

Gutachterliche Beurteilung der Bodensenkungen im Untersuchungsgebiet Berrendorf

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier

Consultant für Ingenieurgeodäsie

Wilhelm Busch Straße 21

30880 Laatzen

Auftraggeber:

Geschäftsstelle der Anrufungsstelle Bergschaden Braunkohle

Nordrhein-Westfalen bei der Bezirksregierung Köln

November 2012

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	3
2. Zu den Untersuchungen von Prof. Kuhlmann.....	3
2.1 Ausgangslage	3
2.2 Bewegungsmodelle und deren Relevanz für Bergschäden	5
2.2.1 Modelle für großflächige Bodenbewegungen	5
2.2.2 Modelle für lokale Bodenbewegungen	7
2.3 Methodischer Ansatz von Prof. Kuhlmann.....	8
2.4 Bewertung der erzielten Ergebnisse	9
2.4.1 Ortslage Berrendorf	9
2.4.2 Ortslage Heppendorf.....	11
2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse von Prof. Kuhlmann	12
3. Weiterentwicklung I: Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse von Bodenbewegungen	13
4. Weiterentwicklung II: Innovative messtechnische Entwicklungen	15
4.1 Radar-Interferometrie	15
4.2 Kinematische GNSS Messungen	17
5. Zusammenfassung.....	17
Literatur	18

1. Aufgabenstellung

Im Bereich des Rheinischen Braunkohlenreviers werden seit Beginn der Kohlegewinnung großräumige *Sümpfungsmaßnahmen* durchgeführt, da nur so das Arbeiten in den heute z.T. mehrere 100 m tiefen Tagebauen überhaupt ermöglicht wird und die Standfestigkeit der Tagebauböschungen nur hierdurch gewährleistet werden kann.

Zum Nachweis der aus den Sümpfungsmaßnahmen bzw. den Bergbauaktivitäten resultierenden Bodenbewegungen werden in den betroffenen Gebieten in zeitlichen Abständen von wenigen Jahren vom Betreiber in Verbindung mit der Landesvermessung großräumige Nivellementsmessungen durchgeführt. Prof. Dr.-Ing. H. Kuhlmann, Geodäsieprofessor an der Universität Bonn, hat im Jahre 2011 mehrere Gutachten zur Beurteilung der aus wiederholten Nivellements ableitbaren Bodensenkungen für die Untersuchungsgebiete „Ortslage Berrendorf“ und „Ortslage Heppendorf“ erstellt. Diese Gutachten von Prof. Kuhlmann stehen mir als Grundlage für diese gutachterliche Stellungnahme zur Verfügung.

Aufgabe dieses übergeordneten Gutachtens ist es, die gutachterlichen Aussagen, Resultate und Schlussfolgerungen von Prof. Kuhlmann unabhängig zu bewerten, wobei hier insbesondere der Frage nachzugehen ist, welche Konsequenzen sich aus diesen Ergebnissen und Einschätzungen im Hinblick auf das Vorkommen von konkreten Bergschäden an Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen ziehen lassen. Es wird in dieser Stellungnahme deutlich herausgearbeitet, dass zwischen einer allgemeinen Gefährdung (generelle Disposition für Bergschäden = Bergschadenrisiko) und den tatsächlichen Schäden an Einzelbauwerken unterschieden werden muss.

Zusätzlich sollen in diesem Gutachten auch neuere Methoden (Sensorik und Auswertansätze) ansatzweise aufgezeigt werden, die jetzt oder in der Zukunft als Alternative zu den bisher eingesetzten Nivellements geeignet erscheinen, um Bodenbewegungen im Braunkohlenrevier flächenhaft und/oder objektbezogen zu erfassen und zu bewerten.

2. Zu den Untersuchungen von Prof. Kuhlmann

2.1 Ausgangslage

Grundlage für die Gutachten von Prof. Kuhlmann waren die Ergebnisse von wiederholten Nivellementsmessungen, wobei ich - bei Kenntnis der verantwortlichen Stellen - davon ausgehe, dass die Höhenmessungen in zusammenhängenden Messkampagnen mit Bezug zu stabilen Anschlusspunkten gewonnen wurden und die zur Verfügung gestellten NHN-Höhen das Ergebnis einer Netzausgleichung nach dem anerkannten Stand der Technik wiedergeben. Zusätzlich standen für sämtliche Höhenpunkte auch die Lagekoordinaten im amtlichen Koordinatensystem (Gauß-Krüger Koordinaten) zur Verfügung.

Es lagen keine Informationen über die erreichten Standardabweichungen der Höhenangaben vor, die normalerweise aus einer Analyse der Messwerte gewonnen wird. Die Messunsicherheit der Höhen wurde daher theoretisch unter Bewertung des eingesetzten Verfahrens „Präzisionsnivellement“ und mit Berücksichtigung der Unsicherheit in der Punktvermarkung (Punktunruhe) zu $\sigma = 1,0$ mm für eine Höhendifferenz aus zwei Epochen abgeschätzt. Diese Abschätzung der erreichten Unsicherheit ist vielleicht etwas zu optimistisch, was aber für gewonnenen Erkenntnissen und die hieraus zu ziehen-

den Konsequenzen keine entscheidende Bedeutung hat. Diese Abschätzung der erreichten Unsicherheiten legt allerdings das Niveau für das Aufzeigen bzw. die Analyse von abweichenden Bewegungen einzelner Punkte fest, siehe Abschnitt 2.4.

Folgende Datensätze wurden von RWE Power an Prof. Kuhlmann übergeben:

Ortslage Berrendorf: Epoche 05. 1992
 Epoche 02. 1999
 Epoche 04. 2007

Ortslage Heppendorf: Epoche 03. 1998
 Epoche 05. 2006
 Epoche 02. 2009
 Epoche 04. 2011

Exemplarisch ist die Anordnung der Messpunkte in einer Ortslage in Abb. 1 dargestellt. Man erkennt, dass die Höhenbolzen, die i.d.R. an massiven (?) Gebäuden angebracht werden, einigermaßen gleichmäßig über die Ortslage verteilt sind, sich aber - aus Gründen der Erreichbarkeit bei der Messung - stets in der Nähe von Straßen und Wegen befinden. Auch bei den späteren Verdichtungen der Höhenpunkte ist dieses Prinzip beibehalten worden. In der Konsequenz liegt damit zwar eine flächenhafte Höhenbestimmung für den gesamten Bereich vor, eine direkte, d.h. unmittelbar messtechnisch bestimmte Information über Höhenänderungen ist aber nicht für jedes Gebäude verfügbar.

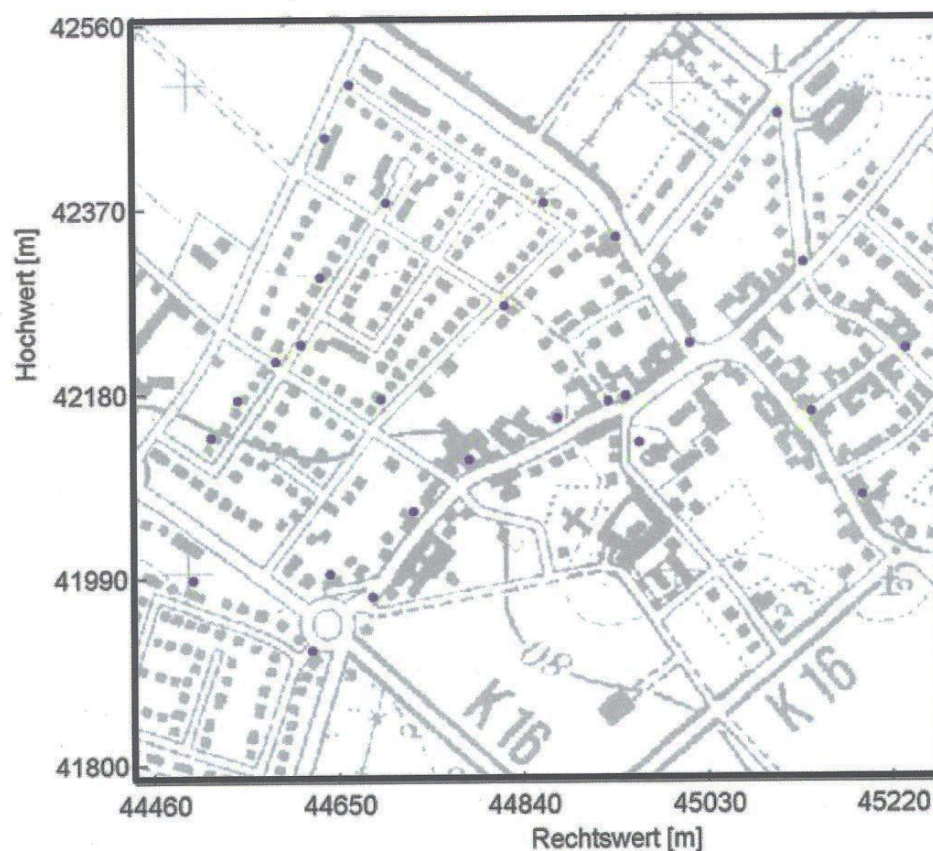


Abb. 1: Exemplarische Anordnung der Höhenpunkte in der Ortslage Heppendorf im Jahre 1998, später wesentlich verdichtet (Gutachten Heppendorf 2011)

2.2 Bewegungsmodelle und deren Relevanz für Bergschäden

2.2.1 Modelle für großflächige Bodenbewegungen

Entscheidend für die Aussagekraft der vorliegenden Untersuchungen sind die zugrunde liegenden Bewegungsmodelle für das Braunkohlenrevier und deren Relevanz für das Auftreten von Bergschäden an Bauwerken. Geht man von der enormen flächenhaften Ausdehnung der Sümpfungsgebiete und dem langandauernden Vorgang der Grundwasser (GW)-Entnahme im rheinischen Revier aus, so ist es sicherlich gerechtfertigt, auch die Auswirkungen auf die Erdoberfläche in der 1. Modellstufe als sich nur allmählich ändernde, d.h. gleichförmige, flächenhafte Vertikalbewegung anzusetzen. In Anlehnung an die Publikationen DIN 21917, Kratsch (2008), Pohl (2002) und Preusse/Schulte (2011) kann – stark vereinfacht – von folgenden Szenarien ausgegangen werden:

- Die in erster Näherung zu erwartenden gleichmäßigen Senkungen oder Hebungen führen nicht zu Schädigungen an Bauwerken; allein für linienhafte Objekte, wie Kanäle oder Wasserstraßen, sind hierdurch Beeinträchtigungen zu erwarten.
- Schieflagen oder Schiefstellungen kennzeichnen unterschiedliche Senkungen bzw. Hebungen und werden i.d.R. hervorgerufen durch unterschiedliche hydrogeologische Verhältnisse. Für lokal benachbarte Punkte werden Schiefstellungen als 1. Ableitung der Senkungsbeträge ermittelt. Für Wohngebäude gilt die Gebrauchstauglichkeit als „stark beeinträchtigt“, wenn Schieflagen von mehr als 25 mm/m erreicht werden. Jedoch führen im Bereich des Steinkohlenbergbaues bereits Schiefstellungen von mehr als 2 mm/m zu ersten Ansprüchen auf Entschädigung.
- Die Krümmung ist die 2. Ableitung der Senkungsbeträge. Sie charakterisiert Schiefelageunterschiede und ist besonders für Gebäude mit ausgedehnten Grundrissen von Bedeutung, wobei natürlich auch die konstruktive Ausbildung der Gebäude mit zu beachten ist. Als Auswirkung stärkerer Krümmungen kann es vor allem zu Rissbildungen kommen. Häufig wird als konkrete Maßzahl zur Einschätzung von möglichen Schädigungen der Krümmungsradius (Kehrwert der Krümmung) herangezogen. In der Literatur wird bei der Auswirkung von Krümmungen zwischen sogenannten Sattel- und Muldenlagen unterschieden, da diese Lagen einen unterschiedlichen Einfluss auf die möglichen Schädigungen haben. Allgemein wird jedoch als untere Grenze für den Krümmungsradius für kleinere Wohngebäude mit einem Grundriss von 10 x 10 m ein Grenzwert von 6 km zur Vermeidung von Rissen und ein Grenzwert von 2 km zur Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit angesehen. Prof. Kuhlmann nimmt einen Grenzwert von etwa 5 km als untere Grenze an.
- Horizontale Längenänderungen, die bergmännisch ausgedrückt zu Zerrungen und Pressungen führen, beanspruchen sämtliche Bauwerkskonstruktionen, d.h. sind abhängig von der spezifischen Konstruktionsart und der Größe der Bauwerke. In den Untersuchungen von Prof. Kuhlmann kann zu eventuellen horizontalen Bewegungen keine Aussagen gemacht werden, da die Grundlage seiner Untersuchungen nur wiederholte Nivellementsmessungen sind, mit denen allein die Höhenkomponente bestimmt werden kann. Weitergehende Ausführungen zu dieser Thematik finden sich im Abschnitt 4.2.

Wie in Abb. 2 skizziert, hat Prof. Kuhlmann eine flächenhafte Approximation des gesamten Senkungsverhaltens in den einzelnen Ortslagen zwischen je zwei Messepochen vorgenommen. Zur Interpretation dieser Bewegungen im Hinblick auf Schäden an Gebäuden sind die allgemein als relevante angesehenen Parameter „Schiefstellung“ und „Krümmungsradius“ abgeleitet worden.

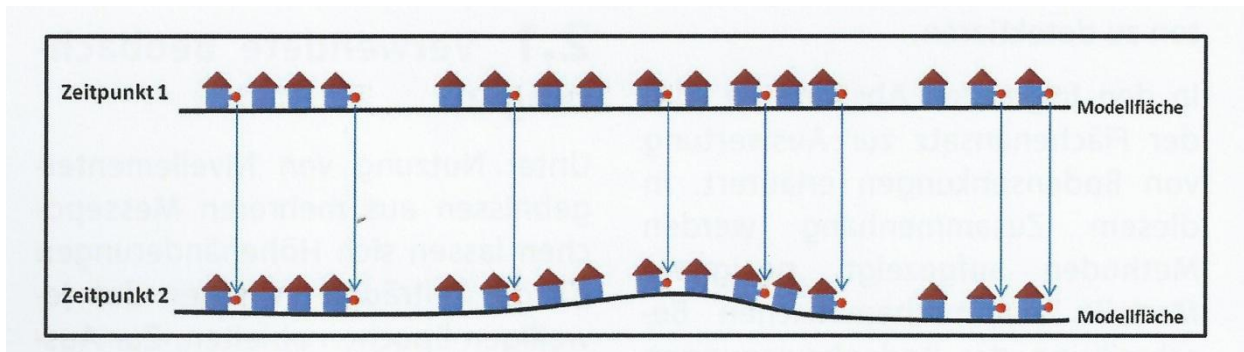


Abb. 2: Flächenhafter Ansatz für die Modellierung von Bodenbewegungen (Kuhlmann 2011)

In der vorstehenden Abbildung wird dieser Flächenansatz verdeutlicht, der ausgehend von den gemessenen Höhenänderungen zwischen jeweils zwei Epochen das Gesamtverhalten des betrachteten Gebietes, hier der untersuchten Ortslage, beschreibt. Es wird deutlich, dass für die gegebene Datelage mit Höhenpunkten an einer Vielzahl von Gebäuden zwar das generelle Bewegungsverhalten der Erdoberfläche und der sich darauf befindlichen Bauwerke sehr gut bestimmbar ist, für die Gebäude und Infrastruktureinrichtungen ohne Messpunkte das Bewegungsverhalten aber nur - im Idealfall - durch Interpolation bestimmt wird. Für Gebäude völlig außerhalb des messtechnisch erfassten Bereiches sind die Ergebnisse des Flächenansatzes in jedem Fall wenig zuverlässig.

Die mathematische Approximation der Höhendifferenzen zwischen je zwei Epochen durch ein zweidimensionales Flächenpolynom ist in jedem Fall gerechtfertigt und entspricht dem Stand der Wissenschaft und Technik. Durch die Beschränkung auf Terme niedriger Ordnung, genauer durch Anwendung anerkannter mathematisch-statistischer Tests zur Beschränkung der Polynomkoeffizienten auf signifikante Koeffizienten, wird die Forderung nach ausreichender Glattheit des Bewegungsverhaltens erfüllt. Allein im Randbereich ist - nach den Gesetzen der Mathematik - die Approximation durch ein Polynom mit etwas größerer Unsicherheit behaftet.

Der Ansatz von Prof. Kuhlmann geht davon aus, dass Punkte/Bereiche, die durch dieses Flächenmodell nicht erfasst werden können, also statistisch als „Ausreißer“ gegenüber der Flächenfunktion eingestuft werden, ein Indiz für ein abweichendes Bewegungsverhalten darstellen und entsprechend weitergehend analysiert werden sollten, siehe Abschnitt 2.3.

Diese mehr oder weniger gleichförmige Approximation erlaubt auch nur flächenbezogene Aussagen zu den sich ergebenden Neigungen, Krümmungen und Schiefstellungen. Die Ergebnisse sind sehr gut geeignet, um Aussagen über das „Bergschadenrisiko“ zu machen, d.h. das grundsätzliche Risiko für einzelne Bereiche innerhalb eines Ortes für das Auftreten von Schädigungen. Als Mittel zur Beweissicherung für messtechnisch nicht erfasste Einzelgebäude ist dieser Ansatz kaum geeignet, da an vielen Stellen lokale Effekte und Besonderheiten auftreten können, die so nicht erfassbar sind.

2.2.2 Modelle für lokale Bodenbewegungen

Schädliche Bodenbewegungen können i.d.R. nur in Bereichen mit geologischen Besonderheiten auftreten. In den Gutachten von Prof. Kuhlmann wird sehr wohl auf derartige, für das Braunkohlenrevier typische, Bewegungsmuster eingegangen ohne allerdings auf deren Analyse eingehen zu können. Als Modelle für lokale Bewegungen sollen aufgeführt werden:

Bewegungsaktive, hydrologisch wirksame tektonische Störungen.

Diese behindern eine gleichmäßige Wirkung der Grundwasserabsenkung auf die Geländeoberfläche und haben Auswirkungen auf den freien und den in tieferen Schichten gelegenen gespannten GW-Horizont. Die Auswirkung an der Oberfläche kann ein Versatz in den Höhenlagen sein, siehe Abb. 3. Als theoretisch möglich wird auch eine horizontale Verschiebung dieser Störung angesehen, die von Klostermann (1991) als „horizontale Blattverschiebung“ bezeichnet wird; siehe hierzu die Vorschläge zur messtechnischen Erfassung in Abschnitt 4.2.

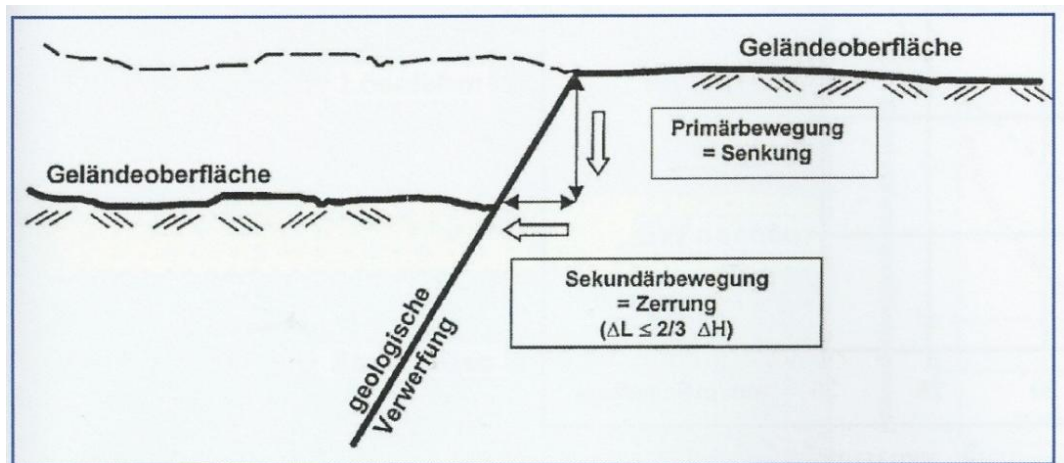


Abb. 3: Bewegungsmuster für eine bewegungsaktive, hydrologisch wirksame tektonische Störung (Preusse/Schulte 2011)

Derartige Störungen können bei dem „datenbasierten“ Ansatz von Prof. Kuhlmann nach Abschnitt 2.3 kaum erkannt werden. Punkte mit abweichendem Bewegungsverhalten, die z.B. gemäß der in Abb. 6 skizzierten Methodik statistisch detektiert werden, können zwar als lokale Unregelmäßigkeit interpretiert werden, eine Zuordnung zu einem der hier aufgezeigten lokalen Bewegungsmustern ist aber nicht zuverlässig möglich.

Vom Grundwasser umschlossene Aueböden

Hierbei handelt es sich um Überschwemmungsböden, die mit humosen Einlagerungen, z.B. Torflinsen, durchsetzt sind, siehe das Schema in Abb. 4. Werden diese Böden entwässert, so können lokal recht unterschiedliche und damit für Bauwerke schädliche Setzungen entstehen.

Hier gilt die vorstehend gemachte Schlussfolgerung entsprechend: Da keinerlei Vorkenntnis (Lokation und Ausdehnung) über eventuell vorhandene Aueböden in den Auswertansatz von Prof. Kuhlmann nach Abschnitt 2.3 einfließen, können detektierte Einzelpunktbewegungen auch nicht diesem Bewegungsmuster zugeordnet werden. Auch hier erscheint eine weitergehende Untersuchung zu den statistisch aufgedeckten Abweichungen erforderlich.

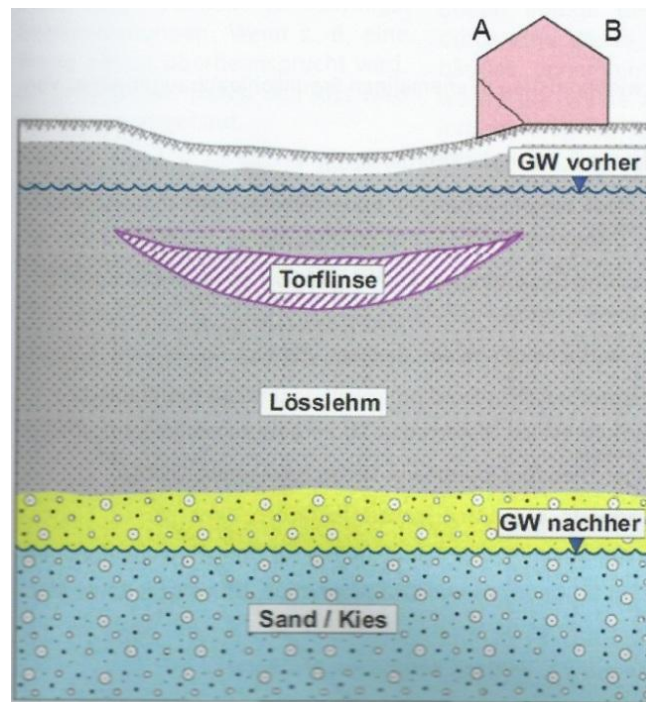


Abb.4: Ungleichmäßige Setzungen in Auegebieten (Preusse/Schulte 2011)

Gründungsprobleme

Schließlich sind in den untersuchten Ortslagen auch die Gründungen der Gebäude sicherlich unterschiedlich. Je nach Gründung kann ein Gebäude empfindlich auf GW-Absenkungen reagieren, was z.B. für Holzgründungen zutrifft. Auch die konstruktiven Grundelemente sind im Hinblick auf Schädigungen unterschiedlich anfällig. Nur eine Einzelanalyse über die Besonderheiten eines Objektes in Verbindung mit Kenntnissen über das generelle Bergschadenrisiko kann hier zielführend sein.

2.3 Methodischer Ansatz von Prof. Kuhlmann

Der grundlegende methodische Ansatz in den vorliegenden Gutachten besteht in der Approximation des Bewegungsverhaltens zwischen jeweils zwei Epochen durch ein Flächenpolynom niedriger Ordnung, siehe auch Niemeier (2008). Durch die angesetzten Parameter können folgende Bewegungsmuster sehr gut erfasst werden:

- gleichmäßige Absenkungen,
- Schiefstellungen und
- weitere, großräumige Höhenänderungen.

Die mathematische Behandlung der Datensätze ist völlig korrekt und überzeugend; die Methodik zur Approximation der gemessenen Bodenbewegungen durch einen optimalen/optimierten funktionalen Ansatz erfolgt unter Beachtung der Unsicherheit der Höhendaten und mit Prüfung der Signifikanz der Einzelparameter im Flächenansatz.

Das so parametrisierte Bewegungsmuster wird in folgerichtigerweise genutzt, um hieraus Krümmungen und Schiefstellungen abzuleiten, den bei Bergschäden normalerweise betrachteten kritischen Größen für das Schädigungsrisiko von Gebäuden. Aus einer Aufarbeitung der einschlägigen Literatur über Berg-

schäden leitet Prof. Kuhlmann Grenzwerte für Krümmungen und Schiefstellungen ab und stellt sie den selbst ermittelten Größen gegenüber. Der Untersuchungsansatz ist ausgelegt auf ein umfassendes Bild über das allgemeine Schädigungspotential durch die Sumpfungsmaßnahmen.

Eine Besonderheit in dem gewählten Ansatz ist die Beschränkung allein auf die Ergebnisse der wiederholten Nivellements. Man spricht von einem allein „datengetriebenen“ Ansatz. Dieser Verzicht auf jegliche weitergehende Information, statistisch auch „Vor-Information“ genannt, wird von Prof. Kuhlmann damit begründet, dass dieser Ansatz „hypothesenfrei“ sei, d.h. unabhängig von Annahmen und Vermutungen über tatsächliche Senkungen bzw. Bewegungsmuster.

Aus einer Analyse der Punkte mit größeren, statistisch gesicherten Abweichungen gegenüber dem Flächenpolynom sollen nun Rückschlüsse auf weitergehende, lokale Bewegungsmuster gemäß Abschnitt 2.2.2 gezogen werden. Konkret hofft man z.B. die vorhandenen Auegebiete bzw. bewegungsaktive tektonische Störungen aus einer Analyse dieser Abweichungen („Residuen“) erkennen zu können. Allerdings ist - wie oben erwähnt - die Festlegung der Höhenpunkte vorrangig nach dem Kriterium „Zugänglichkeit“ erfolgt. In den letzten Kampagnen ist die Punktzahl zwar deutlich erhöht worden, aber auch bei den neuesten Messungen sind noch längst nicht alle Gebäude einer Ortslage erfasst. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eventuell vorhandene Aueböden oder tektonische Störungen messtechnisch überhaupt nicht erfasst bzw. nicht durch eine ausreichende Anzahl von Punkte diskretisiert worden sind.

Damit enthält dieser Ansatz keine belastbaren Informationen für/über das Auftreten von Schädigungen an Einzelgebäuden.

2.4 Bewertung der erzielten Ergebnisse

2.4.1 Ortslage Berrendorf

Es werden zwei Analysen vorgestellt, der Vergleich der Messungen von 1992 mit 2007 sowie der Vergleich von 1999 mit 2007. Für den ersten Vergleich mit einer Zeitspanne von 15 Jahren standen 194 in beiden Epochen bestimmten Messpunkte zur Verfügung, für den zweiten Vergleich mit einer Zeitspanne von 8 Jahren waren es mit 638 deutlich mehr identische Höhenpunkte.

Die Approximation mit einer Flächenfunktion, die in Abb. 5 für das Zeitintervall 1992 – 2007 wiedergegeben ist, darf als korrekt und gelungen angesehen werden. In der Abb. 6 ist dargestellt, dass beim Vergleich 1992 mit 2007 nur 15 Punkte detektiert wurden, bei denen die ermittelten Höhendifferenzen nicht mit der Flächenfunktion in Einklang gebracht werden konnten, also als signifikante Abweichungen einzustufen waren. Beim Vergleich 2002 mit 2007 wurden - bei deutlich größerer Anzahl von identischen Punkten - 16 derartige signifikante Abweichungen detektiert.

Diese größeren Residuen traten jedoch stets bei isolierten Punkten auf, also als Einzellokation, so dass im Gutachten von Prof. Kuhlmann mögliche Punktbeschädigungen oder Gründungsprobleme als wahrscheinliche Ursache angesehen wurden. Ein Rückschluss auf die in Abschnitt 2.2.2 skizzierten Phänomene „Aueböden“ oder „tektonische Störung“ konnte in keinem Fall erfolgen, da – wie oben dargelegt – hierzu keine Vorinformationen vorlagen und m.E. aufgrund einer örtlich isolierten Auffälligkeit eine solche Zuordnung kaum möglich ist.

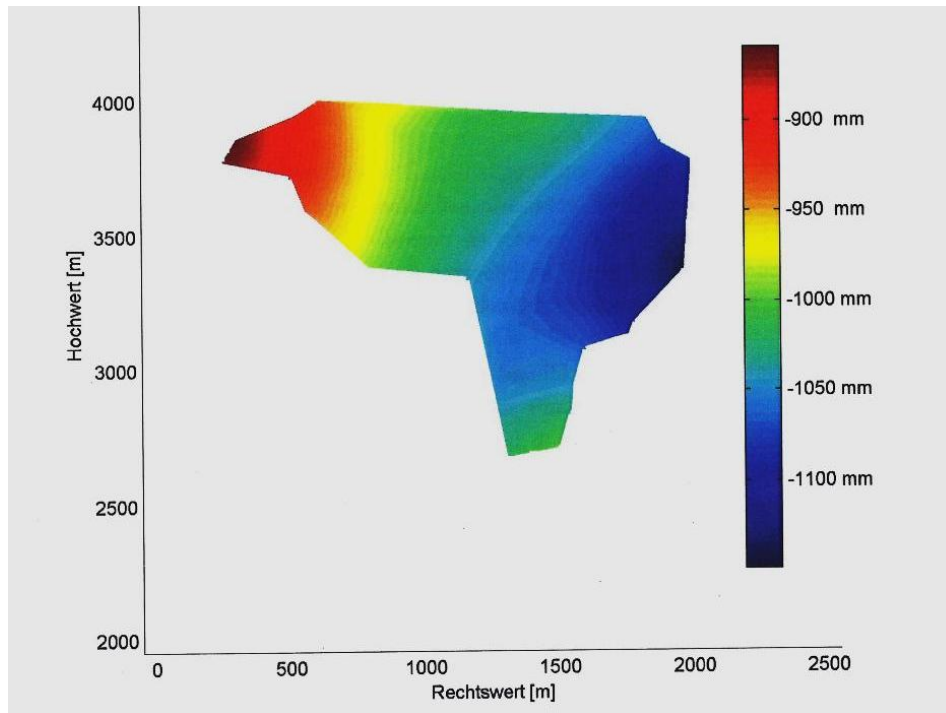


Abb. 5: Darstellung der aus den geschätzten Parametern berechneten Bodensenkungsfläche zwischen 1992 – 2007 (aus Gutachten Berrendorf)

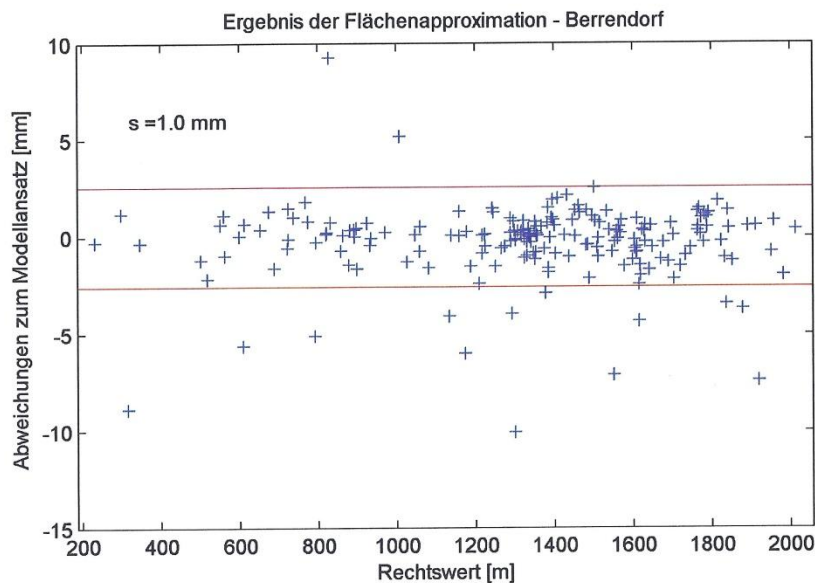


Abb. 6: Residuen nach Approximation der Bodenbewegungen durch das Flächenpolynom (aus Gutachten Berrendorf)

Leider fehlt in den Unterlagen auch eine Aussage darüber, ob die Auffälligkeiten in beiden Vergleichen, d.h. 1992-2007 und 2002 – 2007, bei denselben Punkten aufgetreten sind, so dass eine weitergehende Analyse hätte erfolgen können.

Als minimaler Krümmungsradius wurden 390 km ermittelt (1992-2007), ein Wert, der gemäß Abschnitt 2.2.1 weit über den in der Literatur als kritisch angegebenen Werten für Wohngebäude liegt. Die festgestellten Schiefstellungen liegen bei max. 0,25 mm/m und gelten für Wohngebäude mit einer Seitenlänge von 10 resp. 15 m ebenso als völlig unkritisch.

2.4.2 Ortslage Heppendorf

Für Vergleichszwecke sollten auch die Ergebnisse der Gutachten von Prof. Kuhlmann für die Ortslage Heppendorf mit herangezogen werden, für die Nivellementsergebnisse von 4 Messkampagnen aus den Jahren 1998, 2006, 2009 und 2011 bearbeitet wurden.

In Abb. 7 sind die 174 Messpunkte dargestellt, die für den Epochenvergleich 2009 zu 2011 genutzt werden konnten. Wie ein Vergleich mit Abb. 1 zeigt, ist im Jahre 2009 die Anzahl der Höhenpunkte deutlich erhöht worden, was geodätisch als Punktverdichtung bezeichnet wird. Für den Vergleich 1998-2006 standen nur 42 identische Messpunkte zur Verfügung, von denen 14 aufgrund ihrer ungünstigen geometrischen Anordnung (Randlage) nicht in den Flächenansatz einbezogen wurden. Auch für das Zeitintervall von 2006 bis 2011 standen nur 56 identische Messpunkte zur Verfügung. Durch die deutliche Hinzunahme von Messpunkten im Jahre 2009 wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass nur eine hohe Punktdichte zu aussagefähigen Ergebnissen über die auftretenden Bodensenkungen führen kann.

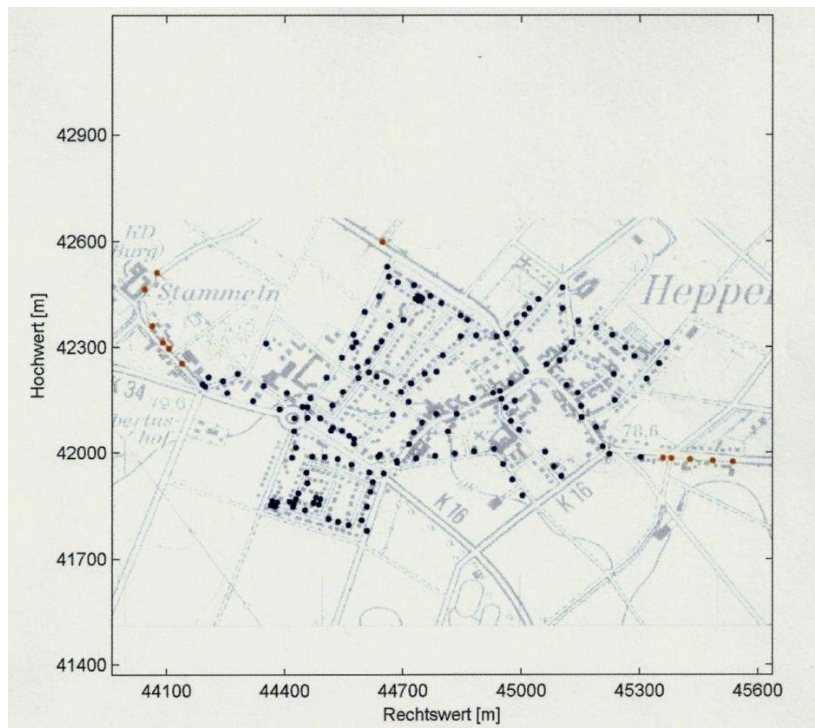


Abb. 7: Verwendetes Punktfeld für den Zeitraum 2009 und 2011 (aus Gutachten Heppendorf)

Für die Modellierung des großräumigen Senkungsverhaltens sind wieder Flächenpolynome angesetzt worden, wobei dieselben mathematischen Ansätze wie für den Bereich Berrendorf verwendet wurden. Die Anzahl der statistisch signifikanten, d.h. für eine zutreffende Beschreibung notwendigen Polynomparameter ist bei den Vergleichen 2008-2006, 2006-2011, 2009-2011 sowie schließlich 1998-2011 gering, was einer recht gleichförmigen Flächenfunktionen zur Approximation des Senkungsverhaltens entspricht.

Signifikante Residuen, die bei dem gewählten Ansatz als Indiz für lokale Inhomogenitäten angesehen werden, sind nur beim Vergleich 2009-2011 für einen einzelnen Randpunkt festgestellt worden. Prof. Kuhlmann schließt hieraus, dass in diesem Untersuchungsgebiet keine „tektonischen Störungen“ oder „Auesetzungen“ vorliegen.

Die minimalen Krümmungsradien von größer als 3000 km liegen weit über den als kritisch angesehenen Grenzwerten, die maximalen Schiefstellungen mit 0,23 mm/m sind ebenfalls für Schädigungsanalysen zu vernachlässigen.

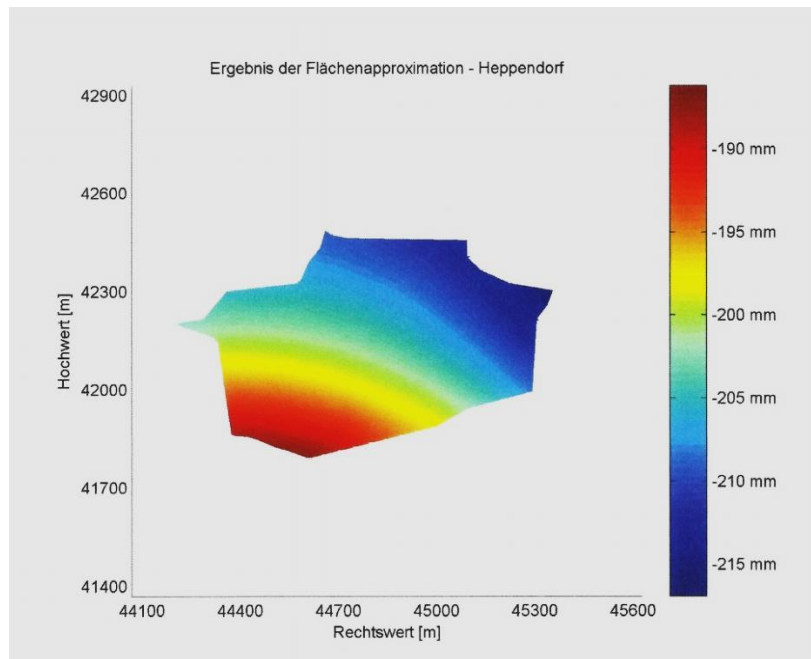


Abb. 9: Darstellung der aus den geschätzten Parametern berechneten Bodensenkungen für Heppendorf, Zeitintervall 2009 – 2011 (aus Gutachten Heppendorf)

2.5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse von Prof. Kuhlmann

Der Ansatz, mittels eines im statistischen Sinne optimal angepassten Flächenpolynoms die Höhenänderungen zu approximieren, ist ein methodisch anerkannter und mathematisch-statistisch korrekter Weg. Die Berechnung der Schiefstellungen (1. Ableitung) und Krümmungen (2. Ableitung) aus dieser Flächenfunktion sind ebenfalls gut nachvollziehbar und korrekt.

Das durch die Flächenfunktion parametrisierte Bewegungsmodell kann sehr gut genutzt werden, um das allgemeine Bergschadensrisiko abzuleiten, das durch die Sumpfungsbeseitigung und die mittlere hydrologisch-geologischen Struktur in den untersuchten Gebieten vorliegt.

Lokale Inhomogenitäten werden durch das Modell von Prof. Kuhlmann definitiv nicht erfasst. Der Ansatz, eine Zuordnung von auffälligen Bewegungen zu tektonischen Störungen oder Aueböden vorzunehmen, ist bei einem rein datenbasierten Ansatz nicht möglich und hat im vorliegenden Fall zu keinerlei Ergebnissen geführt. Hier müsste nachträglich überprüft werden, welche geologische Situation an den detektierten Stellen vorliegt. Noch besser wäre es, den nachfolgend skizzierten integrierten Ansatz zu verfolgen.

Für die Schädigungsanalyse einzelner, insbesondere der messtechnisch nicht erfassten Gebäude kann aus den Ergebnissen von Prof. Kuhlmann zwar das generelle Risiko, nicht aber die konkrete schadensrelevante Situation abgeleitet werden. Für die in Abb. 8 dargestellte Situation mit einem Gebäude direkt auf einer bewegungsaktiven tektonischen Störung ist die Flächenapproximation des allgemeinen Bewegungsverhaltens für die möglicherweise eintretende Schädigung nicht aussagekräftig.

Schließlich soll angemerkt werden, dass kein Vergleich zwischen den Ergebnissen der jeweiligen Zweiepochenvergleiche vorgenommen worden ist. Eine Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Bewegungen hätte zumindest für die auffälligen Punkte die Aussagekraft erhöht.

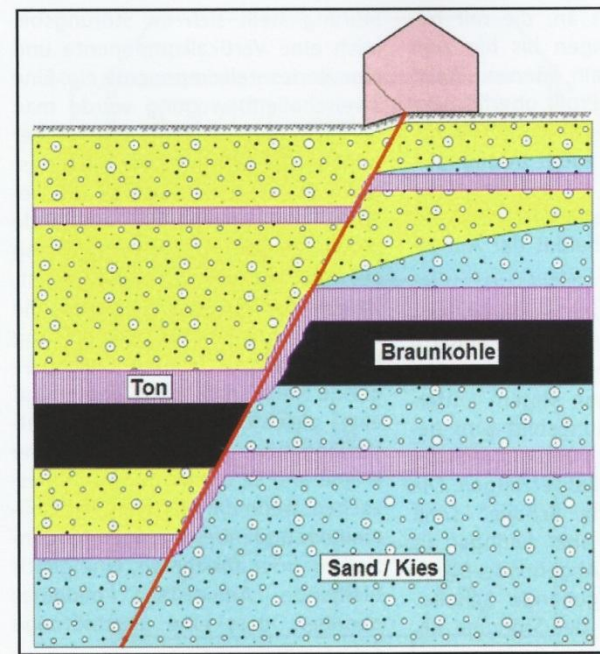


Abb. 8: Ungleichförmige Setzungen an bewegungsaktiver tektonischer Störung (Preusse/Schulte 2011)

3. Weiterentwicklung I:

Interdisziplinärer Ansatz zur Analyse von Bodenbewegungen

Es wird aus den vorangehenden Äußerungen deutlich, dass eine aussagekräftige Beurteilung der für Einzelobjekte relevanten Bodenbewegungen allein aus den vorliegenden Nivellementsmaßnahmen nicht möglich ist. Die generellen Auswirkungen der Sumpfungmaßnahmen für die Ortslagen können sehr gut abgeschätzt werden, schädigungsrelevante Aussagen für einzelne Gebäude oder Infrastrukturanlagen können jedoch nicht abgeleitet werden.

Es wird daher empfohlen, die bisherigen Analysen zu erweitern, also einen interdisziplinären Ansatz anzustreben, bei dem in einem ganzheitlichen Modell die verfügbaren Informationen aus den folgenden Bereichen genutzt werden:

- Nivellementsmaßnahmen, wie bisher als Präzisionsnivellement in regelmäßigen Kampagnen wiederholt durchgeführt. Hier sollten die Messungen von der RWE Power, der Landesvermessung und ggf. der betroffenen Kommunen zusammengefasst bzw. koordiniert werden.
- Informationen über bewegungsaktive tektonische Störungen, die i.d.R. hydrologisch wirksam sind. Diese Kenntnisse aus den Bereichen der Geologie und Tektonik sind meist geometrisch nicht so präzise zuzuordnen, bilden aber für die Interpretation von Bewegungsmustern und die Analyse von abweichenden Einzelpunktbewegungen eine wesentliche Grundlage.

- Kenntnisse über Aueböden, d.h. Vorwissen aus der Bodenkunde über setzungsempfindliche Böden. Im Idealfall liegen zumindest näherungsweise Abschätzungen über den Ort sowie die Beschaffenheit, Tiefe und Ausdehnung dieser Aueböden vor.
- Kenntnisse über den Grundwasserstand im Untersuchungsgebiet, der durch die großflächigen Sumpfungmaßnahmen der RWE Power, aber auch durch weitere intensive GW-Nutzer, wie die örtliche Industrie, beeinflusst sein kann. In sehr vielen Kommunen (z.B. Weinthal 2011) gibt es ein ausreichend dichtes Netz mit GW-Messstellen. Hierdurch kann auch der Effekt der ja zeitlich variablen Wasserentnahme bei den Sumpfungmaßnahmen berücksichtigt werden.
- Kenntnisse über die Abbauaktivitäten selbst, d.h. Beachtung möglicher Einflüsse durch die Fortschritte im Abbau der Kohlefelder. Liegen Orte in der Nähe von aktiven Tagebauen, so sollten diese Effekte in jedem Fall mit berücksichtigt werden.

Derartige Weiterentwicklungen haben natürlich vielfältige Implikationen und sind nicht ohne weiteres umzusetzen:

- a) Es sind methodische Fragestellungen zu lösen, d.h. es ist ein interdisziplinäres Modell zu entwickeln, in das alle diese Einzelaspekte, die bisher von jeder Fachdisziplin separat bearbeitet werden, integriert werden. Solche komplexen Modelle existieren heute erst ansatzweise und es sind hierfür eine Vielzahl von konzeptionellen und mathematisch-statistischen Teilaspekten zu lösen. Trotzdem erscheint es an der Zeit, für die hier anstehenden Fragen der Analyse und Bewertung von Bodenbewegungen diesen Schritt zu gehen.
- b) Es sind Fragen der Zuständigkeit zu klären, da die unterschiedlichen Daten bei unterschiedlichen Stellen vorhanden sind und zusammengeführt werden müssten. Hierzu müssten die Partner aus der Industrie, den unterschiedlichen Behörden und privaten Stellen bereit sein.
- c) Es sind technische Fragen zu lösen, da diese Daten ganz sicher in einer einheitlichen Datenbank zusammengeführt und laufend gehalten werden müssten. Auch ist eine kontinuierliche Hinzufügung von aktuellen Daten zu gewährleisten. Für diese Aufgabe sind Schnittstellen zu definieren und Handlungsanweisungen festzulegen.
- d) Schließlich ist die Rechtsverbindlichkeit der so gewonnenen Aussagen festzulegen, d.h. die Beteiligten müssten sich im Idealfall bereit erklären, die Ergebnisse dieses integrativen Modells im Streitfall als Ausgangsinformation zu akzeptieren.

Ich bin überzeugt, dass ohne einen solchen ganzheitlichen Ansatz in dem hochsensiblen Arbeitsfeld der Analyse und Bewertung von Bodensenkungen bzw. der Beweissicherung im Schadensfall kein wirklicher Fortschritt erzielt werden kann.

4. Weiterentwicklung II: Innovative messtechnische Entwicklungen

Es gibt zumindest zwei neuere messtechnische Entwicklungen, die das Potential haben, einen substantiellen Beitrag zur zukünftigen Erfassung von Bodenbewegungen zu leisten.

4.1 Radar-Interferometrie

Als völlig neuartiges Messverfahren für die Bestimmung von Höhenänderungen gibt es seit einiger Zeit die sogenannte Radar-Interferometrie. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit Sitz in Köln betreibt den derzeit weltweit genauesten Radar-Satelliten „TerraSAR-X“, mit dem ein flächenhaftes Höhen-Monitoring von Teilen der Erdoberfläche möglich ist.

In Abb. 9 ist eine stark vereinfachte Prinzipskizze für diese Radar-Interferometrie wiedergegeben. Die Radar-Impulse sind elektromagnetische Wellen, die an der Oberfläche der Erde oder von Gebäuden reflektiert werden. Bei einem ersten Überflug wird die Phasenlage des Radarsignals von einem Objekt aufgezeichnet. Verschiebt sich die Oberfläche, so führt dies bei jedem weiteren Überflug zu einer Veränderung der Phasenlage. Die gemessene Änderung der Phasenlage entspricht in erster Näherung der Bewegung des Objektes.

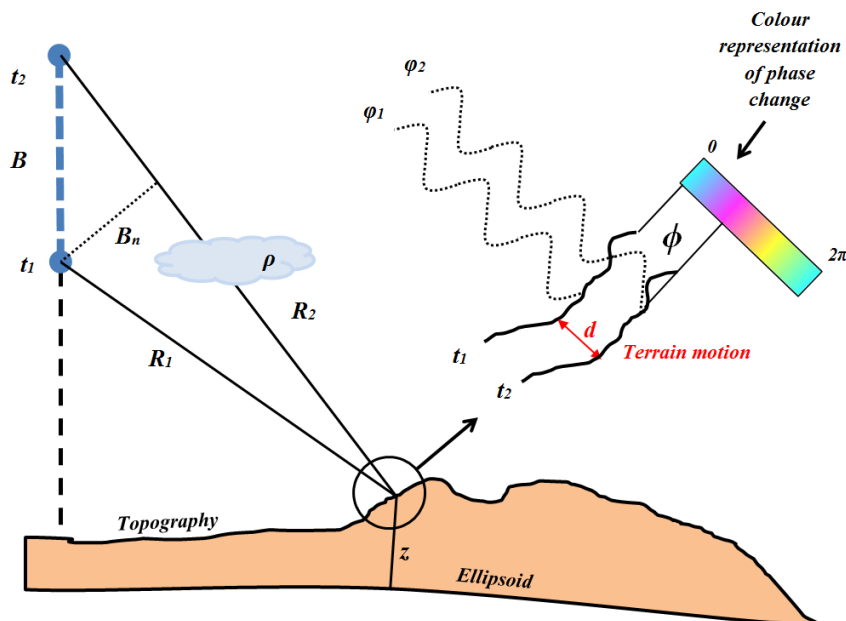


Abb. 9: Grundgeometrie bei der Radar-Interferometrie und Änderung des Phasenanteils zum Erkennen von Veränderungen (Mark, Niemeier u.a. 2012)

Natürlich sind auch hier eine Reihe von Einflüssen zu beachten, wie die Atmosphäre, die Genauigkeit der Satellitenbahn, die Auflösung des Radarimpulses am Boden usw. Trotzdem bietet dieses Verfahren der Radar-Interferometrie für den Nachweis von großräumigen Bodenbewegungen ein enormes Potential und wird z.B. seit Jahren in der geowissenschaftlichen Forschung zur Erfassung der Oberflächenveränderung durch größere Erdbeben oder als Nachweis für die Höhenänderungen als Auswirkung einer zu intensiven Grundwassernutzung eingesetzt.

Für die hier relevanten Fragestellungen zum Nachweis von Bauwerksschäden reicht die räumliche Auflösung dieser allgemeinen Ansätze nicht aus. Durch methodische Weiterentwicklungen, insbesondere die Nutzung der sogenannten „Permanent Scatterer (PS)“ kann man allerdings bereits heute Aussagen über das Bewegungsverhalten von Einzelgebäuden machen. Als PS eignen sich z.B. die Dächer von Gebäuden, die deutlich stärker zurückstrahlen, als der Boden.

Für die Innenstadt Düsseldorf ist dieses Prinzip der Radar-Interferometrie mittels PS erstmalig eingesetzt worden, um während des Auffahrens einer neuen U-Bahn (Wehrhahnlinie) mögliche Veränderungen der im Einflussbereich dieser Baumaßnahme liegenden Gebäude messtechnisch nachzuweisen. Die Anordnung der möglichen PS ist in Abb. 10 schematisch dargestellt worden, man erkennt eine Erfassung für jedes Gebäude, im Idealfall sogar durch mehrere Punkte.

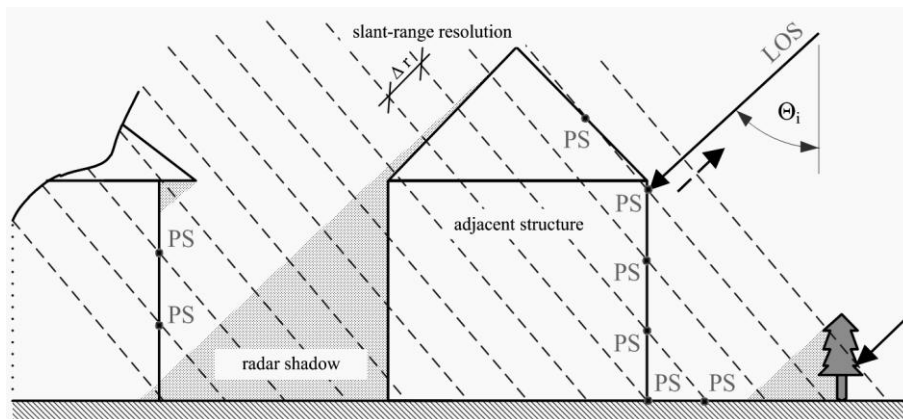


Abb. 10: Mögliche Verteilung von Persistent Scatterern und von Abschattungen bei innerstädtischen Anwendungen (Mark, Niemeier u.a. 2012)

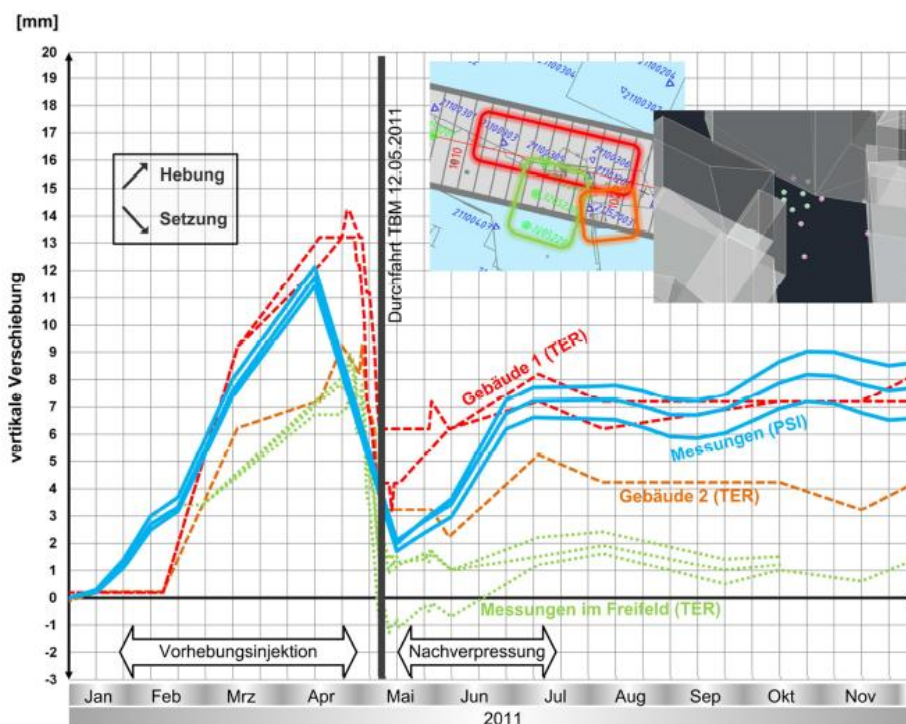


Abb. 11: Zeitreihe der Höhenänderungen aus terrestrischen und satellitengestützten Messungen für einen Abschnitt der Wehrhahnlinie in Düsseldorf (Mark, Niemeier u.a. 2012)

Exemplarisch sind Ergebnisse dieses Verfahrens zum Nachweis von Höhenänderungen aus der Radar-Interferometrie mit den Ergebnissen aus den völlig unabhängig durchgeführten Nivellements und Schlauchwaagenmessungen verglichen worden. Abb. 11 zeigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen diesen Verfahren zum Nachweis von Höhenänderungen von Bauwerken und bestätigt damit die Leistungsfähigkeit des innovativen Verfahrens der Radar-Interferometrie.

Sicherlich ist eine direkte Übertragung dieser Ansätze auf großräumige, eher ländliche oder dörfliche Gebiete mit z.T. starker Vegetation nicht ohne weiteres möglich und es sind eine Vielzahl von Problemen zu lösen. Trotzdem erscheint es mir sinnvoll, in einer Pilotstudie das Potential der Radar-Interferometrie als Alternative zur Höhenbestimmung mittels Nivellement zu erproben und wenn möglich zu verifizieren. Der wesentliche Vorteil ist die Wiederholrate von minimal 11 Tagen und die Möglichkeit, im Idealfall sämtliche Bauwerke zu erfassen.

4.2 Kinematische GNSS Messungen

Seit Beginn der zivilen Nutzung des amerikanischen Satellitensystem GPS (Global Positioning System) vor gut 25 Jahren wird dieses innovative System für die Bestimmung von dreidimensionalen Positionen in der Geodäsie intensiv genutzt. Heute und verstärkt in der Zukunft gibt es mehrere solcher Satellitensysteme, wie etwa das russische GLONASS oder das europäische GALILEO, so dass man allgemein von Global Navigation Satellite Systems (**GNSS**) spricht.

Durch methodische und instrumentelle Weiterentwicklungen kann man heute mit relativ wenig Aufwand die Lagekoordinaten von Punkten mit einer Unsicherheit von ca. 5 mm oder sogar besser bestimmen. Die Höhenkomponente ist etwas weniger genau, so dass dieses Messverfahren auch in Zukunft für die Bestimmung von Bodenbewegungen das Nivellement nicht ersetzen kann.

Nutzt man das von den Landesvermessungsämtern im letzten Jahrzehnt aufgebaute flächendeckende Netz von GPS-Permanentstationen SAPOS oder vergleichbare Systeme anderer Anbieter, so kann man sehr effektiv im sogenannten kinematischen Modus eine Vielzahl von Punkten mit dieser Unsicherheit bestimmen, d.h. für eine größere Zahl von Gebäuden auch die Lagekomponenten wiederholt bestimmen.

Damit ist es möglich, auch die bisher nicht beachteten Lagekomponenten der Bodenbewegungen zu erfassen, die im Modell der „horizontale Blattverschiebungen“ von Klostermann (1991) als mögliches Bewegungsmuster für ausgewählte tektonisch aktive Störungen in die Diskussion eingebracht worden sind.

5. Zusammenfassung

In den Gutachten von Prof. Kuhlmann zu Bodenbewegungen in den Ortslagen Berrendorf und Hependorf sind sachlogisch völlig korrekt und inhaltlich nachvollziehbar mathematisch-statistische Ansätze zum Nachweis der großflächig aufgetretenen Bodenbewegungen eingesetzt und erläutert worden. Die nachgewiesenen Senkungsbeträge sowie die berechneten maximalen bzw. minimalen Beträge für Schiefstellungen und Krümmungen sind als richtig und plausibel einzustufen.

Diese Ergebnisse geben die Gesamtauswirkung der Sumpfungmaßnahmen für die betreffenden Ortslagen wieder, können also sehr gut für eine generelle Abschätzung des Risikos für das Auftreten von Schäden herangezogen werden. Da lokale Inhomogenitäten und Störungen nicht berücksichtigt wurden, können diese Ergebnisse aber nicht für die Bewertung von Schäden an Gebäuden herangezogen werden, für die keine unmittelbaren Messpunkte vorlagen. Weder die Interpolation innerhalb des Messgebietes und schon gar nicht die Extrapolation auf außerhalb liegenden Bereiche führt zu wirklich belastbaren Ergebnissen.

Es wird empfohlen, einen weitergehenden Analyseansatz zu verfolgen, in dem sämtliche verfügbare Informationen, von wem auch immer sie stammen, in einem erweiterten integrativen Modell zu verarbeiten. Nur so können belastbare Grundlagen für das Auftreten von bergbaubedingten Schädigungen auch für Einzelgebäude bzw. Infrastrukturanlagen gewonnen und einer breiteren Bevölkerungsgruppe zur Verfügung gestellt werden. Auf einige Rahmenbedingungen für solch einen erweiterten Ansatz wird hingewiesen.

Schließlich werden ansatzweise neuere Messmethoden vorgestellt und deren Leistungspotential umrissen, mit denen in der Zukunft Bodenbewegungen detektiert werden könnten:

- Für ein flächenhaftes Monitoring von sämtlichen Gebäuden und Infrastrukturanlagen erscheint das innovative Verfahren der Radar-Interferometrie langfristig eine sehr gute Alternative zu den Nivellements zu sein. Es wird empfohlen, in einer Pilotstudie zu überprüfen, ob mittels der Radar-Interferometrie tatsächlich das vertikale Bewegungsverhalten sämtlicher Gebäude in den Ortslagen mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden kann.
- Für die bisher - zumindest in den mir zur Verfügung gestellten Unterlagen - vernachlässigten horizontalen Bewegungen sollte das Potential von kinematischen GNSS im differentiellen Modus erprobt werden.

Literatur

- DIN 21917:* Deutsche Industrie Norm: Gebirgs- und Bodenbewegungen, Ausgabe Febr. 1999
- Gutachten Berrendorf:* Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann, Bonn, 2011: Gutachterliche Beurteilung der Bodensenkungen im Untersuchungsgebiet Berrendorf; Teile 1, 2, 3.1 und 3.2
- Gutachten Heppendorf:* Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann, Bonn, 2011: Gutachterliche Beurteilung der Bodensenkungen im Untersuchungsgebiet Heppendorf; Teile 1, 2, 3.1, 3.2, 3.2 und 3.4
- Kratsch 2008:* H. Kratsch, Berlin: Bergschadenkunde, 5. Auflage
- Klostermann 1991:* J. Klostermann: Die Wanderung der Kontinente – Grundlagen der Plattentektonik und die junge Beanspruchung der Niederrheinischen Bucht aus heutiger Sicht. In: Natur und Landschaft am Niederrhein. Niederrheinische Schriften zur Landeskunde und Geschichte des Niederrheins, Band X, S. 61-1007, Krefeld
- Kuhlmann 2012:* Heiner Kuhlmann, Bonn: Können Bodenbewegungsmodelle das Bodensenkungsverhalten in Rheinischen Braunkohlenrevier beschreiben? In: Tagungsband Bergschadensforum Elsdorf, 2012
- Mark, Niemeier u.a. 2012:* P. Mark, W. Niemeier, S. Schindler, A. Blome, P. Heek, A. Krivenko, E. Ziem: Radarinterferometrie zum Setzungsmonitoring beim Tunnelbau – Anwendungen am Beispiel der Wehrhahn-Linie in Düsseldorf. In: Bautechnik, vol. 89, 2012, Heft 11
- Niemeier 2008:* W. Niemeier: Ausgleichsrechnung – Statistische Auswertemethoden. Lehrbuch deGruyter, Berlin, 2. Auflage 2008, 508 Seiten

- Pohl 2002* : F. Pohl: Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich ihrer bautechnischen Empfindlichkeit gegenüber bergbauinduzierten Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche des Ruhrreviers. Dissertation TU Freiberg
- Preusse/Schulte 2012*: Axel Preusse und Ralf Schulte, Aachen: Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. In: Tagungsband Bergschadensforum Elsdorf, 2012
- Weinthal 2012*: Barbara Weinthal, Mönchengladbach: Bergschadensthematik aus der Sicht einer Revierkommune. In: Tagungsband Bergschadensforum Elsdorf, 2012

Laatzen, am 18. November 2012



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Niemeier