

# Bodenbewegungen infolge Grundwasserwiederanstieg in ehemaligen Braunkohleabbaugebieten

**Dipl.-Ing. Werner Schaefer**

ehemals RWE Power AG

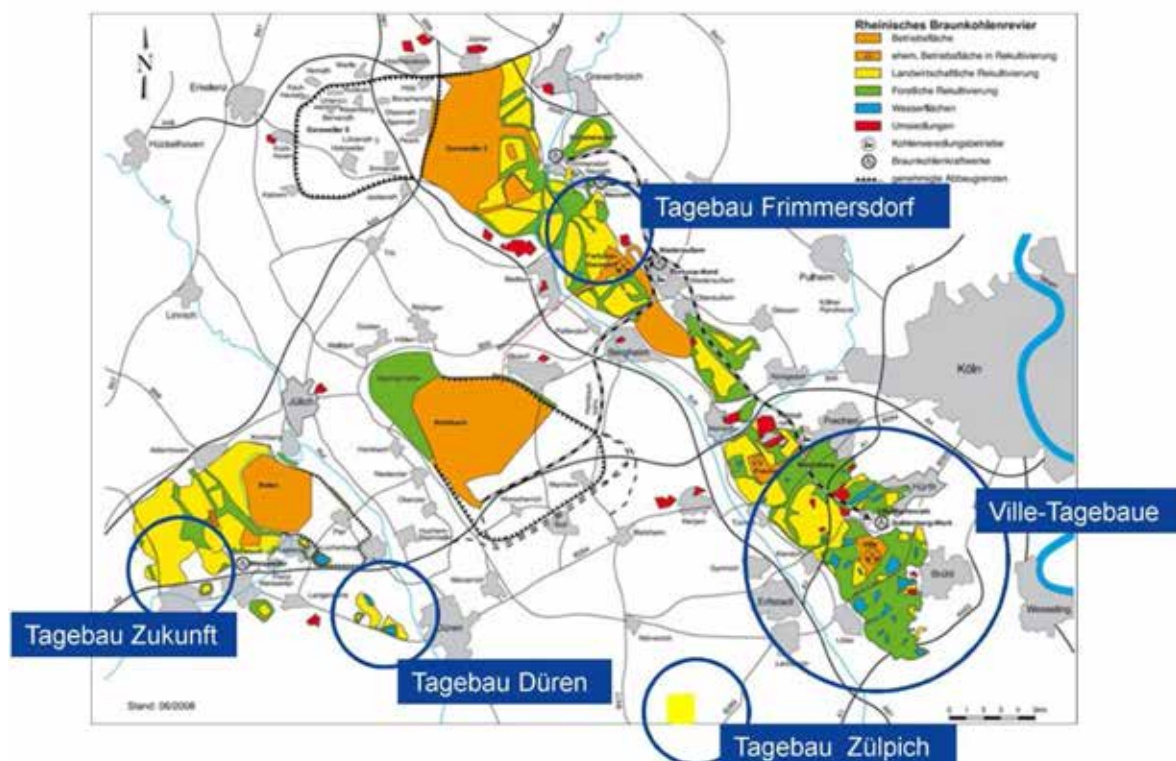
## **Zusammenfassung:**

Um die Braunkohle im Tagebau sicher gewinnen zu können, ist das Grundwasser bis unterhalb der Kohle abzusenken und während des Betriebs des Tagebaus auf einem ausreichend niedrigen Stand zu halten. Nach Beendigung des Bergbaus stellen sich mit der Reduzierung bzw. Einstellung der Grundwassersümpfungen weitgehend wieder die natürlichen Grundwasserverhältnisse ein. Einhergehend mit den Sümpfungen kommt es zu Bodensenkungen an der Tagesoberfläche in der Phase der Grundwasserabsenkung und bis zum Erreichen des stationären Zustandes zu Hebungen in der Phase des Grundwasserwiederanstiegs. Die seit Jahrzehnten durchgeführten Bodenbewegungsmessungen dokumentieren in den ehemaligen Abbaugebieten langjährig bis 2011 andauernde, grundwasserwiederanstiegsbedingte Bodenhebungen von bis zu 0,3 m. Die zu erwartenden max. Bodensenkungen und die Restsenkungen nach Bergbauende werden mit einem bodenmechanischen Prognosemodell ermittelt. Im stationären Zustand verbleibt großräumig betrachtet eine Senkungsmulde. Die Bodenhebungen im rheinischen Revier verlaufen wie die Bodensenkungen in der Regel gleichförmig. Die Vorflut der Gewässer wird wegen der geringen Gefälleänderungen grundsätzlich nicht gefährdet.

## **1. Geohydrologie der Niederrheinischen Bucht**

Im Senkungsgebiet der Niederrheinischen Bucht sind tertiäre fluviale und marine Lockergesteinsedimente mit Mächtigkeiten bis zu 1500 m über dem Festgesteinsuntergrund abgelagert. Die Braunkohlenflöze liegen eingebettet in diesen Sedimenten und werden heute in Tiefen von ca. 50 m bis ca. 450 m abgebaut.

Die Abb. 1 zeigt eine Übersicht des Rheinischen Braunkohlenreviers mit den ehemaligen Abbaugebieten. Die Braunkohlengewinnung der ehemaligen Tagebaue fand an den Rändern der Großschollen und im sog. Villerücken statt, in der Regel, dort wo die Lagerstätte nah an der Tagesoberfläche anstand bzw. ausstrich. Neben den derzeit aktiven Tagebau-



**Abb. 1:** Ehemalige Braunkohlenabbaugebiete im Rheinland

en, dem Tagebau Hambach in der Erftscholle, dem Tagebau Inden in der Rurscholle und dem Tagebau Garzweiler in der Venloer Scholle, existierten mehrere ehemalige Tagebaue, die zum größten Teil bereits vollständig rekultiviert sind. Im Westen des Reviers ist dies der ehemalige Tagebau Zukunft (westlich des Tagebaus Inden), westlich der Stadt Düren ging der Tagebau Düren um, im Umfeld der Stadt Zülrich der Tagebau Zülrich. Im Osten des Reviers sind dies

neben den diversen kleineren, frühen Tagebauen in der südlichen Ville die ehemaligen Großtagebaue Frechen, Bergheim und Fortuna-Garsdorf.

Die Hydrogeologie ist gekennzeichnet durch verschiedene Grundwasserleiter, die durch Geringleiter wie Tonschichten und Braunkohlenflöze voneinander getrennt sind (s. Abb. 2).

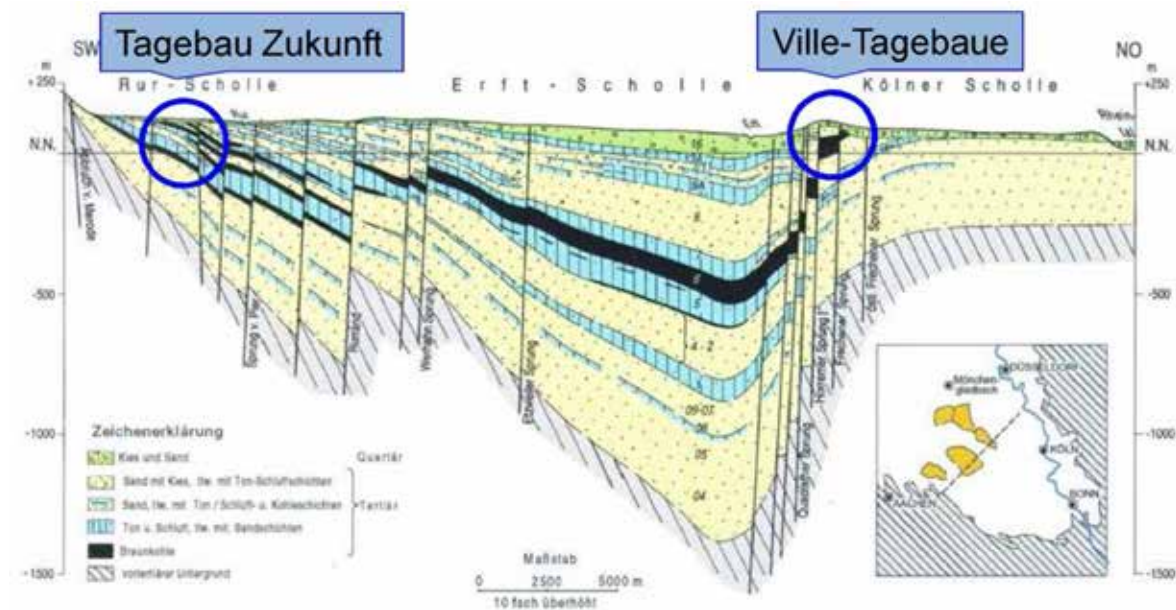


Abb. 2: Geologische Übersicht der Niederrheinischen Bucht [Knufinke 1997]

## 2. Gewinnungsverfahren

Der frühe, systematische Braunkohlenabbau geht auf Gewinnungstätigkeiten vor mehr als 150 Jahren zurück. Dort, wo die Braunkohle oberflächennah anstand, entwickelten sich die ersten Tagebaue.

Nach und nach war wegen der tiefer liegenden Flöze die Entwicklung der Tagebaue in die Teufe erforderlich. Um unter diesen Randbedingungen die Braunkohle sicher im Tagebau gewinnen zu können, war es erforderlich, vorab das Grundwasser abzusenken und während des Betriebs des Tagebaus auf einem ausreichend niedrigen Stand zu halten (vgl. Abb. 4). Hierbei ist es wichtig, dass der Wasserspiegel in den Gewinnungsböschungen des Hangenden (oberhalb der Kohle) bis auf die Unterkante des jeweiligen Grundwasserleiters abgesenkt wird, da sonst das in den Tagebau einströmende Grundwasser die Standsicherheit der Böschungen gefährden würde. Unterhalb der Kohle (im sog. Liegenden) muss der Grundwasserdruckspiegel des ersten Liegendgrundwasserleiters bis auf das Niveau des betrieblichen Liegenden (Unterkante der Kohle) abgesenkt

werden, um einen hydraulischen Grundbruch oder Auftriebseffekte sicher zu vermeiden. Für die tieferen Liegendgrundwasserleiter ergibt sich der höchst zulässige Druck anhand der anstehenden Lithologie und Überdeckungsverhältnisse.

Dies hierfür erforderliche Sumpfung des Grundwassers erfolgt dabei zumeist über Vertikalfilterbrunnen, die sowohl am Rand und im Vorfeld des Tagebaus als auch auf den Sohlen des Tagebaus selbst angeordnet sind. Aufgrund des wasserrechtlichen Gebots der größtmöglichen Grundwasserschonung und aufgrund wirtschaftlicher Erwägungen wird das Grundwasser dabei nur soweit abgesenkt, wie es zum sicheren Betrieb des Tagebaus erforderlich ist.

Die Grundwasserabsenkung beginnt dabei grundsätzlich mit einem Vorlauf von mehreren Jahren zum Abbau, allerdings sind im Rheinischen Braunkohlenrevier weite Bereiche der Grundwasserlandschaft bereits durch frühere Abbautätigkeiten und die dazu erforderlichen Sumpfungstätigkeiten

beeinflusst, so dass die derzeit noch erforderliche Zusatzabsenkung recht zeitnah zum Abbau erfolgen kann. Nach der Auskohlung kann mit der einsetzenden Verkippung die Sumpfung im rückwärtigen Bereich der Tagebaue wieder reduziert

werden, so dass nach dem Abbau in der Kippe und den umliegenden Grundwasserleitern ein sukzessiver Grundwasserwideranstieg einsetzt, sofern diese Bereiche nicht von anderen Tagebauen und ihren Sumpfungen überprägt werden [Forkel 2011].

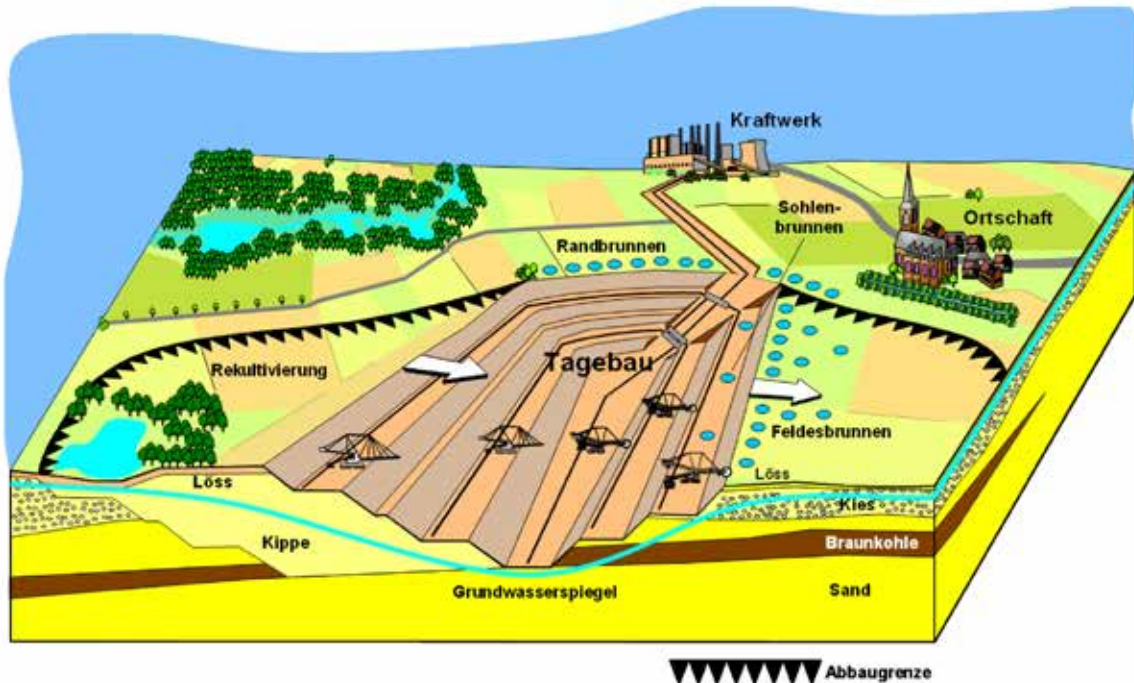


Abb. 3: Gewinnungsschema eines Braunkohlentagebaus

### 3. Bodenbewegungen infolge Grundwasserabsenkung bzw. -wideranstieg

#### 3.1 Ursache der Bodenbewegungen

Die Grundwasserabsenkungen bewirken durch den Wegfall des Auftriebs eine Erhöhung der effektiven Spannungen, die zu Setzungen in den Gebirgsschichten und summarisch zu Bodensenkungen an der Geländeoberfläche führen [Ziegler 2007]. Die effektiven Spannungen entsprechen dem tatsächlichen Korn-zu-Korn-Druck. Maßgeblich für die effektiven Spannungen ist das Gewicht des Bodens einschließlich des in den Poren vorhandenen Wassers abzüglich des herrschenden Porenwasserdrucks. In einem nichtbindigen Boden mit hoher Durchlässigkeit tritt der Setzungsvorgang ohne Zeitverzögerung auf, da das enthaltene Porenwasser schnell entweichen kann. Bei einem bindigen Boden dagegen wird wegen der geringen Durchlässigkeit das Wasser nicht unmittelbar sondern zeitverzögert abströmen. Es baut sich ein der Auflast entsprechender Porenwasserüberdruck auf, so dass die gesamte zusätzliche Last zunächst vom Porenwasser getragen wird. Mit zeitlicher Verzögerung fließt dann aufgrund des Porenwasserü-

berdrucks Wasser aus den Poren ab, wodurch der Überdruck abgebaut und gleichzeitig die effektiven Spannungen im gleichen Maß erhöht werden. Die Summe aus aktuellem Porenwasserüberdruck und effektiver Spannungserhöhung entspricht somit immer gerade der zusätzlichen Auflast (Abb. 5).

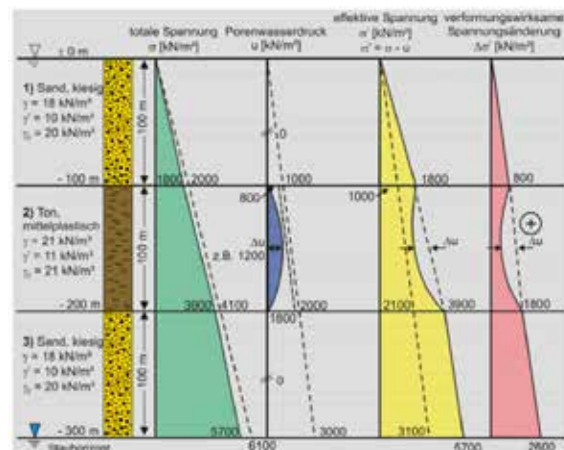


Abb. 4: Konsolidierung infolge GW-Absenkung: Darstellung der totalen, effektiven und verformungswirksamen Spannungen sowie des Porenwasserdrucks einige Zeit nach einer GW-Absenkung



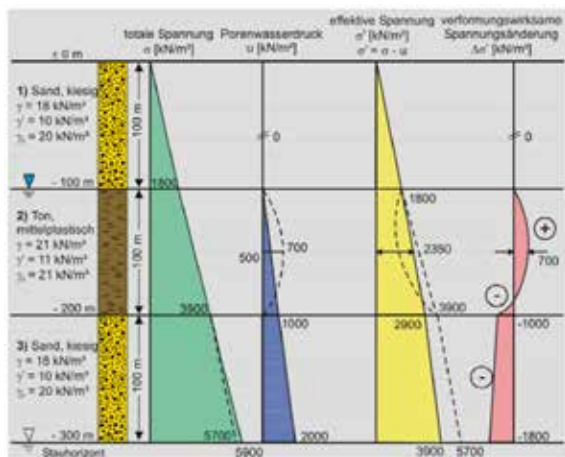


Abb. 5: Situation einige Zeit nach erfolgtem teilweisen Grundwasserwiederanstieg

Das physikalische Bodenbewegungsmodell kann sumpfungsbedingte Bodenbewegungen nachvollziehen und prognostizieren. Der zeitverzögerte Abbau des Porenwasserüberdruckes, mit dem gleichzeitig zeitverzögerte Setzungen verbunden sind, wird als Konsolidation bezeichnet, die mit der

Theorie von Terzaghi beschrieben werden kann. Als Ergebnis dieser Theorie erhält man, dass nach Beendigung der Grundwasserabsenkung – sofern die beeinflussten Böden noch nicht auskonsolidiert sind – der Konsolidierungsvorgang noch weiter fortschreitet und somit weiterhin zeitverzögert Setzungen auftreten. Der sich an die Auskohlung anschließende Grundwasserwiederanstieg führt dazu, dass der Boden wieder unter Auftrieb gerät. Die damit verbundene Zunahme des Porenwasserdrucks verringert die effektiven Spannungen, was zu Hebungen an der Geländeoberfläche führt. Sofern diese Hebungen anfänglich noch durch nachlaufende Konsolidierungssetzungen überlagert werden, die größer als die sofort wirksamen Hebungsbeträge der nichtbindigen Schichten sind, kann ein auf ersten Blick zunächst ungewöhnlich erscheinender Effekt beobachtet werden, dass trotz Grundwasserwiederanstieg noch weitere Setzungen auftreten [Ziegler 2007].

### 3.2 Gleichförmige, unschädliche Bodenbewegungen

Entsprechend der Konsolidation der Gebirgsschichten verlaufen die Bodenbewegungen zeitlich betrachtet sehr langsam. Da sich die Grundwasserabsenkung von den Brunnengalerien gleichmäßig, parabelförmig ausbreitet, führen die Bodensenkungen (= sogenannte Schollensenkung) zu einer flächenhaft gleichförmigen, großräumigen Senkungsmulde.

Die Abb. 6 zeigt den typischen zeitlichen Senkungsverlauf eines Messpunktes. Die Setzungsgeschwindigkeiten gehen einher mit der Zunahme bzw. dem

Rückgang der Sumpfungen. Mitte der 1970er Jahre bis Mitte der 1980er Jahre war geprägt durch starke Sumpfungen in der Erftscholle für den Tagebau Fortuna-Garsdorf, der 1984 das Tiefste erreichte (Zunahme der Bodensenkungsgeschwindigkeit von 34 bis 44 mm/a) und dem anschließenden Sumpfungsrückgang nach sukzessivem Verfüllen des Tagebaus in den letzten Jahren (Rückgang der Bodensenkungsgeschwindigkeit von 40 bis 24 mm/a).

Die Abb. 7 stellt den Verlauf der Bodensenkungen und den geologischen Schichtenaufbau dar. Die

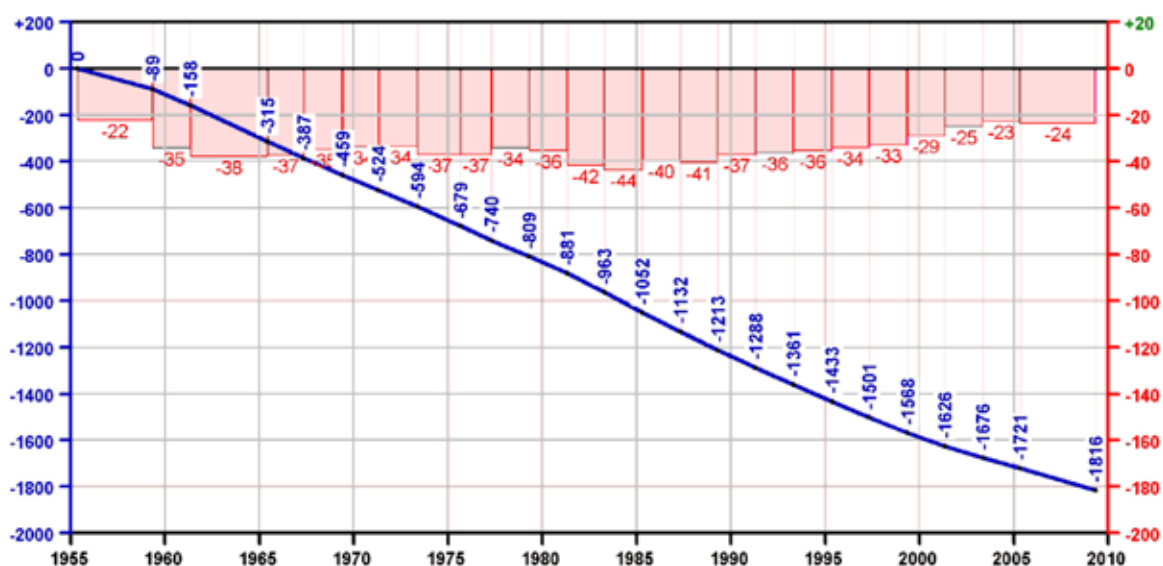
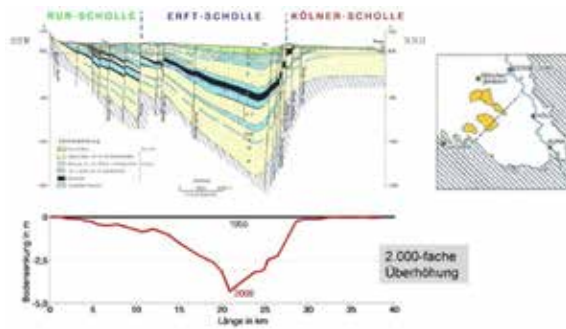


Abb. 6: Das Zeitsenkungsdiagramm zeigt eine typische, relativ homogene Höhenänderung eines Messpunktes (blaue Linie = Senkungsbetrag in mm, roter Balken = Senkungsgeschwindigkeit in mm/Jahr)

Bodensenkungen verlaufen in Form einer langgestreckten Senkungsmulde. In der Erftscholle belaufen sich die Bodenbewegungen seit Mitte der 1950er Jahre bis 2011 auf bis zu 4,5 m. Das hohe Maß der Absolutsenkung ist begründet mit den großen Anteilen bindiger Gebirgsschichten in den bis zu 1.500 m mächtigen Sedimenten der Erftscholle und dem Ausmaß der über 55jährigen Sumpfungsentwicklung.



**Abb. 7:** Die Bodensenkungen verlaufen in Form einer langgestreckten Senkungsmulde

Die zum Rurrand-System gehörenden Verwerfungen trennt die Erftscholle von der Rurscholle. Die Gebirgsschichten sind hier in weiten Bereichen um mehrere 100 m höhenmäßig gegeneinander versetzt. Das Festgestein steht auf der Rurscholle in einer Tiefe von bis zu 1000 m Tiefe an. Die darüber liegenden Sedimentschichten umfassen

Sande und Kiese sowie Ton- und Schluffschichten aller in der Niederrheinischen Bucht vertretenen stratigraphischen Einheiten. Auch in der Rurscholle wird das gesamte Schichtenpaket von der Grundwasserabsenkung erfasst, mit Bodensenkungen an der Tagesoberfläche von bis zu 1 m von Beginn der großräumigen Sumpfungen bis 2011. Die deutlich geringeren Senkungsbeträge liegen begründet in den geringeren Anteilen bindiger Schichten sowie des geringer mächtigen Gesamtschichtenpaketes im Vergleich zur Erftscholle. Im Nordraum geht der Tagebau Garzweiler in der Venloer Scholle um, die durch Tektoniksysteme von der Erftscholle und des Rurrandsystems von der Rurscholle getrennt wird. Hier liegen die absoluten Bodensenkungen in der Größenordnung bis zu 0,4 m. Der Schichtenaufbau weist aus Bodenbewegungssicht im Vergleich mit der Rurscholle eine nochmals kleinere Schichtmächtigkeit bindiger Böden aus. Eine vergleichende Betrachtung des geologischen Schichtenaufbaus und der Bodensenkungen führt auf dem ersten Blick zu einer bereichsweisen hohen Abhängigkeit zwischen Geologie und Bodenbewegungen. Erfahrungsgemäß muss für eine detaillierte Bodenbewegungsanalyse die Sumpfungsentwicklung einbezogen werden, was die Komplexität der Zusammenhänge erheblich erhöht.

### 3.3 Ungleichförmige, schädliche Bodenbewegungen

Ungleichförmige, schädliche Bodenbewegungen und somit Bergschäden können dagegen in Bereichen mit geologischen Besonderheiten entstehen, und zwar an tektonischen Verwerfungen und in Flussniederungsgebieten [Preuß 2011].

### 3.4 Bewegungsaktive, tektonische Störungen

Von den vielen geologisch projizierten Störungen sind aus Bergschadenssicht nur die hydrologisch wirksamen von Bedeutung. Auf beiden Seiten dieser Störungen sind infolge der tektonischen Bewegungen die Gebirgsschichten gegeneinander um bis zu mehrere 100 m vertikal versetzt und differieren häufig in ihren Mächtigkeiten und Korngefüge. Die Sprungzonen können durch eine Tonfüllung mehr oder weniger wasserdicht ausgebildet sein, was die gleichmäßige Ausbreitung der Grundwasserabsenkung behindert. Sofern die Grundwasserstockwerke auf beiden Seiten einer Störung durch unterschiedliche Sumpfungen beaufschlagt werden,

können die Gebirgsschollen mit unterschiedlichen Bodensenkungsgeschwindigkeiten reagieren. Es bildet sich dabei kontinuierlich ein stufenförmiger Geländeabsatz aus, der linienförmig und in seiner Breite eng begrenzt verläuft.

In der Phase des Grundwasserwiederanstiegs kann nicht ausgeschlossen werden, dass es in solchen Bereichen zu einer Bewegungsumkehr kommt.

### 3.5 Flussniederungsgebiete

In den Flussniederungsgebieten können die großräumigen, gleichförmigen Schollensetzungen durch Auesetzungen in Bereichen mit humosen Einlagerungen ungleichmäßig überlagert werden. Charakteristisch für solche Gebiete mit einem natürlichen, oberflächennahen Grundwasserspiegel ist das Vorhandensein von Überschwemmungsböden (Auelehm) mit humosen Einlagerungen und Torfpaketen in Senken und verlandeten Flussarmen. Diese Bodenschichten haben ihre humose Substanz nur unter ständigem Grundwasserumschluss halten können. Sofern sich der freie Grundwasserspiegel aufgrund von Einflüssen durch Wasserwerke,

Niederschlagsdefizite, Flussmeliorationen oder Bergbau absenkt, kann es zu lang anhaltenden Setzungen infolge aerober Mineralisierung der entwässerten organischen Böden kommen.

Nach Beendigung des Bergbaus steigt auch der freie Grundwasserspiegel wieder auf das ursprüngliche Niveau an und umschließt somit die Aueböden. Damit werden die bis dahin noch anhaltende Mineralisierungsvorgänge der humosen Bestandteile gestoppt und die ggfls. noch vorhandenen Torfsetzungen beendet.

### 3.6 Kernaussagen zur Systematik sumpfungsbedingter Bodenbewegungen

Aufgrund Jahrzehnte langer Messbeobachtungen können zusammenfassend nachfolgende Punkte festgehalten werden, die das Bodenbewegungsverhalten im Rheinischen Braunkohlenrevier charakterisieren:

- Die Bodenbewegungen verlaufen in Form einer großen, lang gestreckten Senkungsmulde
- Die Senkungsmulde besitzt eine Ausdehnung von ca. 30 km x 70 km und eine Muldentiefe von ca. 4,5 m seit Mitte der 1950er Jahre bis 2011.
- Zu verzeichnen sind geringe Senkungsgeschwindigkeiten im Millimeterbereich bis zu mehreren Zentimetern pro Jahr, abhängig von der Sumpfungintensität und den Bodenverhältnissen.
- Die gleichförmigen Bodensenkungen und die Schollenneigung sind unschädlich für Bauwerke
- Ungleichförmige Bodenbewegungen und damit einhergehend Bergschäden können bei geologischen Besonderheiten auftreten, und zwar
  - Aue-Bergschäden bei Vorliegen humoser Einlagerungen in Flussniederungsgebieten mit sumpfungsbedingter Absenkung des freien Grundwasserspiegels
  - Tektonik-Bergschäden im Bereich hydrologisch wirksamer, bewegungsaktiver Störungen.

## 4. Dokumentation der Bodenbewegungen

Die Bodenbewegungsmessungen erfolgen überwiegend in Form von Präzisionshöhenmessungen an vermarkten Punkten an Gebäuden und in der freien Flur an Bodenpunkten. Das vorhandene Punktfeld im Bodenbewegungsgebiet des Rheinischen Braunkohlenbergbaus umfasste 2011 mehr als 150.000 Messpunkte. Die Wiederholungsrhythmen werden entsprechend den jeweiligen Anforderungen festgelegt. Anlass und Grundlagen der Messungen sind vielfältig:

- Gesetzliche Auflagen (u.a. BBergG, Marks-BVO): Das Grubenbild dokumentiert somit revierweit das generelle Bewegungsverhalten.
- Genehmigungsrechtliche Auflagen: Beobachtung von Bau- und Bodendenkmalen gemäß wasserrechtlichen Erlaubnis für den Tagebau Imden vom 30.07.2004 festgelegt, sowie gemäß Rahmenbetriebsplan Garzweiler II vom 22.12.1997 Messungen in sogenannte Transekten und die Erstellung von Bodenbewegungsprognosen
- Bergschadensvermessungen: flächenhafte Senkungsmessungen und Objektbezogene Beobachtungen sind wichtige Bausteine für die Beurteilung von Bergschäden

## 5. Prognose sumpfungsbedingter Bodenbewegungen infolge Grundwasserwiederanstieg

### 5.1 Prognoseverfahren

Für die Prognose der Bodensenkungen hat RWE Power ein auf Bodenbewegungsmessungen basierendes markscheiderisches Modell entwickelt [Schaefer 2006]. Ferner hat der Lehrstuhl für Geotechnik im Bauwesen der RWTH Aachen (GiB) gemeinsam mit RWE Power ein bodenmechanisches Prognosemodell entwickelt [Ziegler 2007]. Dieses

Modell ist in der Lage, besondere Fragestellungen zu beantworten, z. B. die Abschätzung von Bodensenkungen infolge der Grundwasserabsenkung, aber auch der Bodenhebungen infolge des Grundwasserwiederanstiegs für lange Zeiträume bis zum stationären Zeitpunkt.

### 5.2 Markscheiderisches Prognosemodell

Das markscheiderische Prognosemodell wird bisher für kurz- bis mittelfristige Prognosezeiträume eingesetzt. Beispielhaft wird auf die Bodenbewegungsprognose für den Nordraum für die Zeiträume 2001 bis 2025 bzw. 2045 im Rahmen der Umsetzung der Auflagen für den Rahmenbetriebsplan Tagebau Garzweiler I/II hingewiesen. Die Abb. 8 zeigt ein Ergebnis der prognostizierten Bodenbewegungen im Nordraum.

Die Ergebnisse werden regelmäßig der Aufsichtsbehörde berichtet. Bisher haben sich keine relevanten Abweichungen zwischen Messungen und Prognose eingestellt. Das Verfahren hat sich auch hier, wie bereits in vielen anderen Fällen, bewährt. Basis des Modells ist die Grundannahme, dass sich der Betrag der Bodenbewegungen (Senkungen/Hebungen) proportional zur Grundwasserabsenkung/-entspannung bzw. zum Grundwasserwiederanstieg verhält.

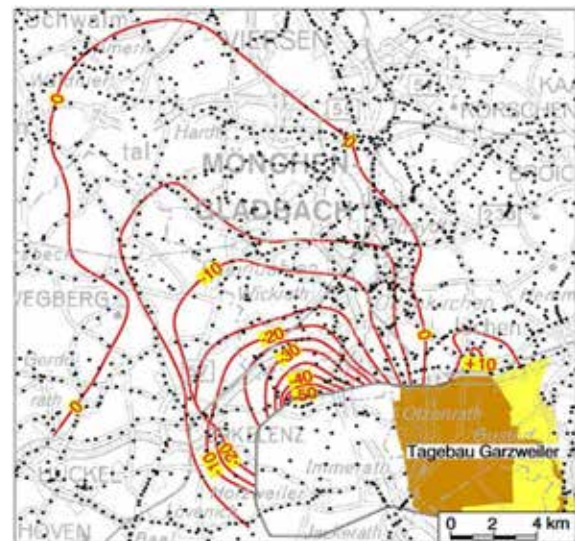


Abb. 8: Höhenmesspunkte des Leitnivelements und Bodenbewegungen (cm) für den Prognosezeitraum 2001 - 2025

### 5.3 Bodenmechanisches Prognosemodell

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung hat RWE Power zusammen mit dem Institut für Geotechnik der RWTH Aachen ein bodenmechanisches Modell entwickelt, mit dem die Bewegungsabläufe im Gebirge und an der Geländeoberfläche gut nachgebildet werden können. Allerdings ist dafür ein detailliertes geologisches und hydrologisches Modell aufzubauen und möglichst präzise Bodenparameter bereitzustellen. Diese Daten liegen im erforderlichen Umfang nicht flächenhaft für das Revier vor, womit der Einsatz derartiger Prognoseverfahren auf besondere Fragestellungen, z. B. Ermittlung von Restsenkungen nach Beendigung des Bergbaus, beschränkt bleibt. Nachfolgende Abbildungen zeigen beispielhaft den Höhenänderungsverlauf von Referenzpunkten mit einer exemplarischen Grund-

wasserganglinie in den Großschollen, Abb. 9 für die Erftscholle, Abb. 10 für die Rurscholle, Abb. 11 für die Venloer Scholle. Bodenbewegungsprognosen mit einem bodenmechanischen Modell.

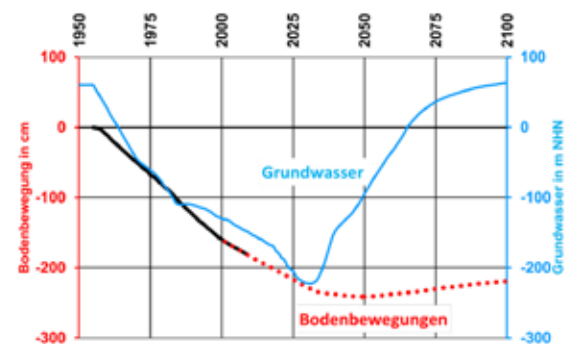
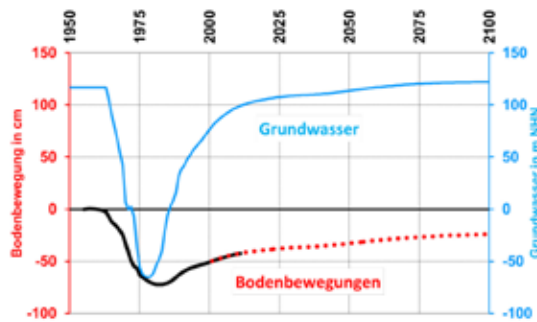
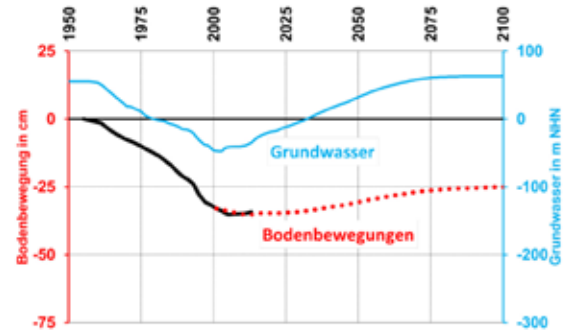


Abb. 9: Die Prognose für einen Referenzpunkt in der Erftscholle ergibt eine zu erwartende max. Senkung von -2,4m und abzüglich der prognostizierten Bodenhebungen verbleibende Restsenkungen für das Jahr 2100 von -2,2 m



**Abb. 10:** Die Messung für einen Referenzpunkt in der Rurscholle ergab eine max. Senkung von -0,7 m und aus der Prognose wird eine Restsenkung für das Jahr 2100 von -0,2 m erwartet. Die maximale Grundwasserabsenkung wurde 1977 erreicht, die maximale Bodensenkung folgte ca. 5 Jahre später



**Abb. 11:** Die Prognose für einen Referenzpunkt in der Venloer Scholle ergab eine max. Senkung von -0,4 m und Restsenkungen für das Jahr 2100 mit einem Betrag von -0,3 m.

## 6. Kernaussagen und Fazit zu Bodenbewegungen nach Beendigung des Bergbaus

Abhängig von den geologischen und den hydrogeologischen Verhältnissen wird prognostiziert, dass ausgehend von den zuvor maximal (zu erwartenden) abgelaufenen Bodensenkungen, Restsenkungen in der Größenordnung von 80 bis 50 % verbleiben. Die bis zum Senkungsmaximum entstandenen Senkungsmulden bleiben von der Lage her erhalten. Sie werden jedoch nach der Hebungsphase von der Ausprägung her wieder geringer ausfallen.

Unstetigkeiten infolge Hebungs differenzen an bereits aktivierten Störungen sind möglich und verringern die infolge bergbaulicher Einflüsse entstandenen Setzungsdifferenzen. Da der Grundwasserwiederanstieg keinen Druckanstieg in den tieferen Grundwasserleitern über das ursprüngliche Maß hinaus verursacht und die geologischen Bedingungen unverändert sind, werden erwartungsgemäß

keine neuen Störungen aktiviert und vorhandene bewegungsaktive Störungen sich nicht verlängern.

Nach Beendigung des Grundwasserwiederanstiegs stellen sich im Allgemeinen wieder die vorbergbaulichen Flurabstände ein, bereichsweise verbleibt ein etwas größerer Abstand des Grundwassers zur Geländeoberkante (natürlicher Zustrom im Umfeld der Restseen).

Vernässungen an Gebäuden sind bergbaubedingt daher grundsätzlich nicht zu erwarten. Der Wiederanstieg des freien, oberflächennahen Grundwasserspiegels stoppt die beschriebenen Mineralisierungseffekte in humos durchsetzten Aueböden, wodurch die Ursache von Auebergschäden nachhaltig behoben wird.

## 7. Literatur

Forkel, Ch.: Aspekte des Grundwasserwiederanstiegs im Rheinischen Revier. : Dresden, 2011

Preuße, A.; Schulte, R.: Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. Energie und Rohstoffe: Freiberg, 2011

Schaefer, W.: Bodenbewegungen im rheinischen Braunkohlenrevier - Beobachtungen nach Wiederanstieg des Grundwassers. 7. Geokinematisher Tag: Freiberg, 2006

Ziegler, M.; Giese, St.; Forkel, C.; Schaefer, W.: Prognose sumpfbungsbedingter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlerevier. Geotechnik: 2007