

# Sind Bodenbewegungsanomalien durch Messungen erkennbar?

Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann, Universität Bonn

## 1 Einleitung

Im Rahmen der Braunkohleförderung wird Grundwasser im Einflussbereich der Tagebaue abgesenkt, so dass im Sümpfungsbereich des Bergbaus Bodensenkungen auftreten. Zur Überwachung dieser Bodensenkungen werden von der RWE Power AG und von der Vermessungsverwaltung in regelmäßigen Abständen Höhenmesskampagnen durchgeführt. Dabei sollen neben gleichmäßigen Bodensenkungen auch mögliche Schiefstellungen, Krümmungen oder Bodenbewegungsanomalien erfasst werden. Die Eignung der erfassten Messdaten zur Detektion solcher Bodenbewegungen wird im Rahmen des vorliegenden Beitrags analysiert. Dabei werden die folgenden Fragen diskutiert:

1. Sind Auesetzungen erkennbar?
2. Sind Setzungsanomalien erkennbar, die auf tektonische Störungen hinweisen?
3. Inwieweit lassen sich die Bodensenkungen durch Modelle (z.B. Schollensetzung / Schollenschiefstellung) beschreiben?
4. Treten signifikante Krümmungen auf?

5. Ist das vorhandene Höhenfestpunktfeld ausreichend dicht vermarktet?
6. Gibt es Ausreißer, deren Ursache auf örtliche Besonderheiten zurückzuführen sind (Messfehler, Punktbeschädigung, Gründungsfehler)?

Für die Beantwortung dieser Fragen werden zunächst einige generelle Hinweise zur Analyse von Bodenbewegungen gegeben. Die genannten Fragestellungen werden anschließend anhand verschiedener Fallbeispiele diskutiert.

## 2 Approximation von Bodenbewegungen durch Senkungsmodelle

Im Rahmen der Höhenmesskampagnen der RWE Power AG werden in regelmäßigen Abständen Präzisionsnivelements durchgeführt. Zur Beurteilung der Bodenbewegungen ist es sinnvoll, die gemessenen Höhenänderungen durch mathematische Modelle zu beschreiben. Im Folgenden werden das hierfür verwendete Datenmaterial, eine Auswahl verschiedener Bewegungsmodelle und das

verwendete Auswerteverfahren erläutert.

### 2.1 Verwendete Nivelementsdaten

Die Nivellements zur Untersuchung der Bodenbewegungen wurden mit Präzisionsnivellierinstrumenten durchgeführt. Durch den Vergleich der Messepochen lassen sich Höhenänderungen für einzelne Zeiträume ableiten. Bei der Abschätzung der Genauigkeit der gemessenen Höhenänderungen müssen neben der Genauigkeit des Nivellierverfahrens auch die Unsicherheiten der Punktvermarkungen berücksichtigt werden. In Summe wird im Folgenden eine Standardabweichung von  $\sigma = 1\text{mm}$  für die äußere Genauigkeit (Messgenauigkeit und Punkt-sicherheit) angenommen. Für eine Einzelepoch entspricht dies einer Genauigkeit von  $\sigma = 0.7\text{mm}$ . Diese Annahme beruht auf Erfahrungswerten, kann aber durch Epochenvergleiche auch empirisch bestätigt werden.

Bei der Erfassung von Bodenbewegungen muss neben der benötigten Punktdichte und der erforderlichen Messgenauigkeit auch der zeitliche Abstand zwischen

zwei Messepochen und die Anzahl notwendiger Epochen an die Aufgabenstellung und das Bewegungsverhalten des Messobjektes angepasst werden. Da hier nicht der zeitliche Verlauf der Bewegungen sondern die generelle Eignung der Messungen zur Detektion von Bewegungsanomalien beurteilt werden soll, kann die Auswertung auf jeweils zwei Epochen beschränkt werden.

## 2.2 Mathematische Modelle zur Beschreibung von Bodenbewegungen

Nach der messtechnischen Erfassung der Bodenbewegungen kann das Bewegungsverhalten durch geeignete Modelle mathematisch beschrieben werden. Die Komplexität der mathematischen Modelle ist dabei der Komplexität der Bodenbewegungen anzupassen. Die Eignung eines gewählten Modells zur Repräsentation des Bewegungsverhaltens kann anhand der Abweichungen der beobachteten Absenkungen vom ermittelten Modell beurteilt werden. Bestätigt sich ein gewähltes Modell, so liefern die abgeleiteten Modellparameter (z.B. Absenkung, Neigung, Krümmung) Informationen über das Bewegungsverhalten der erfassten Messpunkte.

Inwieweit das Bewegungsverhalten der Messpunkte für das der gesamten Umgebung repräsentativ ist, hängt auch von der räumlichen Verteilung der Messpunkte und der Punktdichte ab. Die Mindestanforderungen an die Punktdichte sind von der Komplexität der Bodenbewegungen abhängig. Folgende Modelle werden verwendet:

- Schollensetzung (1 Parameter): Annahme einer gleichmäßigen Bodensenkung (Ebene)
- Schollenschiefstellung (3 Parameter): Das Modell der Schollensetzung wird durch die Parametrisierung einer Schiefstellung erweitert (geneigte Ebene).
- Flächenpolynom: Treten neben der Schollenschiefstellung Krümmungen auf, erfolgt die Beschreibung durch ein zweidimensionales Polynom. Die Anzahl der Parameter variiert in Abhängigkeit von der Komplexität der Bodensenkungen.

## 2.3 Auswerteverfahren zur Berechnung von Bewegungsmodellen

Für die Beschreibung der Senkungsbewegungen werden die oben genannten Modelle

verwendet. Wie bei allen Deformationsanalysen besteht folgendes grundsätzliches Problem:

- Die durch das Messverfahren Nivellement bestimmten Höhenänderungen der Einzelpunkte sind in Folge der Genauigkeit des Messverfahrens mit zufälligen Messungsabweichungen behaftet.
- Treten Abweichungen einer durch Messung festgestellten Punktbeziehung von einem gewählten Modellansatz auf, so ist zu entscheiden, ob diese durch tatsächliche Bodenbewegungen oder durch übliche Messungsabweichungen hervorgerufen werden.

Bei der Unterscheidung zwischen Messungsunsicherheiten und Punktbewegungen muss die Messgenauigkeit des Nivellements berücksichtigt werden. Aufgrund der statistischen Streuung ist bekannt, dass 95% der Messungsabweichungen innerhalb der 2-fachen Standardabweichung liegen und 99.7% innerhalb der 3-fachen. Liegen die gemessenen Bewegungen unterhalb der 2- oder 3-fachen Standardabweichung (Signifikanzgrenze),

so werden sie als Messungsabweichung aufgefasst, liegen sie oberhalb, werden sie als tatsächliche Punktbebewegungen interpretiert. Im Folgenden wird als Signifikanzgrenze der 2.57-fache Wert der Standardabweichung des Nivellements gewählt (2,57mm bzw. 99%).

Das Vorgehen bei der Approximation von Bewegungen durch mathematische Modelle wird im Folgenden am Beispiel des Ebenenmodells erläutert. Zunächst wird zur Bestimmung einer bestangepassten Ebene zur Repräsentation der Höhenänderungen ein Regressionsansatz nach der Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Die Abweichungen der gemessenen Höhendifferenzen vom Modell

werden in einem zweiten Schritt analysiert. Untersucht wird, ob die Abweichungen im Rahmen der Messunsicherheit des Nivellements liegen oder ob die Abweichungen die Signifikanzgrenze von 2.57mm überschreiten. In diesem Fall werden diese Punkte als nicht der Ebene zugehörig deklariert.

In einer erneuten Ausgleichung wird der Punkt mit der größten Abweichung aus dem Ebenenmodell ausgeschlossen. Dieses Vorgehen wird in einem iterativen Ablauf so lange wiederholt, bis alle verbleibenden Punkte das geschätzte Modell stützen. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass Punkte, die von der Bewegung des Modells abweichen, keinen Einfluss

auf die Bestimmung der Modellparameter haben. Da diese Punkte jedoch für die Begutachtung der Bodenbewegung von großer Bedeutung sind, werden diese im Folgenden graphisch hervorgehoben. Für diese Punkte muss eine separate Analyse erfolgen.

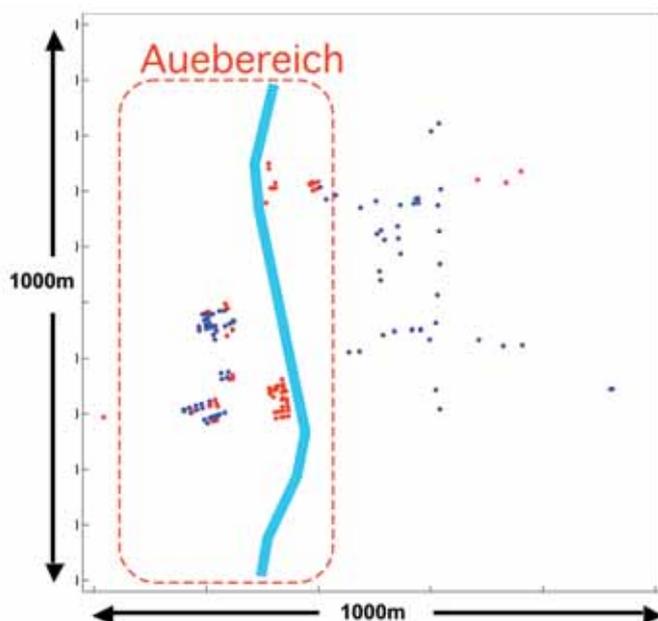
### 3 Fallbeispiele

Im Folgenden werden drei Gebiete, die im Sumpfungsgebiet der Braunkohle liegen, analysiert. Die Daten werden dabei nur soweit ausgewertet, wie es für die Beantwortung der eingangs aufgelisteten Fragen notwendig ist.

#### 3.1 Testgebiet „Auebereich“

Für die Analyse des ersten Gebietes stehen Nivellementsdaten für 161 Punkte zur Verfügung. Die Punkte sind jeweils in den Jahren 1996 und 2008 beobachtet worden. Die Punktverteilung kann anhand von Abb. 1 beurteilt werden. Neben den Messpunkten ist in der Abbildung auch der ungefähre Verlauf eines Flusses sowie eine schematische Kennzeichnung des Auegebietes enthalten. Ersichtlich ist, dass die Punkte teilweise im Bereich der Aue liegen. Im bebauten Bereich der Aue ist das Punktfeld stark

Abb. 1:  
Testgebiet mit  
Auebereich



verdichtet. Auf eine weitere Charakterisierung des Auebereichs (Bodenbeschaffenheit, Ausdehnung, etc.) wird verzichtet, da Vorinformationen über die Aue nicht für die Analysen verwendet werden.

Zur Analyse der Bodenbewegung wird der Ansatz einer Schollenschiefstellung angewendet. Abb. 1 zeigt, welche Punkte nach den oben genannten Kriterien dem Modell der Schollenschiefstellung zugeordnet werden können. Sind die Punkte blau dargestellt, so können sie der Ebene zugeordnet werden. Sind die Punkte rot gefärbt, so überschreitet die Differenz zwischen der gemessenen und der aus dem Modell abgeleiteten Bodensenkung die Signifikanzgrenze von 2,57mm. Diese Abweichungen treten vor allem im Auebereich auf.

Das iterative Vorgehen verhindert, dass sich lokale Besonderheiten stark auf die Parameterschätzung auswirken. Dies gilt streng jedoch nur dann, wenn die Punktdichte gleichmäßig ist und keine großen Punktgruppen systematisch betroffen sind. Beide Bedingungen sind hier nicht erfüllt, wie anhand der Verteilung der Residuen in Abb. 2 sichtbar wird. Dort sind die Abweichungen der

Messwerte von der Ebene auf der Hochachse aufgetragen. Anhand der Rechtsachse lässt sich die Ost-West-Verteilung ableiten.

Es lässt sich bereits ohne Vorkenntnisse über die örtlichen Gegebenheiten feststellen, dass im grün eingerahmten Bereich eine geologische

Sondersituation vorliegt, da hier verstärkte Bodensenkungen auftreten. Zudem wird ersichtlich, dass auch die der Ebene zugehörigen Punkte (Punkte zwischen den roten Linien) Systematiken aufweisen. Dies gilt insbesondere für die schwarz eingerahmten Residuen, bei denen ein signifikanter Abwärtstrend

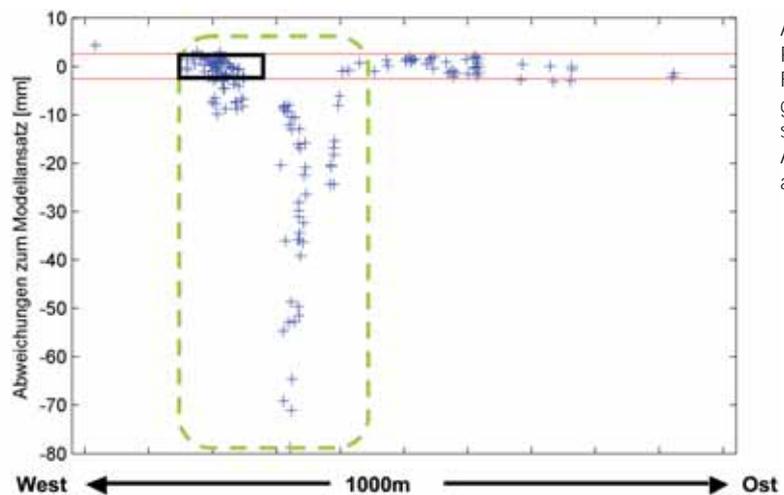


Abb. 2: Residuen im Falle einer gemeinsamen Auswertung aller Punkte

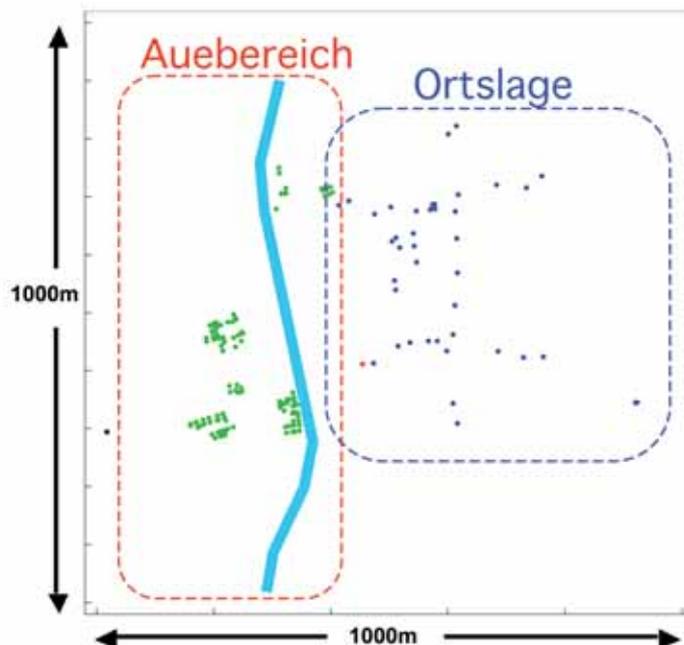
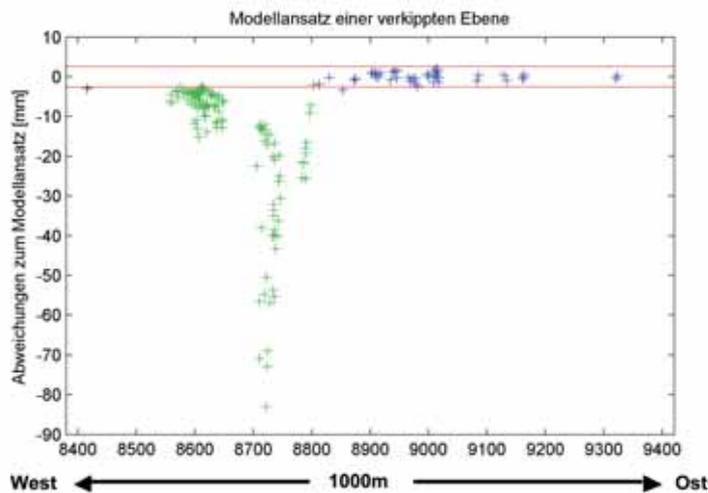


Abb. 3: Analyse der Bodensenkungen ohne Berücksichtigung der Ortslage

Abb. 4:  
Residuen im  
Falle einer  
Auswertung  
ohne Berücksichtigung  
des Auegebietes



(von West nach Ost) sichtbar wird. Bei der Schätzung der Modellparameter führt dies zu systematischen Verschiebungen, die hier durch die in diesem Bereich hohe Punktdichte verstärkt werden.

In einem zweiten Auswerteschritt wird aufgrund der Systematiken erneut eine Ebenenschätzung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 3 dargestellt.

Die Punkte im Bereich der Aue (Abb. 3, grüne Punkte) und der im Westen liegende Punkt (schwarz) wurden nicht zur Ebenenschätzung herangezogen. Letzterer liegt geometrisch ungünstig und würde eine starke Hebelwirkung auf die Ebenenschätzung ausüben. Das Ergebnis dieses zweiten Auswerteschrittes zeigt, dass 42 der 43 östlich des Auebereichs liegenden Punkte das Ebenenmodell

bestätigen. Nur der rot dargestellte Punkt überschreitet mit einer Abweichung zur Ebene von 3,3mm das Quantil von 2,57mm signifikant. Bei Betrachtung der Residuen (Abb. 4) fällt auf, dass die blauen Punkte, anders als im ersten Auswerteschritt (Abb. 2), keine starken Systematiken mehr aufweisen.

Das Testgebiet wurde mit zwei unterschiedlichen Ansätzen ausgewertet (unterschiedliche Punktgruppen). Die Entscheidung welcher der beiden Ansätze als der geeignetere anzusehen ist, ist nicht immer aus den Daten alleine ersichtlich. Hier deutet insbesondere die systematische Verteilung der Residuen im ersten Beispiel darauf hin, dass der zweite Ansatz als korrekt einzustufen ist. Beide Auswerteergebnisse erlauben jedoch eine Beurteilung der großräumigen

Bodenbewegung. Dies zeigt, dass das iterative Vorgehen eine robuste Auswertung der Daten ermöglicht.

Die vorliegenden Sonderinflüsse, die zu Bodenbewegungsanomalien führen, wurden erkannt. In diesem Beispiel liegen die auffälligen Punkte im Gebiet einer Aue. Diese Information wurde nicht bei der Auswertung verwendet. Zur Detektion lokaler Besonderheiten sind solche Vorinformationen nicht notwendig. Um jedoch die Ursache herleiten zu können, müssen in der Regel Informationen über die Örtlichkeit (z.B. Bodenanalysen, Gewässerinformationen) oder weitere Messungen hinzugezogen werden. Dieses Beispiel zeigt, dass eine Beurteilung der großräumigen Bodensenkung und eine Detektion von lokalen Variationen auch möglich ist, wenn eine große Anzahl von Messungen nicht korrekt durch ein Modell beschrieben werden können.

### 3.2 Testgebiet „Tektonik“

Im zweiten Untersuchungsgebiet stehen 395 Messpunkte für die Untersuchung der Bodensenkungen zur Verfügung. Die Bodensenkungen im Zeitraum von 1998 bis 2006 sind in Abb. 5 durch eine 3D-Grafik dargestellt.

Das Gebiet umfasst ein Areal von ca. 800m x 800m. Ein einfaches Ebenenmodell kann hier nicht zur Beschreibung der Höhenänderungen herangezogen werden. Während im östlichen Bereich Absenkungen von 45mm bis 50mm auftreten (roter Bereich), sind im westlichen Gebiet Absenkungen von 115mm bis 120mm vorhanden (blauer Bereich). In der Übergangszone liegen die Absenkungsbeträge zwischen diesen Niveaus. In diesem Bereich ist die Punktdichte von der RWE Power AG deutlich erhöht worden, so dass die Bruchzone mit höherer räumlicher Auflösung beobachtet wird.

Die östlich der Bruchkante stattfindenden Bodensenkungen lassen sich nach dem oben vorgestellten Modellansatz durch eine geneigte Ebene darstellen. Die Abweichungen der tatsächlichen Bodensenkung von der bestimmten Ebene sind in Abb. 6 dargestellt. Nur wenige Messpunkte weichen signifikant von der Ebene ab. Die Größenordnung liegt im Bereich von 5 mm (Punktgruppe A im Süden) und +3.7mm (Punktgruppe B im Norden).

Die Bodensenkungen im westlichen Bereich lassen sich ebenfalls durch eine

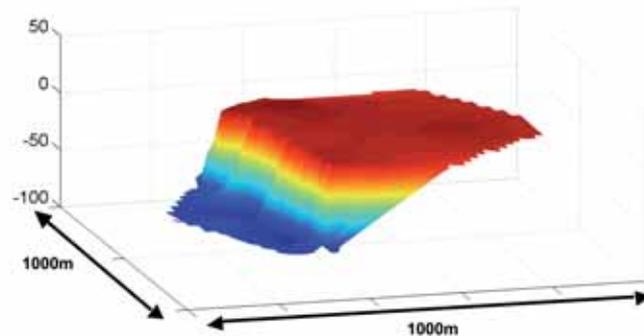


Abb. 5: Approximierte Darstellung der Bodensenkung

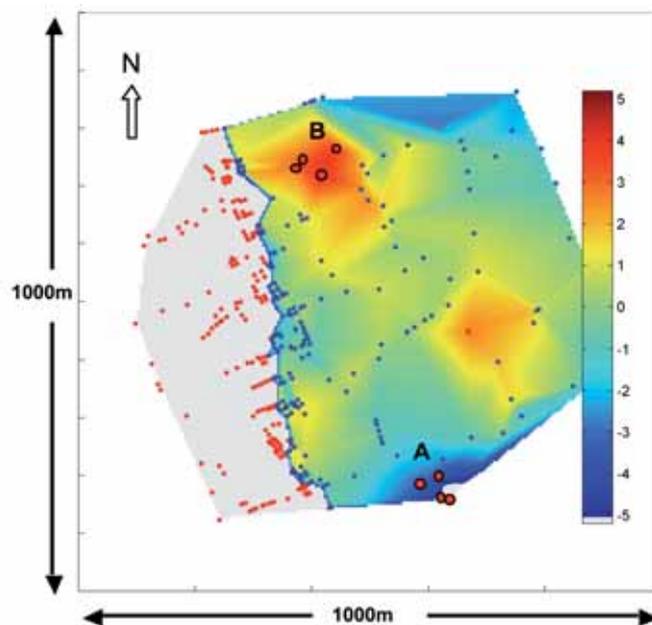


Abb. 6: Flächendarstellung der östlichen Ebene (Niveauunterschiede in mm)

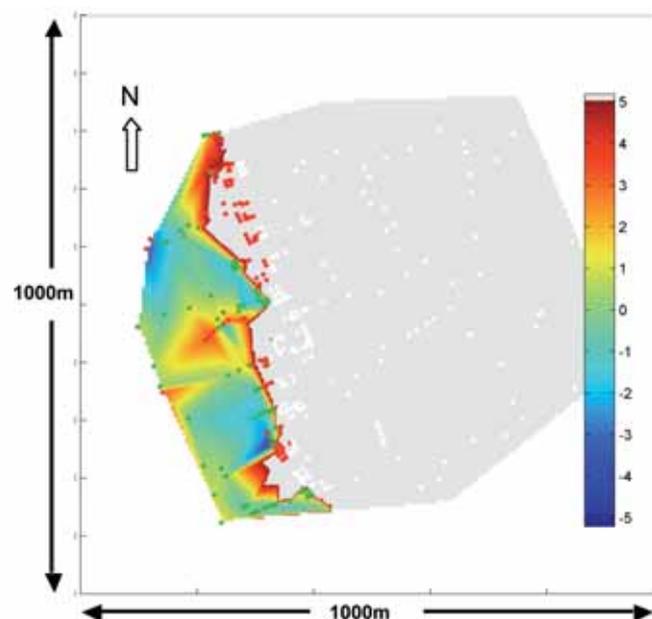


Abb. 7: Flächendarstellung der westlichen Ebene (Niveauunterschiede in mm)

Tabelle 1: Ergebnisse der Ebenenanalyse

	Bereich West	Bereich Ost
Verkipfung West → Ost	-24 mm / km	+7.0 mm / km
Verkipfung Süd → Nord	-8 mm / km	-2.9 mm / km
Gesamtbetrag	-26 mm / km	+7.6 mm / km
Richtungswinkel	ca. 72 °	ca. 112.5 °

Ebene darstellen (Abb. 7). Es treten erneut Abweichungen von einigen Millimetern auf. Diese werden erneut automatisiert detektiert, so dass eine Einzelpunktanalyse erfolgen kann.

Durch die Modellierung der Bodensenkungen durch den Modellansatz einer geneigten Ebene lassen sich die großräumigen Bodenbewegungen durch die Ebenenparameter beschreiben. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle für die östliche und die westliche Ebene dargestellt. Deutlich wird, dass

neben unterschiedlichen Absenkungsbeträgen auch unterschiedliche Neigungen auftreten.

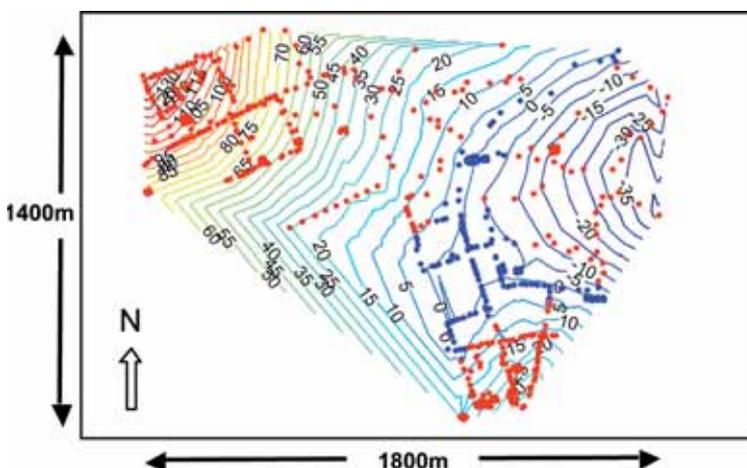
Neben den Ebenenparametern und den abweichenden Punkten innerhalb der Ebenenareale resultieren aus dem Auswerteprozess auch die Punkte, die keiner der Ebenen zugeordnet werden können. Diese Punkte liegen hier im Bereich der Bruchkante zwischen den Ebenen. Die Bewegung dieser Punkte ist separat zu analysieren.

### 3.3 Testgebiet „gekrümmte Fläche“

Bei dem im Folgenden behandelten Testgebiet handelt es sich mit 1400m x 1800m um das größte der vorgestellten Testgebiete. Die Höhenpunkte wurden jeweils in den Jahren 1999 und 2007 beobachtet. Insgesamt liegen 638 Punkte im untersuchten Gebietsausschnitt. Die Bodensenkungen sind in Abb. 8 dargestellt, wobei eine mittlere Vertikalbewegung von etwa 646mm bereits abgezogen wurde.

Anhand dieser Darstellung werden Abweichungen von dem bislang verwendeten Ebenenmodell deutlich. Neben einer Verkipfung treten Krümmungen auf (Mulden- und Sattellagen). Die Modellierung mit Hilfe des Ebenenmodells ist hier unzureichend. Stattdessen können die Höhenänderungen durch eine Fläche höherer Ordnung beschrieben werden. Hier wurde ein 2D-Flächenpolynom mit 17 Parametern verwendet. Ein solches Polynom erlaubt die Repräsentation einer gekrümmten Fläche und gewährleistet dennoch, dass die Fläche lokal sehr glatt verläuft. Die Verwendung einer glatten Fläche eignet sich gut für die Detektion von lokalen Effekten, da kleinräumige Abweichungen nicht

Abb. 8:  
Relative Bodensenkungen im Untersuchungsgebiet



modelliert werden, sondern als Abweichungen des Modells von den gemessenen Bodensenkungen auftreten (Abb. 9).

Von den 638 Messwerten, stützen 620 das Modell. Die übrigen Punkte sind rot dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass die Detektion von Ausreißern oder lokalen Besonderheiten auch in diesem Testgebiet möglich ist. Die Eignung des Flächenpolynoms kann anhand der Residuen beurteilt werden (Abb. 10). Nur 18 Punkte überschreiten die Signifikanzgrenze. Aus den Residuen ergibt sich ohne Berücksichtigung der sechs groben Abweichungen eine Standardabweichung von  $\sigma = 1\text{mm}$ . Dieser Wert liegt in der Größenordnung der Nivelliergenauigkeit und belegt somit die gute Eignung des gewählten Bewegungsmodells.

Anhand dieser Flächenbeschreibung kann für jede Stelle die lokale Krümmung bzw. der Krümmungsradius ermittelt werden. Die entsprechende Datenanalyse ergab in dem Untersuchungsgebiet einen kleinsten Krümmungsradius von  $2200\text{km}$ . Dieser Wert liegt deutlich unterhalb des Grenzwertes für schadensauslösende Bewegungen gemäß Grund-

bautaschenbuch ( $R=2.5\text{km}$  für eine Mulde und  $5\text{km}$  für eine Sattellage).

Zusammenfassend lässt sich für das dritte Testgebiet festhalten, dass auch bei gekrümmten Flächen die Modellierung der Bodenbewegungen durch eine glatte Fläche möglich ist, was bei den Analysen durch eine geringe Standardabweichung belegt werden konnte. Die Verwendung einer glatten Fläche bietet den Vorteil, dass Ausreißer und loka-

le Anomalien automatisiert detektiert werden können. Die erkannten Abweichungen sind individuell zu überprüfen, worauf im Rahmen dieser Untersuchungen verzichtet wurde. Die Krümmung kann aus den ermittelten Polynomparametern berechnet werden.

#### 4 Fazit und Bewertung der Ergebnisse der Datenanalyse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen

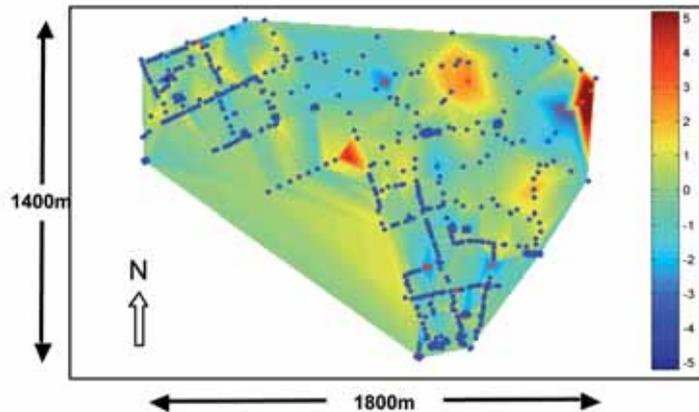


Abb. 9: Darstellung der vom berechneten Modell abweichenden Bodenbewegungen

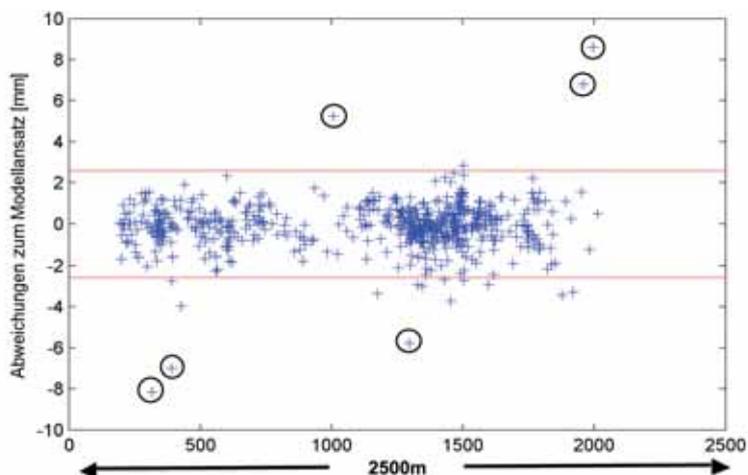


Abb. 10: Residuen bei Verwendung des Polynomansatzes

hinsichtlich der eingangs genannten Fragestellungen bewertet.

*Frage 1 und 2: Sind Auesetzungen erkennbar? Sind Setzungsanomalien erkennbar, die auf eine bewegungsaktive tektonische Störung hinweisen?*

Die Detektion von Auesetzung oder tektonischer Störungen ist auch ohne die Verwendung von Vorinformationen mit Hilfe der Nivellementsmessungen möglich. Die aufgrund von Sondersituationen auftretenden Setzungsanomalien werden bei der Auswertung anhand von Abweichungen zu geschätzten Bewegungsmodellen sichtbar.

*Frage 3 und 4: Inwieweit ist das Modell der Schollensetzung / -schiefstellung zutreffend? Treten signifikante Krümmungen auf?*

Die Modelle „Schollensetzung“ bzw. „Schollenschiefstellung“ sind in einigen Gebieten zur Modellierung der Bodensenkung geeignet, um das Bodenbewegungsverhalten zu beschreiben. Die Gültigkeit der Ansätze kann anhand der Residuen der Auswertung überprüft werden. In Gebieten mit Setzungsanomalien (Tektonik/Aue) können Teilge-

biete mit diesen Ansätzen modelliert werden. In einem Testgebiet treten signifikante Krümmungen auf (minimaler Krümmungsradius 2200km), so dass der Modellansatz erweitert wurde. Hier haben sich 2D-Flächenpolynome als geeignet erwiesen.

*Frage 5: Ist das vorhandene Höhenfestpunktfeld ausreichend dicht vermarktet?*

Die Punktdichte ist in den untersuchten Gebieten grundsätzlich ausreichend. Bei der Beurteilung einer vorhandenen Punktdichte sind jedoch verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Insbesondere das Bewegungsverhalten des Objektes muss bei der Festlegung der Punktdichte berücksichtigt werden. Je gleichmäßiger die Bewegungen sind, desto großmaschiger kann die Punktverteilung ausfallen. In Bereichen mit starken Inhomogenitäten ist hingegen ein sehr dichtes Punktfeld notwendig.

Die Eignung eines bestehenden Punktfeldes kann anhand der erfassten Bewegungsdaten beurteilt werden: Lässt sich das Bewegungsverhalten aller Punkte durch ein Modell beschreiben und liegt gleichzeitig eine hohe Überbestimmung bei der Bestimmung

der Modellparameter vor, so bedeutet dies, dass die Existenz lokaler Inhomogenitäten sehr unwahrscheinlich ist. Je höher die Überbestimmung ist, desto geringer die Wahrscheinlichkeit für die Existenz von lokalen Anomalien. Die Gültigkeit dieser Aussage muss bei einer ungünstigen Verteilung der Messpunkte eingeschränkt werden.

*Frage 6: Gibt es Ausreißer, welche auf örtliche Besonderheiten zurückzuführen sind? Wie können solche Ausreißer erkannt werden?*

Bei den durchgeführten Analysen der Bodensenkungen wurden an verschiedenen Stellen Abweichungen zwischen den berechneten Modellen und einzelnen Punkt-bewegungen erkannt. Bei diesen Ausreißern stellt sich grundsätzlich die Frage nach der Ursache für die Abweichungen. Neben Messfehlern und Punktbeschädigungen sind Bewegungsanomalien denkbar.

Bei der Analyse der Ursachen hilft häufig die Betrachtung des Verhaltens von Punkten in der Nachbarschaft und des zeitlichen Verlaufs der Bodensenkungen. Da der Nachweis lokaler Effekte ermöglicht werden soll, ist besonders der zeitliche Verlauf

von ermittelten Bodensenkungen für die Beurteilung der Ursachen wichtig. Die Analyse von nur zwei Epochen ist somit insbesondere bei der Bewertung von auffälligen Einzelpunktbewegungen stets kritisch zu bewerten.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die untersuchten Messpunktfelder gut geeignet sind, das Bodenbewegungsverhalten zu erfassen. Auch wenn eine eindeutige Unterscheidung zwischen tatsächlichen Bodensenkungen

und Messungsabweichungen nicht immer abschließend gelingt, ist mit den verwendeten Verfahren der Datenanalyse mittels Flächenapproximation sichergestellt, dass kritische Messpunkte erkannt werden.