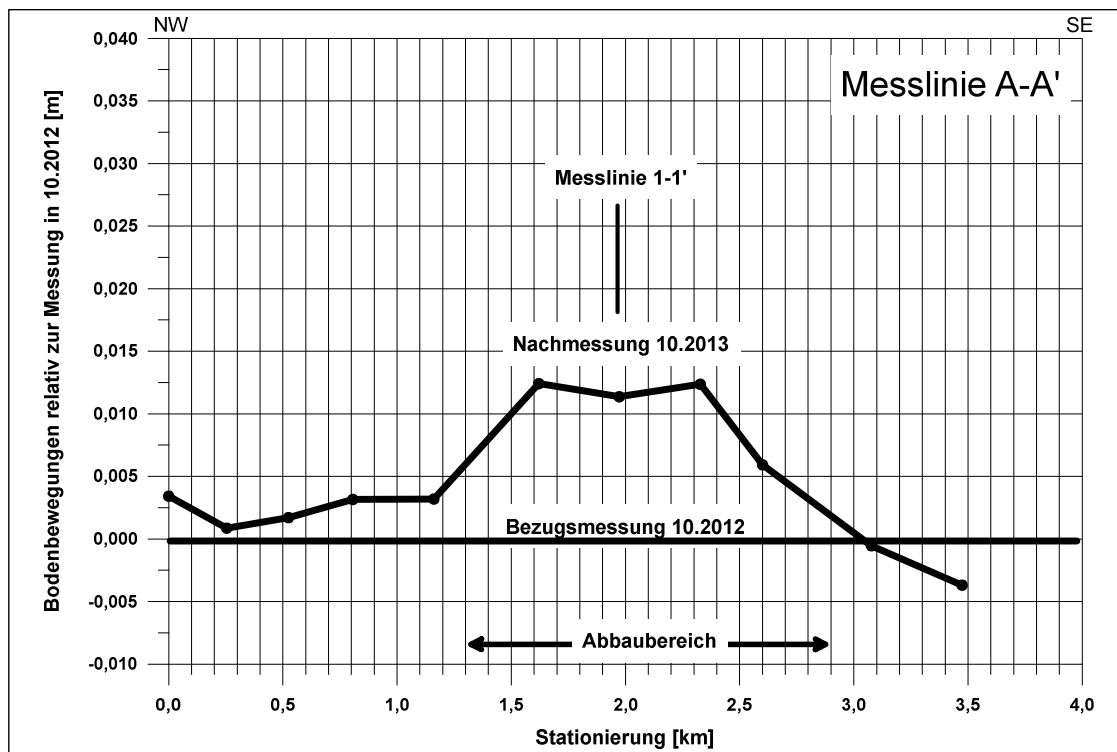


Abbildung 10: Bergwerk Königsborn – Bodenbewegungen entlang der Messlinie A-A' (NW-SE) Zeitraum 10.2012 bis 10.2013

Insbesondere auch das Phänomen der hydrogeologisch bedingten weiträumigen Bodenhebungen im Vorland des eigentlichen Abbaubereichs ist auch aus dem Erkelenzer Revier gut dokumentiert.

Einen guten flächenhaften Überblick über die räumliche Entwicklung der Bodenhebungen ergibt sich auch anhand einer im Rahmen des Forschungsprojektes durch die TU Clausthal, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen (Prof. Busch), durchgeführten Auswertung von Zeitreihen radarinterferometrischer Satellitendaten des C-Band Satelliten Radarsat-2 nach dem „Persistent Scatterer Interferometry (PSI)“-Verfahren. Dabei werden anhand der Mikrowellenreflexionen von langzeitstabilen metallischen Objekten, vornehmlich im urbanen Raum (z.B. Fassaden, Dachaufbauten), punktuelle Höhendifferenzen zwischen verschiedenen Überfliegungsterminen ermittelt.

Die Ergebnisse bestätigen die flächenhafte Gültigkeit der sich entlang der Messlinie A-A' (vgl. Abb. 7) ergebenden Konzentration der Haupthebungsbewegungen auf den Abbaubereich (vgl. auch Abb. 11).

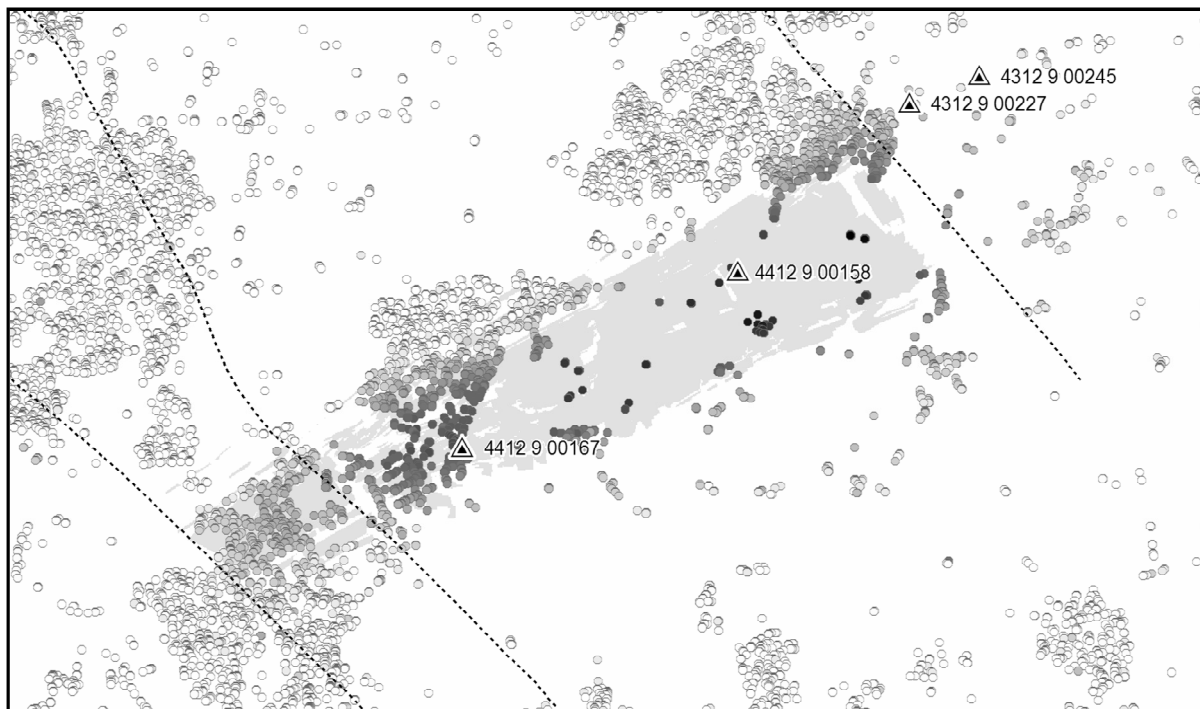


Abbildung 11: Bergwerk Königsborn – Höhenänderungen als Grauwertdarstellung in PSI-Punkten von 0 mm (weiß) bis 39 mm (schwarz), Zeitraum 06.2010 bis 12.2013 (vgl. Darstellung der Abbaubereiche -hier hellgraue Fläche - in Abb. 7)

Abbildung 12 zeigt den Vergleich der relativen Höhenänderungen für die Festpunkte 245, 227, 158 und 167 zu benachbarten, radarinterferometrisch bestimmten PSI-Punkten und deren gute Übereinstimmung:

3.2.4 Identifikation von Risikobereichen

Auf der Grundlage der Untersuchungen wurde für den Bereich des Bergwerks Königsborn als primärer potenzieller Risikobereich der Fliericher Sprung identifiziert. Hier wird der Hauptsenkungsbereich an einer tektonischen Störungszone abrupt begrenzt, so dass hier einerseits im Zuge von Bodenhebungen mit den stärksten Bewegungsdifferenzen zu rechnen ist und andererseits eine tektonisch vorgezeichnete, markante Bewegungsbahn im Gebirge als potenzielle Scherfuge vorliegt, die zugleich bei hydraulischer Wirksamkeit auch zu unterschiedlichen Druckhöhenentwicklungen im Deckgebirge führen kann. Auch die vorliegenden Vermessungsdaten zu den zusätzlichen Messprofilen bestätigen, dass sich in diesem Bereich ein zwischenzeitlich markanter Höhenverschiebungsgradient ausgebildet hat (vgl. Abb. 9, Abb. 10).

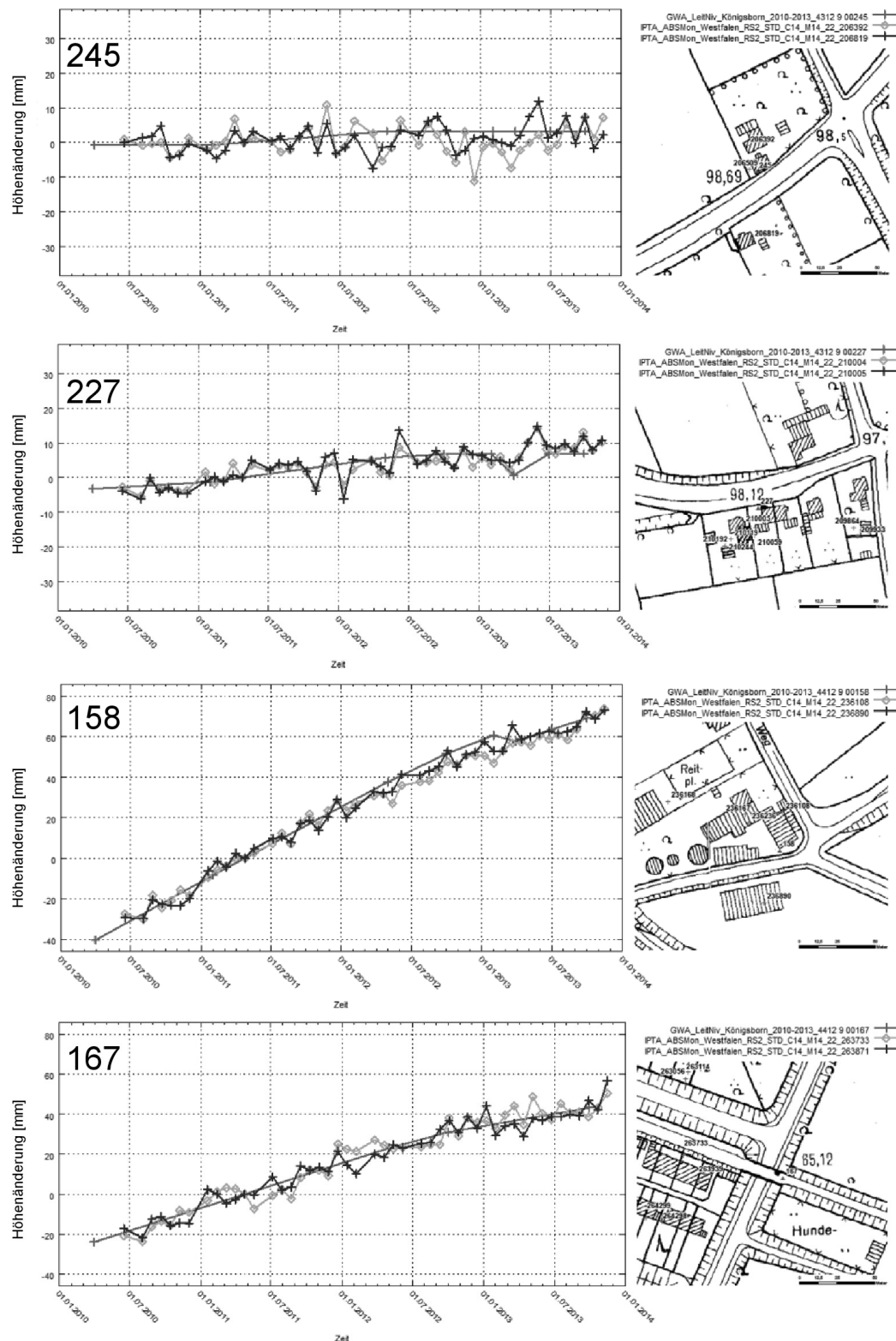


Abbildung 12: Bergwerk Königsborn – Zeit-Höhenänderungsdiagramme [mm] der Festpunkte 245, 227, 158 und 167 zu benachbarten PSI-Punkten, Zeitraum 06.2010 bis 12.2013 (vgl. auch Abb. 11)

Hinsichtlich der Bewertung des Einwirkungspotenzials ist für die Situation am Fliericher Sprung folgendes zu berücksichtigen:

- Aufgrund des vergleichsweise geringen Versatzes der Grundwasser führenden Schichten ist keine signifikante hydraulische Wirksamkeit der Störungszonen anzunehmen; im Zuge des Grubenwasseranstiegs sind daher auch keine deutlichen Druckhöhendifferenzen im basalen Deckgebirgsaquifer auf beiden Seiten der Störung zu erwarten.
- Die Scherfuge im Störungsbereich ist nicht durch Tonbestege „geschmiert“, wie das für die hydraulisch wirksamen Störungszonen der Niederrheinischen Bucht charakteristisch ist.
- Die Störung ist nicht aktiv und durchschlägt nicht das Quartär, so dass keine bis an die Geländeoberfläche durchgängig tektonisch vorgezeichnete Trennfuge vorliegt.

Damit ist insgesamt für den Fliericher Sprung ein im Vergleich zum Rurrand im Erkelenzer Revier deutlich geringeres Potenzial für die Ausbildung schadensrelevanter Bodenhebungsdifferenzen anzusetzen.

3.2.5 Räumliche Entwicklung der Bodenhebungen im potenziellen Risikobereich „Fliericher Sprung“

Im Bereich der Störungszone Fliericher Sprung wurde das vorhandene Festpunktnetz 2009 zur Erfassung einer potenziellen Unstetigkeit durch die RAG verdichtet. Die Ergebnisse der vorliegenden Folgemessungen bis 10.2013 sind in Abb. 13 dargestellt.

Die in 2009 um die Festpunkte 1 bis 4 ergänzte Messlinie erfasst den Übergangsbereich aus der Haupthebungszone im SW (Festpunkt 158) bis in die als unbeeinflusst angenommenen Bereiche nordöstlich des Fliericher Sprunges (Festpunkt 245) auf einer Strecke von rd. 4 km.

Seit 2009 hat sich hier zwischen dem Haupthebungsbereich (Festpunkte 158 und 4) und dem weitgehend „unbewegten“ Bereich nordöstlich des Fliericher Sprungs (Festpunkte 227 und 245) eine Höhendifferenz von rd. 0,11 m entwickelt. In dem Übergangsbereich zeichnet sich eine kontinuierliche Abnahme der Bodenhebungen ab; Unstetigkeiten sind nicht erkennbar. Zur weiteren Verifizierung des Bewegungsverlaufs und der Identifizierung möglicher markanter, kleinräumiger Unstetigkeiten am Fliericher Sprung wurde durch die RAG in 2012 über den Fliericher Sprung im Bereich eines Wohngebietes zwischen den Festpunkten 1 und 3 ein Detailmessprofil angelegt (mittlerer Festpunktabstand 20 m).

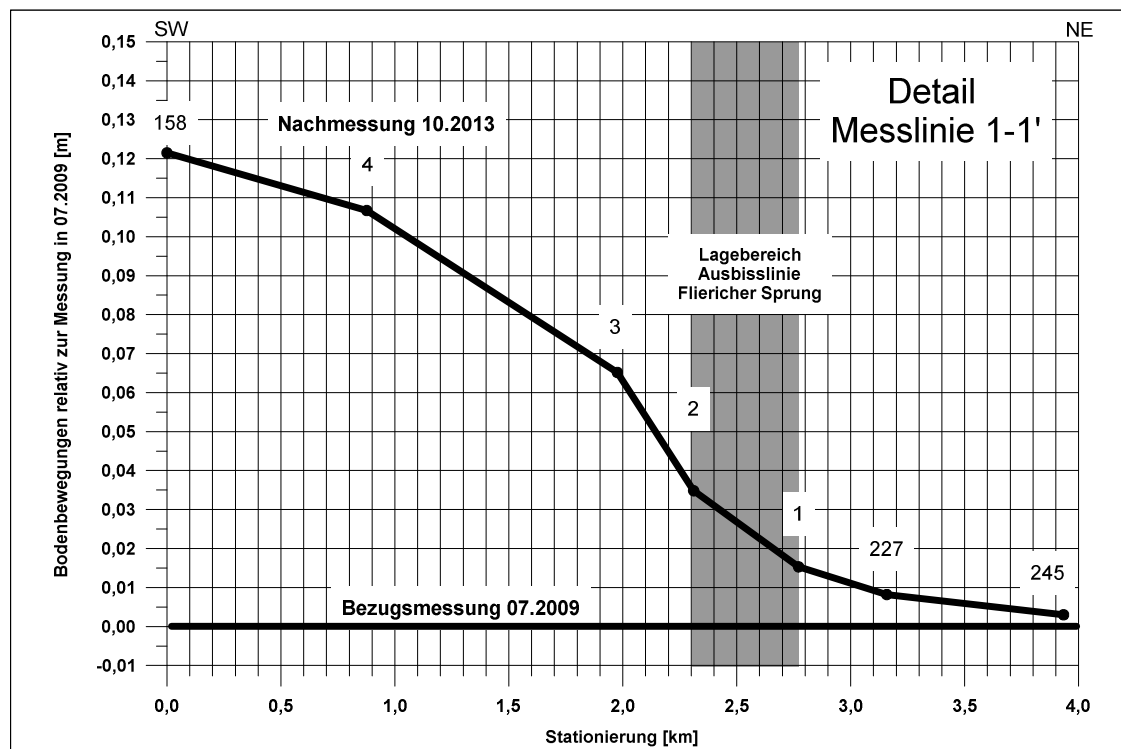


Abbildung 13: Entwicklung der Bodenbewegungen am Fliericher Sprung im Zeitraum 12.2009 bis 10.2013 – Detail aus Messlinie 1-1'

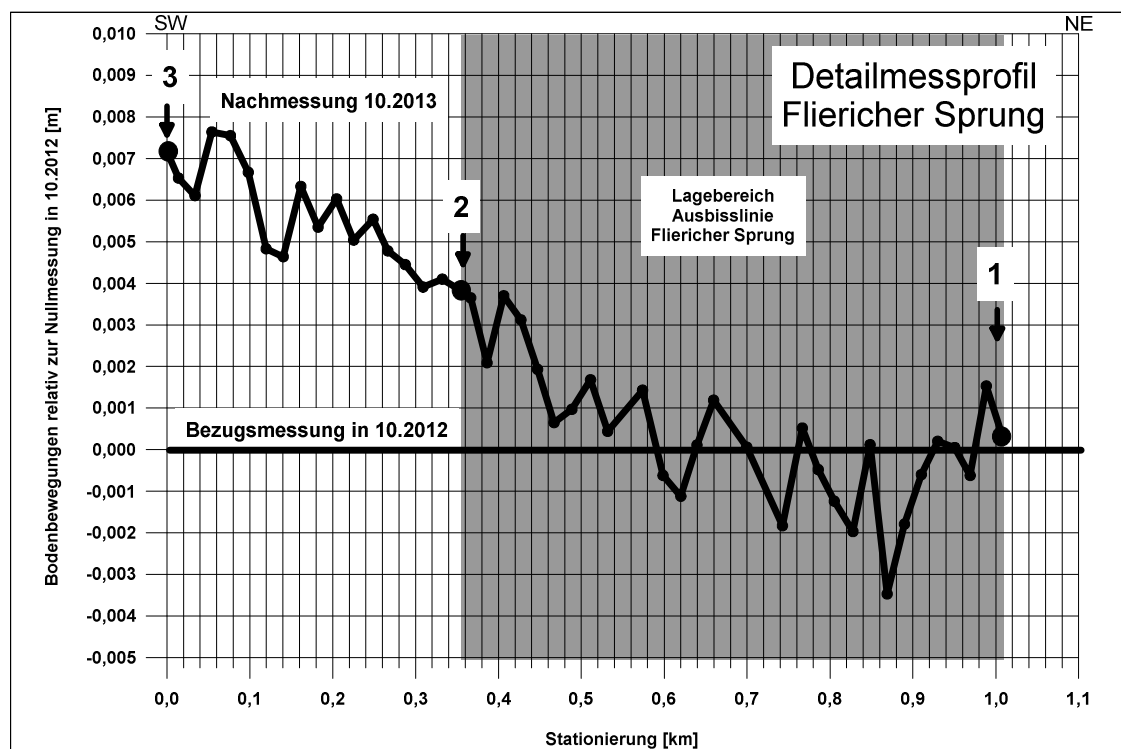


Abbildung 14: Entwicklung der Bodenbewegungen am Fliericher Sprung im Zeitraum 10.2012 bis 10.2013 - Detailmessprofil

Die relativen Höhenänderungen zwischen der Nullmessung in 10.2012 und der Nachmessung in 10.2013 sind in Abb. 14 dargestellt. Auch im Detailmessprofil zeigt sich eine sukzessive Abnahme aus dem Abbaubereich bis an den Fliericher Sprung; die Ausbildung einer potenziell schadensrelevanten Unstetigkeit ist hier nicht erkennbar.

Etwa 460 m nordwestlich der Abbaugrenze klingen die Hebungsbewegungen aus (rd. 100 m nordöstlich Festpunkt 2). Im weiteren Verlauf der Messlinie schwanken die Messwerte im Rahmen der Messgenauigkeit (± 2 bis 3 mm) um die Nulllinie.

Die Kinematik ist im Detail im Rahmen der weiteren Nachmessungen zu verifizieren.

3.2.6 Perspektiven der weiteren Hebungsentwicklung

Der Grubenwasseranstieg ist im Bereich des Bergwerks Königsborn weit fortgeschritten; das Druckniveau wird mittelfristig das Druckniveau der Deckgebirgsaquifere erreichen (Druckausgleich). Nach dem bisherigen Verlauf der Bodenhebungen und den Erkenntnissen aus den anderen untersuchten Hebungsbereichen ist davon auszugehen, dass die Hebungsbewegungen in den nächsten Jahren abklingen.

Die maximalen Bodenhebungen werden damit auch hier voraussichtlich Beträge in einer Größenordnung um 0,3 m erreichen. Bergschäden infolge differenzieller Bodenhebungen wurden im Bereich des Bergwerks Königsborn bisher nicht festgestellt.

3.3 Folgerungen für die Risikoabschätzung

Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Bodenhebungen im Bereich des Bergwerks Königsborn korreliert sehr gut mit den Erkenntnissen aus den Stilllegungsbereichen des Aachener und Südlimburger sowie des Erkelenzer Reviers. Auch die ersten Ergebnisse aus der Bearbeitung des Flutungsbereiches Bergwerk Westfalen liefern eine vergleichbare Kinematik der Hebungsabläufe.

Dies zeigt, dass die aus den Erfahrungen in diesen Flutungsbereichen abgeleiteten Modellvorstellungen zu Ursachen, Kinematik und Risikofaktoren flutungsbedingter Bodenhebungen vom Grundsatz her auf das Ruhrrevier übertragen werden können.

Insbesondere bestätigt sich auch die besondere Bedeutung der hydraulischen Wechselwirkungen zwischen Steinkohlengebirge und dem basalen Deckgebirgsaquifer für die Entwicklung der Bodenhebungen. Dies äußert sich auch in der Ausdehnung der Hebungsbereiche, die in Abhängigkeit von der Reichweite der durch den Grubenwasseranstieg verursachten Druckhöhenänderungen im basalen Deckgebirgsaquifer weit über die Abbaurandbereiche sowie auch den „Senkungsnullrand“ hinaus gehen können.

Die bisherigen Erkenntnisse insbesondere aus dem Bereich Königsborn zeigen aber auch, dass das Risiko von Schäden an der Geländeoberfläche infolge differenzieller Bodenhebungen in den Bereichen mit Kreidedeckgebirge signifikant geringer ist, als in den tektonisch aktiven Tertiärsenken der Niederrheinischen Bucht (Fallbeispiel Erklenzer Revier, Wassenberg). Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus den Kreidegebieten des Südlimburger Reviers.

Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Ergebnisse des Forschungsvorhabens lassen sich so qualitative Prognosen über die Entwicklung von Bodenhebungen im Zuge von Bergwerksflutungen im Ruhrrevier ableiten und Risikobereiche identifizieren.

4. Grundlagen einer Klassifikation von Einwirkungspotenzialen flutungsbedingter Bodenhebungen für die Risikobewertung

Als Grundlage für eine grundsätzliche Differenzierung der Risiken aus Bodenhebungen im Zuge des Grubenwasseranstiegs in Bereichen des Steinkohlentiefbergbaus mit Deckgebirgsüberlagerung wurden anhand der Untersuchungsergebnisse des Forschungsprojektes Kriterien für die Aufstellung von Einwirkungsklassen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von schadensrelevanten Bodenhebungsdifferenzen/Unstetigkeiten zusammengestellt.

Als grundlegender Faktor einer solchen Risikozone wird das Vorhandensein einer das Steinkohlen- sowie auch das Deckgebirge durchschlagenden tektonischen Störungszone angesehen. Darüber hinaus sind vor allem folgende Faktoren bei der Risikoanalyse zu bewerten:

- hydraulische Wirksamkeit der Störungszone
- mechanische Eigenschaften der Störungszone
- Ausmaß der hydraulischen Wechselwirkung zwischen Steinkohlengebirge und Deckgebirge im Umfeld der Störungszone
- Vorhandensein von Unstetigkeiten aus der Abbauphase
- räumliche Lage des Einstaubereichs zur Störungszone (einseitiger/beidseitiger Einstau)

Ein hohes Einwirkungspotenzial ist dort anzusetzen, wo entsprechend den Verhältnissen im Erklenzer Revier (Wassenberg) bei einseitiger Flutung an einer hydraulisch wirksamen, das Steinkohlengebirge und das Deckgebirge bis an die Geländeoberfläche durchschlagenden tektonischen Störungszone ein signifikanter

einseitiger Anstieg der Druckhöhen auch im basalen Deckgebirgsaquifer erfolgt. Dies ist das bisher einzige Szenario, bei dem massive Bergschäden bekannt geworden sind.

Dort, wo unter den oben beschriebenen tektonischen Randbedingungen keine Wechselwirkung mit dem basalen Deckgebirgsaquifer erfolgt (z.B. bei überlagernden Tonschichten) ist aufgrund des geringeren Dehnungspotenzials im Gebirge auch ein geringeres Einwirkungspotenzial für die Geländeoberfläche anzusetzen.

Ein zusätzlicher Risikofaktor kann hierbei die Geschwindigkeit des Grubenwasseranstiegs sein, die möglicherweise einen auslösenden Impuls für die Reaktivierung einer vorgezeichneten Bewegungsbahn im Gebirge bewirken kann. Auch sind bekannte Unstetigkeiten aus der Abbauphase an einer solchen Störungszone als zusätzlicher Risikofaktor zu bewerten, da sie auf eine „junge“ Reaktivierung der tektonisch vorgezeichneten Bewegungsbahn hindeuten. Daher ist die Bestandsaufnahme der aus der Abbauphase dokumentierten Unstetigkeiten („Unstetigkeitskataster“) eine wichtige Grundlage für die Risikoabschätzung.

Nach dem heutigem Kenntnistand ist das Auftreten schadensrelevanter Bodenhebungen auch dort nicht auszuschließen, wo bei beidseitiger Flutung einer das Steinkohlengebirge und das Deckgebirge durchschlagenden tektonischen Störungszone in deren Ausbissverlauf an der Geländeoberfläche Unstetigkeiten aus der Abbauphase dokumentiert sind. Für solche Szenarien ist allerdings ein deutlich geringeres Einwirkungspotenzial anzusetzen.

Nach diesen Kriterien lassen sich potenzielle Unstetigkeitszonen schon in der Planungsphase des Grubenwasseranstiegs ausweisen und hinsichtlich ihres Einwirkungspotenzials auf Einrichtungen an der Geländeoberfläche klassifizieren. Die Schadensrelevanz orientiert sich dabei an den einschlägigen Bewertungsgrundlagen für die Bewertung von Gebäudeschäden. Sonderbauwerke oder sensible Infrastruktureinrichtungen mit erhöhten Anforderungen an die Lagestabilität sind dabei nicht berücksichtigt. Hierfür muss eine Einzelfallbetrachtung vorgenommen werden.

Eine konkrete überregional einsetzbare Klassifikation potenzieller Einwirkungsbereiche nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens schadensrelevanter Unstetigkeiten ist in Bearbeitung.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass den Gebirgsbereichen mit mächtigem Kreidedeckgebirge im Ruhrrevier ein gegenüber den schadensrelevanten Verhältnissen im Erkelenzer Revier deutlich herabgesetztes Einwirkungspotenzial zuzuordnen ist.

Die grundsätzliche Bewertung des Einwirkungspotenzials bezieht sich auf einen vollständigen Anstiegszyklus mit vollständiger Flutung einer Grube und Anstieg des

Standwasserniveaus in das Deckgebirgsniveau bis zum Druckausgleich des Standwasserniveaus mit den Druckhöhen der hydraulisch kommunizierenden Deckgebirgsgrundwasserleiter.

Bei Teilflutungen innerhalb des Grubengebäudes sind die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von schadensrelevanten Bodenhebungsdifferenzen in den einzelnen Einwirkungsklassen nochmals deutlich herabgesetzt, insbesondere dann, wenn die Deckgebirgsbasis nicht eingestaut wird. Bei der Risikoabschätzung ist daher im Falle von Teilflutungen neben der Flächennutzung auch das absolute „Teilhebungspotenzial“ zu berücksichtigen.

Die Bewertung der einwirkungsrelevanten Faktoren und die daraus abzuleitende Klassifizierung von potenziell schadensrelevanten Einwirkungsbereichen flutungsbedingter Bodenhebungen ist auf der Grundlage des laufenden Erkenntnisgewinns auch im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojektes fortzuschreiben.

5. Fazit und Ausblick

Mit dem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Monitoring im Altbergbaubereich“ (ABSMon) der RAG wurden erstmals umfassende Modellvorstellungen über Ursachen, Kinematik und Risikofaktoren von Bodenhebungen in den nordrhein-westfälischen Flutungsbereichen des Steinkohlenbergbaus entwickelt. Die Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für das Risikomanagement im Rahmen der weiteren Flutungen im Ruhrrevier und dienen auch einer Versachlichung der Diskussion über mögliche Bergschäden.

Für die Umsetzung der Erkenntnisse in eine konkrete Risikobewertung vor Ort wurde ein Katalog von Risikofaktoren aufgestellt und ein erster Entwurf für eine Klassifizierung von potenziellen Einwirkungsbereichen nach ihrem Risikopotenzial erarbeitet.

Auf der Grundlage der frühzeitigen Identifikation und Klassifizierung von potenziellen Einwirkungsbereichen können Risiken bewertet und ein gezieltes Monitoring durchgeführt werden.

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens werden derzeit auf weitere Flutungsbereiche des Ruhrreviers ausgeweitet.

Literatur

BAGLIKOW, V. (2003): Bergschäden nach Beendigung der Grubenwasserhaltung im tiefen Bergbau.- *Das Markscheidewesen* 110, Nr. 2, S. 45-49, 7 Abb., Verlag Glückauf; Essen.

BAGLIKOW, V. (2010): Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier.-Diss. RWTH Aachen veröffentlicht in *Schriftenreihe Inst. f. Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau an der RWTH Aachen*, Heft 1-2010, 121 S., 84 Abb.; Aachen.

GRIGO, W., HEITFELD, M., ROSNER, P. & WELZ, A. (2007): Ein Konzept zur Überwachung der Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Ruhrgebiet.- *Tagungsband 7. Altbergbau-Kolloquium*, S. 250 - 269, 10 Abb.; Freiberg.

HEITFELD, K.-H., HEITFELD, M., ROSNER, P. & SAHL, H. (2003): Kontrollierter Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier.- *3. Aachener Bergschadenkundliches Kolloquium*, H. 97, S. 71-85, 5 Abb.; Aachen.

HEITFELD, M., ROSNER, P., MÜHLENKAMP, M. & SAHL, H. (2004): Bergschäden im Erkelenzer Steinkohlenrevier. - *4. Altbergbau-Kolloquium*, 14 S., 10 Abb.; Leoben (Österreich).

OBERSTE-BRINK, K. (1940): Die Frage der Bodenbewegungen infolge Bergbaus.- *Glückauf*, 76, S. 249-256; Essen.

PÖTTGENS, J.J.E. (1985): Bodenhebung durch ansteigendes Grubenwasser.- *The Development Science and Art of Minerals Surveying, Proceedings 6th International Congress, International Society of Mine Surveying*, vol. 2, p. 928 - 938; Harrogate (GB).

ROSNER, P. (2011), Die Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Aachener- und Südlimburger Steinkohlenrevier - eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge.- Diss RWTH Aachen, 194 S., 67 Abb., 7 Tab., 4 Anh., 7 Anl.; Aachen.

SPRECKELS, V. & MUSIEDLAK, J. (2010): Messkonzept zur Überwachung der Tagesoberfläche mittels hochpräziser Satellitengeodäsie und Radarinterferometrie.- *Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg*, Heft 2010-1. 11. Geokinematischer Tag, 6.-7. Mai 2010, Freiberg, S. 259-271.