

# Bodenbewegung in Folge des Grubenwasseranstiegs

**Papst Markus, Preuße Axel, Sroka Anton**

Die Stilllegung der Steinkohlenbergwerke in Deutschland wurde für Ende des Jahres 2018 bestimmt. Nach 2018 wird die Hauptaufgabe der RAG AG die Bewältigung der sogenannten Ewigkeitsaufgaben sein. Ein wichtiges Ziel für die RAG AG ist es, diese Ewigkeitsaufgaben wirtschaftlich optimal durchzuführen. Die Ewigkeitsaufgaben beinhalten unter anderem die Pumparbeiten des Grubenwassers. Bei der Gesamtkostenoptimierung sind die Pumparbeiten von großem Einfluss. Eine Reduzierung der Pumparbeiten führt durch den steigenden Grubenwasserpegel zu einer großflächigen Hebungsbewegung an der Tagesoberfläche.

Zur Zeit des aktiven Steinkohlenbergbaus richtete die Forschung den Blick auf die Senkungsbewegung und ihre begleitenden Komponenten (Schieflage, Längenänderung, Krümmung, etc.). Weiterhin wurden u.a. Unstetigkeiten, bergschadensmindernde Abbauplanungen, bautechnische Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen, Unstetigkeiten und der Einwirkungsbereich analysiert. Die ab 2018 veränderten Gegebenheiten führen auch zu einer Verschiebung des Forschungsfokus hin zu den Folgen eines Grubenwasseranstiegs. Hierbei sind besonders hervorzuheben: die weiträumigen Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche, die Auswirkungen auf den Altbergbau und die Bewegungsabläufe an Unstetigkeiten.

## 1. Entwicklung der Forschung im Bereich des Grubenwasseranstiegs

Hebungsbewegungen sind bereits seit über hundert Jahren im Blickpunkt der Wissenschaft. Die ersten qualitativen Beobachtungen wurden von Hillegaart im Jahr 1911 dokumentiert. In demselben Jahr stellte Buntzel Hebungen von bis zu 150mm im Oberschlesischen Steinkohlenrevier fest. 1940 wurde von Oberste-Brink eine Hebung auf einer Fläche festgestellt, die über einem nach der Stilllegung gefluteten Grubenbau liegt. Die stärkste Hebungsbewegung trat im Bereich der größten gebauten Flözmächtigkeiten auf. Der maximale Wert wurde mit 170mm bestimmt. Die Flöze befanden sich in einer mäßig geneigten bis flachen Lagerung und hatten eine maximale Teufe von 500m. Oberste-Brink konnte Hebungen über dem gesamten Grubenfeld beobachten. Er nahm die Quelfähigkeit der tonhaltigen Gesteine als

Ursache für die Bodenbewegung an. Zudem sagt er, dass Hebungen nicht die Ursache für Schäden an der Tagesoberfläche sein können, da die Bewegungen zu gleichmäßig seien. (Hillegaart 1911), (Buntzel 1911), (Oberste-Brink 1940), (Goerke-Mallet 2000), (Sroka, Preuße und Holzheim 2006)

Im Vergleich zu Oberste-Brink vermutete Spickernagel im Jahr 1975, dass nicht nur die Quelfähigkeit des Gesteins, sondern auch die Kraft des Wasserauftriebs, Ursache für Bodenhebungen infolge von Grubenflutungen ist. Weiterhin stellte er fest, dass Hebungen bis zum Senkungsnullrand auftreten. Pöttgens untersuchte die Hebungsbewegung im Limburger Steinkohlenrevier im Jahr 1985. Er konnte Hebungen von bis zu 230mm beobachten und erkannte, dass die Anstiegsgeschwindigkeit des Grubenwassers einen Einfluss auf die Hebungsbewegung hat. Pöttgens entwickelte aus seinen Beobachtungen ein erstes Prognosemodell zur Vorausberechnung der zu erwartenden maximalen Hebung. (Spickernagel 1975), (Baglikow 2003), (Sroka 2005), (Sroka, Preuße und Holzheim 2006), (Sroka, Preuße 2009), (Baglikow 2010)

Die nächsten Untersuchungen wurden von Fenk im Jahr 1997 getätigt, der im Zwickau-Oelsnitzer Revier eine maximale Hebung von 170mm dokumentierte und diese in Verbindung zur maximal aufgetretenen Senkung von 17,3m brachte. Er entwickelte wie Pöttgens ein Verfahren zur Prognose von Hebungsbewegungen. Die jüngsten Untersuchungsergebnisse aus dem Jahr 2011 von Rosner beschäftigen sich mit dem Aachener und Südlimburger Revier. Es wurden Hebungen von bis zu 280mm beobachtet. Rosner erkannte eine Verzögerung zwischen dem Beginn der Flutung und dem Eintreten der Hebungsbewegung von

4-5 Jahren. Hebungsbewegungen wurden von Rosner dokumentiert, die einen Abstand von bis zu 10 km zu den Abbaufeldern der Reviere hatten. Weiterhin erkannte er, dass höhere Hebungsbeträge zu erwarten sind, wenn ein Einstau des Deckgebirges erfolgt. (Fenk 1997, 2000), (Rosner 2011)

Besonders hervorzuheben sind die Beobachtungen von Baglikow und Heitfeld im Erkelenzer Revier. In diesem Gebiet sind die einzigen bisher bekannten Schäden in Folge des Grubenwasseranstiegs beobachtet worden, so zum Beispiel am Rathaus in Wassenberg. Die Schäden erstrecken sich über eine Strecke von 800m entlang einer dokumentierten Erdstufe. Baglikow sagt, dass die Schäden zurückzuführen sind auf eine frühere Aktivierung einer abbaubegrenzenden Störung, im Erkelenzer Revier ist dies der Meinweg- und der Rurrandsprung

Lokale Grundwasserstandsveränderungen sind entlang der hydrologisch aktiven Meinweg- und Rurrandsprünge aufgetreten. Diese Veränderungen führen zu Druckdifferenzen, welche damit differentielle Hebungsbewegungen an der Tagesoberfläche auslösen. Eine Schadensfolge konnte nur bei signifikanten Hebungs-differenzen und einem sich ausbildenden Vertikalversatz ermittelt werden. Bis zum Jahr 2013 konnte so in der Ortslage Luchtenberg eine Hebung von 189mm und ein Vertikalversatz von 142mm ermittelt werden, dies entspricht einem Faktor von 0,75. Für die Ortslage Wassenberg ist die Hebung mit 266mm und der Vertikalversatz mit 133mm (Faktor 0,5) bestimmt worden. Bis heute sind Schäden dieser Art nur bei Flutung in der Ortslage Wassenberg beobachtet worden. (Baglikow 2003), (Heitfeld 2003), (Baglikow 2010), (Auch Berichte von Preuße, Sroka im Rahmen der RAG-Forschung)

## 2. Prognoseverfahren zur Bestimmung der Hebungsbewegung an der Tagesoberfläche

Die getätigten Beobachtungen und insbesondere der Schadensfall im Erkelenzer Revier sorgten dafür, dass die Wissenschaft sich mit Prognoseverfahren zur Bestimmung der Hebungsbewegung in Folge eines Grubenwasseranstiegs beschäftigt. Hierbei wurden drei Verfahren von Pöttgens, Fenk und Sroka & Preuße entwickelt.

### 2.1 Verfahren nach Pöttgens

Die physikalisch-mathematische Grundlage des Verfahrens von Pöttgens stellt die Lösung von Geertsma zur Vorausberechnung förderbedingter Senkungen infolge der Erdgasgewinnung dar. Dieser auf der Grundlage der Poro-Elastizitäts-Theorie entwickelten Lösung lagen zwei Annahmen zugrunde (Geertsma 1973):

1. eine lineare Spannung-Dehnungs-Funktion zur Beschreibung der vertikalen Kompaktion des Lagerstättenträgers infolge der Druckabnahme in den Poren und
2. einheitliche Verformungseigenschaften des die Lagerstätte überlagernden Gebirges.

Nach der ersten Annahme ist die Kompaktion des porösen Lagerstättenträgers, die durch eine Gasförderung, d. h. eine Druckabnahme, verursacht wird, wie folgt zu berechnen:

$$\Delta M = c_m \cdot M \cdot \Delta p \quad (1)$$

wobei die hier verwendeten Kurzbezeichnungen die nachfolgenden Bedeutungen haben:

$\Delta M$  – vertikale Kompaktion des Lagerstättenträgers [m],  
 $M$  – Mächtigkeit des Lagerstättenträgers [m],  
 $\Delta p$  – förderbedingte Abnahme des Porendruckes [Bar] und  
 $c_m$  – Kompaktionskoeffizient [Bar<sup>-1</sup>]

Der Wert des Kompaktionskoeffizienten ist von der Gesteinsart und der Porosität des Lagerstättenträgers abhängig und hat die Bedeutung der vertikalen Deformation des Lagerstättenträgers bei der Druckabnahme um eine Druckeinheit.

Da es beim Grubenwasseranstieg in den durch den Abbau zerrütteten Gebirgsbereichen zur Druckerhöhung kommt, hat Pöttgens vorgeschlagen, dass die daraus resultierende Dehnung dieses Gebirgsbereiches analog zur Formel (1) zu beschreiben ist (Pöttgens 1985):

$$\Delta h = d_m \cdot h \cdot \Delta p \quad (2)$$

wobei

$\Delta h$  – absolute Vergrößerung der Bruchzonenmächtigkeit [m],

$h$  – Mächtigkeit der Bruchzone [m],

$\Delta p$  – Zunahme des Drucks in der Bruchzone infolge des Grubenwasseranstiegs [Bar]

und

$d_m$  – Dehnungskoeffizient [ $\text{Bar}^{-1}$ ] sind.

Auf der Grundlage der „Nucleus of strain“-Lösung von Geertsma bekommt man für den Punkt an der Tagesoberfläche, der sich über dem Mittelpunkt eines kreisförmigen anthropogenen Wasserreservoirs mit dem Radius  $R$  und der Teufenlage  $H$  befindet, die nachfolgende Lösung für die Hebung (Pöttgens 1985):

$$h_{\max}(R, H) = 2(1 - \nu) \left[ 1 - \frac{C}{\sqrt{1 + C^2}} \right] \cdot d_m \cdot h \cdot \Delta p = 2(1 - \nu) \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + A^2}} \right] d_m \cdot h \cdot \Delta p \quad (3)$$

mit:

$C = H/R$ ,

$A = R/H$  und

$\nu$  – Poisson'sche Konstante.

Der Vergleich der Formeln (2) und (3) ergibt, dass das Verhältnis der maximal möglichen Hebung an der Tagesoberfläche (für  $R \rightarrow \infty$ ) und der absoluten Dehnung des zerrütteten Gebirgsbereiches konstant ist und sich nach folgendem Zusammenhang beschreiben lässt:

$$\frac{h_{\max}}{\Delta h} = 2(1 - \nu) \quad (4)$$

und für  $\nu < 0,5$  größer ist als 1.

Dies ist höchst unplausibel und resultiert aus der Tatsache, dass Geertsma bei der Entwicklung seines Verfahrens keine Volumenbilanz zwischen dem Kompaktionsvolumen des Lagerstättenträgers und dem Volumen der Senkungsmulde durchgeführt und bei der Parametrisierung berücksichtigt hat. Außerdem hat das von Pöttgens zur Hebungsvorausberechnung übernommene Verfahren von Geertsma keinen Kennwert, der die horizontale Einwirkungsweite der förderbedingten Senkungen begrenzt. Für das Erreichen eines Hebungswertes von 99 % der Vollhebung  $h_{\max}$  (für  $R \rightarrow \infty$ ) ist ein Wasserspeicher mit einem Radius von  $R = 100 H$  (streng 99,995  $H$ ) theoretisch notwendig, was den Beobachtungen in Situ nicht entspricht.

## 2.2 Verfahren nach Fenk

Entgegen Pöttgens geht Fenk generell von einer Abhängigkeit der flutungsbedingten Hebungen und den abbaubedingten Senkungen aus. Die direkt über dem Abbau entstandene Bruchzone setzt sich in der

Zeit durch die Last des überlagernden Gebirges. Diese Setzung zeigt sich nach deren Beendigung als die Endsenkung  $S_e$  an der Tagesoberfläche. Unter Verwendung des elastischen Ansatzes nach Hooke kann die Setzung der Bruchzone wie folgt beschrieben werden (Fenk 1997):

$$S_e = \frac{m}{E_s} \cdot H \cdot \delta_G \quad (5)$$

mit:

$m$  – Mächtigkeit der zerrütteten Gebirgszone [m],

$E_s$  – Steifezahl der zerrütteten Gesteinsschichten [MN/m<sup>3</sup>],

$H$  – Abbauteufe [m],

$\delta_G$  – Wichte des Gebirges [MN/m<sup>3</sup>] und

$S_e$  – Setzung der Bruchzone/abbaubedingte Endsenkung an der Tagesoberfläche [m].

Nach der Setzung der Bruchzone hat die verdichtete zerrüttete Gesteinsschicht noch eine Mächtigkeit von:

$$h = m - S_e \quad (6)$$

Durch die Umformung der Formel (5) bekommt man:

$$m = \frac{S_e \cdot E_s}{h \cdot \delta_G} \quad (7)$$

was zu der nachfolgenden Lösung für  $h$  führt:

$$h = m - S_e = \left[ \frac{E_s}{H \cdot \delta_G} - 1 \right] \cdot S_e \quad (8)$$

Die endgültige Lösung nach Fenk bekommt man auf der Grundlage der Formel (1), die die absolute Dehnung der zerrütteten Gesteinszone infolge der Flutung beschreibt.

Unter Berücksichtigung der Formel (8) und der Annahme

$$\Delta p = \delta_w \cdot W \quad (9)$$

bekommt man:

$$h = d_m \cdot \delta_w \cdot \left[ \frac{E_s}{\delta_G} - H \right] \frac{W}{H} \cdot S_e \quad (10)$$

Die hier verwendeten Kurzbezeichnungen haben die nachfolgenden Bedeutungen:

$\delta_w$  – Wasserwichte [MN/m<sup>3</sup>] und

$W$  – Grubenwasseranstieg im Gebirge [m].

Nach Fenk gilt die Formel (10) bei Ein- und Mehrflözbergbau. Zur Vorausberechnung der flutungsbedingten Hebungen eines Punktes an der Tagesoberfläche sind nach Fenk die Kenntnisse der Endsenkung  $S_e$ , der Teufe  $H$  des tiefstabgebauten Flözes und des Grubenwasseranstiegs  $W$  über dem Niveau des tiefstabgebauten Flözes notwendig. Die Kenntnis der Verteilung der abgebauten Flözflächen im Gebirge, d. h. deren Teufen und deren gebauten Mächtigkeiten, sind nach Fenk ohne Bedeutung.

Die Analyse der physikalischen Grundlagen und der definierten Randbedingungen, die zur Entwicklung der analytischen Lösung von Fenk dienen, ergibt, dass die Formel (10) nur zur Prognose der maximalen Hebung im Falle der Flutung eines großen einzelnen Abbaufeldes (zumindest Vollfläche) anwendbar ist. Nur in diesem Fall ist die Setzung der Bruchzone  $S_e$  mit der maximalen Senkung an der Tagesoberfläche identisch.

## 2.3 Verfahren nach Sroka & Preuße

Die Grundlage des Verfahrens zur Vorausberechnung flutungsbedingter Hebungen nach Sroka & Preuße bildet ein mathematisches Modell, das in der Struktur den markscheiderischen Verfahren zur Senkungsvorausberechnung identisch ist. (Sroka 2005), (Sroka, Preuße und Holzheim 2006), (Sroka, Preuße 2009)

Die Senkung in den markscheiderischen Verfahren ist als Faltung der abbaubedingten Konvergenz und einer verfahrensspezifischen Einfluss- bzw. Transformationsfunktion definiert:

$$S = K * \varphi_s \quad (11)$$

mit:

S – Senkung,  
K – Konvergenz,  
\* – Faltungssymbol und  
 $\varphi_s$  – Einflussfunktion für die Senkung.

Die flutungsbedingte Hebung im Verfahren von Sroka & Preuße ist als Faltung der flutungsbedingten Divergenz der durch den Abbau zerrütteten Gesteinszone und einer Transformationsfunktion definiert:

$$h_w = D * \varphi_w \quad (12)$$

mit:

$h_w$  – flutungsbedingte Hebung,  
D – Divergenz und  
 $\varphi_w$  – Transformationsfunktion für flutungsbedingte Hebung.

Die Grundlage des markscheiderischen geometrisch-integralen Hebungsmodells bildet ein kleines endliches Element der zerrütteten Gesteinszone mit einer quadratischen Grundfläche und der Höhe h.

Infolge des Grubenwasseranstiegs wird die Höhe h durch den Auftrieb vergrößert. Die Faltung dieser Vergrößerung  $\Delta h$  mit einer Transformationsfunktion führt zu einer elementaren Hebungsverteilung  $\Delta h(r)$  an der Tagesoberfläche, siehe Abbildung 1.

Durch die Rasterung der abgebauten Flächen in kleine endliche quadratische Elemente ist mittels der linearen Superposition die Berechnung der Hebung für jeden Punkt der Tagesoberfläche bei beliebiger Geometrie des Wasserreservoirs möglich.

Im deutschen Steinkohlenbergbau wird für die Vorausberechnung abbauinduzierter Bodenbewegungen das sogenannte Ruhrkohle-Verfahren angewandt. Die Annahme, dass die Einflussfunktion zur Vorausberechnung der flutungsbedingten Hebungen  $\varphi_w$  mit der Funktion  $\varphi_s$  zur Vorausberechnung der Senkung qualitativ identisch ist, ergibt die Möglichkeit, das Ruhrkohle-Verfahren in vollem Umfang zur Vorausberechnung flutungsbedingter Bodenbewegungen einzusetzen.

Die Vorausberechnung der Hebung für jede geflutete geschlossene Flözfläche kann dann mit Hilfe des Ruhrkohle-Verfahrens durchgeführt werden, wobei anstatt des Absenkungsfaktors ein Hebungsfaktor

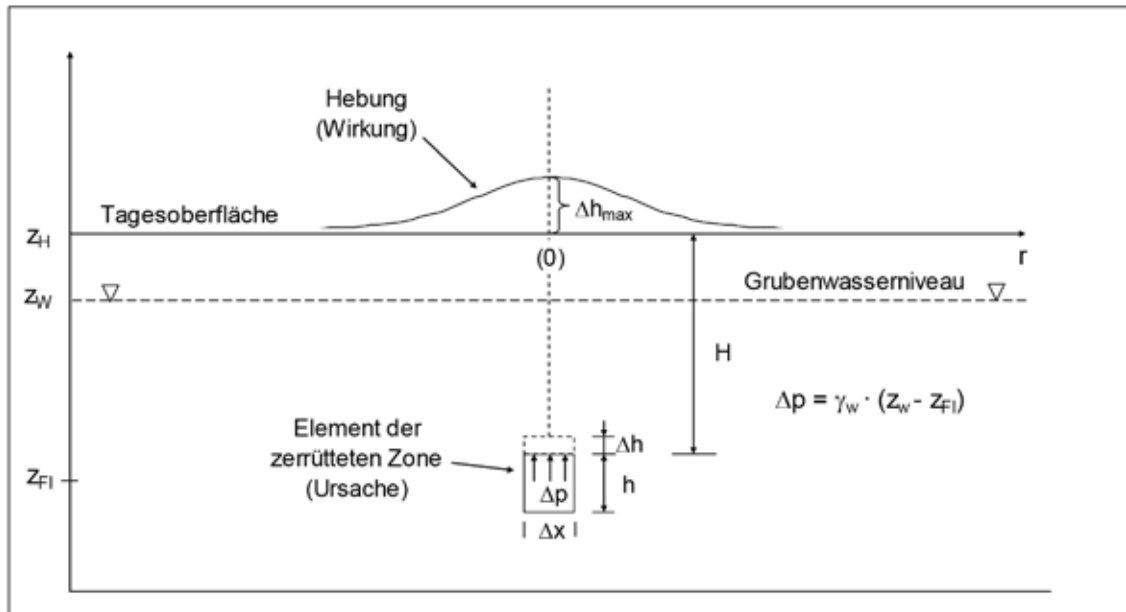


Abb. 1: Graphische Erläuterungen zum mathematischen Modell der flutungsbedingten Hebungen (Sroka, 2005)

$a_w(t)$  und anstatt des Grenzwinkels  $\gamma$  ein Grenzwinkel für Grubenwasseranstieg  $\gamma_w$  eingeführt werden.

Für ein endliches Element der zerrütteten Gesteinszone ist für die Einflussfunktion des Ruhrkohle-Verfahrens die Hebungsverteilung an der Tagesoberfläche mit Hilfe der Formel (13) zu beschreiben:

$$\Delta h(r,t) = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{d_m \cdot \Delta p(t) \cdot \Delta V}{R_w^2} \exp\left(-k \frac{r^2}{R_w^2}\right) \quad (13)$$

mit:  $\Delta p(t) = (Z_w(t) - Z_{Fl}) \cdot \delta_w$ ,

$$\Delta V = h \cdot \Delta x^2 = \lambda \cdot M \cdot \Delta x^2,$$

$$R_w = H \cdot \cot \gamma_w,$$

wobei die hier eingeführten Kurzbezeichnungen die nachfolgenden Bedeutungen haben:

$k$  – Konstante des Ruhrkohle-Verfahrens ( $k = -\ln 0,01 = 4,6052 \dots$ ),

$d_m$  – Dehnungskoeffizient,

$\Delta p(t)$  – Zunahme des Druckes in der zerrütteten Gebirgszone durch Grubenwasseranstieg zum Zeitpunkt  $t$ ,

$Z_w(t)$  – Höhenlage des Wasserspiegels zum Zeitpunkt  $t$ ,

$Z_{Fl}$  – Höhenlage des gefluteten endlichen Elementes in der zerrütteten Gebirgszone,

$\delta_w$  – Wasserwichte,

$\Delta V$  – Volumen des endlichen Elementes der zerrütteten Gesteinszone,

$M$  – Flözmächtigkeit,

$\lambda$  – relative Mächtigkeit des Bruchkörpers im Vergleich zu  $M$  ( $\lambda = 3-4$ ),

$\Delta x$  – Seitenlänge eines quadratischen Rasterelementes,

$R_w$  – Vollflächenradius für die Hebung,

$H$  – Tiefe des endlichen Elementes und

$\gamma_w$  – Grenzwinkel bei Grubenwasseranstieg.

Der Wert des Hebungsfaktors  $a_w(t)$  ist für jede einzelne geschlossene Flözfläche mit Hilfe der Formel (14) zu berechnen:

$$a_w(t) = d_m \cdot \lambda \cdot [Z_w(t) - Z_{Fl}] \cdot \delta_w \quad (14)$$

### 3. Hebungsprognose nach dem Verfahren von Sroka & Preuße

Zurzeit untersucht das Institut für Markscheidewesen die Bodenbewegung im Bereich des ehemaligen Bergwerks Königsborn. Um die dort zu erwartenden Hebungen zu prognostizieren, wird das Verfahren von Sroka & Preuße angewandt. Die Berechnung nach Fenk wurde testweise für einzelne Flöze durchgeführt und lieferte, unter Anwendung derselben Parameter, abweichende Ergebnisse zu dem Verfahren von Sroka & Preuße. Das Verfahren von Pöttgens wurde nicht benutzt, da der komplexe Sachverhalt des Bergwerks nicht abgebildet werden kann.

Die benötigten Parameter zur Prognose der flutungsbedingten Hebungserscheinungen, für das seit 1996 geflutete Bergwerk Königsborn, wurden aus den Pegeldaten der sechs Deckgebirgspegel und des Tiefpegels, das Grubenwasser stieg von 940m auf eine Teufe von 100m an (Messungen zwischen 1996 – 2012), den seit Mai 2004 erhobenen Nivellementdaten mit einer maximalen Hebung von 186mm (Stand Juli 2014) und den Grubenrissen der 18 gebauten Flöze gewonnen. Der Fokus der Analyse lag dabei auf der Auswertung der abbauspezifischen Daten Mächtigkeit, Teufe und Einsatz von Versatz. Später wurde auch die Dynamik und Hebungs geschwindigkeit des Grubenwasseranstiegs analysiert, um etwaige Wechselwirkungen in der Hebungs bewegung der Tagesoberfläche zu ermitteln.

Um die Prognoseberechnung nach Sroka & Preuße durchführen zu können ist ein 2km x 8km großes Raster oberhalb der Lagerstätte erzeugt worden. (Preuße, Sroka 2015) Mit den insgesamt 100 Einzelrasterfeldern und den dazugehörigen Prognoseparametern erfolgte die Hebungsmodellierung. Über einen Vergleich der Berechnungsergebnisse und der gemessenen Hebungs bewegung konnte das bergwerksspezifische Produkt aus Dehnungskoeffizient und Mächtigkeit der Bruchzone mit einem Wert von  $d_m \cdot \lambda = 1,092 \cdot 10^{-2} \frac{m^2}{MN}$  bestimmt werden. Die mit diesen Parametern ermittelte Hebungsverteilung ergab eine maximale Hebung von ca. 260mm im Bereich des Bergwerks Königsborn, für einen möglichen Grubenwasseranstieg auf eine Teufe von 50m (Abbildung 2).

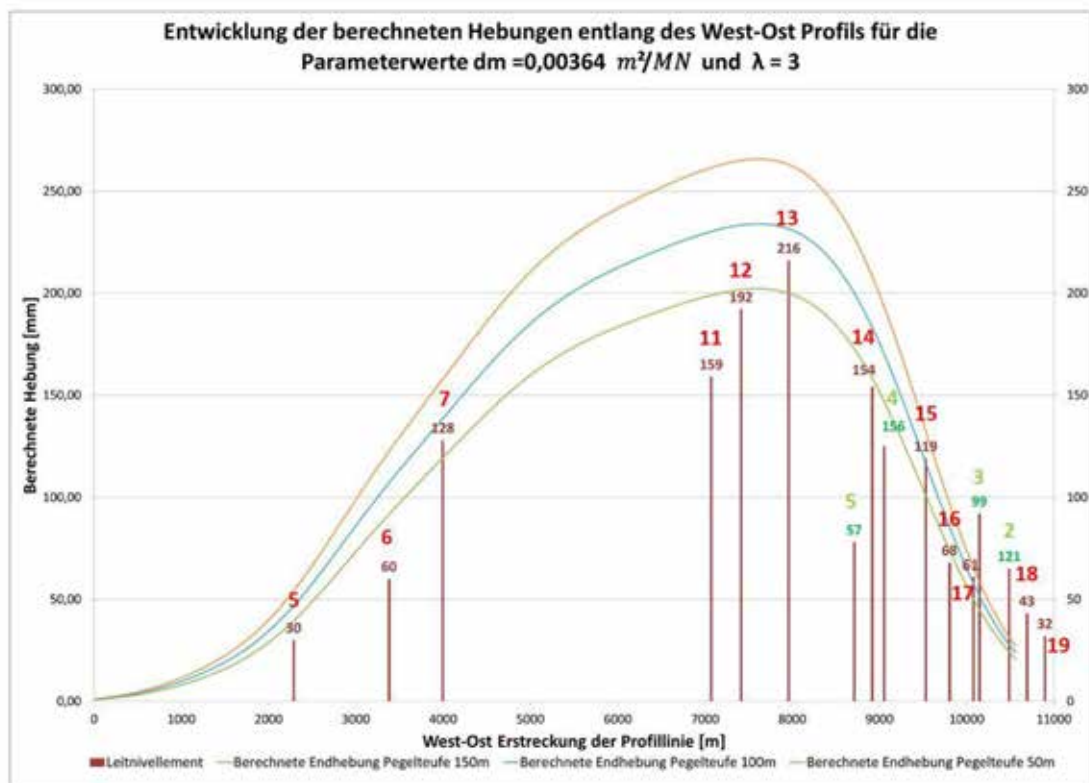


Abb. 2: Vergleich der theoretisch berechneten und gemessenen Hebungen entlang eines Profils bei der Flutung des Bergwerks Königsborn

## 4. Zusammenfassung

Hebungsbewegungen an der Tagesoberfläche in Folge eines Grubenwasseranstiegs sind in Deutschland seit über 100 Jahren bekannt. Die Hebungserscheinungen treten großflächig und auch außerhalb des ehemaligen Senkungsnullrandes auf. Betragsmäßig ist dies aber im einstelligen Prozentbereich des Senkungsbetrages, welches mögliche negative Auswirkungen auf die Tagesoberfläche vermindert. Um solch einem Fall vorzubeugen wurden drei Prognosemodelle zur Berechnung von Hebungen in Folge eines Grubenwasseranstiegs entwickelt. Die Modelle von Pöttgens und Fenk lassen keine Prognose von komplexen Lagerstätten zu. Das Modellierungsergebnis des Verfahrens von Sroka & Preuße konnte im Bereich des ehemaligen Bergwerks Königsborn erfolgreich angewandt werden und prognostiziert eine maximale Hebung von ca. 260mm.

## 5. Literaturverzeichnis

Baglikow, V. „Bergschäden nach Beendigung der Grubenwasserhaltung im tiefen Bergbau.“ In Markscheidewesen 110, 45-49. 2003.

Baglikow, V. „Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier.“ RWTH Aachen: Dissertation, 2010.

Buntzel, A. „Über die in Oberschlesien beim Abbau mit Spülversatz beobachteten Erdsenkungen.“ In Berg-, Hütten- und Salinenwesen 59, 293-334. 1911.

Fenk, J. „Zeitreihenanalyse für Hebungsprozesse über stillgelegten Steinkohlenbergwerken.“ In Markscheidewesen 17; 41. Wissenschaftliche Fachtagung des DMV. Bad Neuenahr, 1997.

Fenk, J. „Eine analytische Lösung zur Berechnung von Hebungen der Tagesoberfläche bei Flutung unterirdischer Bergwerksanlagen.“ In Das Markscheidewesen 107, 420-422. 2000.

Fenk, J., und Tzscharschuch, D. „Zur Berechnung flutungsbedingter Hebungen der Tagesoberfläche.“ In Markscheidewesen 114, 60-64. 2007.

Geertsma, J. „A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case.“ In The analysis of surface subsidence resulting from gas production in the Groningen area, the Netherlands, 43-61. Editor Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 1973.

Goerke-Mallet, P. Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlerevier Ibenbüren unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrologie. Aachen: Dissertationsschrift RWTH Aachen, Verlag Mainz, 2000.

Goldreich, A.H. Die Theorie der Bodensenkungen in Kohlengebieten. Berlin, 1913.

Hillegaat, A. „Untersuchungen über den Einfluss des Bergbaus auf die Erdoberfläche im Zwickauer Steinkohlenrevier.“ In Vermessungswesen 39, 229-334. 1911.

Heitfeld, K.-H., Heitfeld, M., Rosner, P., Sahl, H. „Kontrollierter Grubenwasseranstieg im Aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier.“ 3. Aachener Bergschadenkundliches Kolloquium. Aachen, 2003. 71-85.

Oberste-Brink, K. „Die Frage der Hebungen bei Bodenbewegungen infolge des Bergbaus.“ In Glückauf 76, 249-256. Glückauf Verlag, 1940.

Pöttgens, J. J. E. „Bodenhebung durch ansteigendes Grubenwasser.“ In 6. Internationaler Kongress für Markscheidewesen in Harrogate, 928-938. Harrogate, 1985.



Pöttgens, J.J.E. „Bodenhebung und Grundwasseranstieg aus geotechnischer und markscheiderisch-geodätischer Sicht im Aachen-Limburger Kohlenrevier.“ In Freiburger Forschungshefte A847, 193-207. Freiberg, 1998.

Rosner, P. Der Grubenwasseranstieg im aachener und Südlimburger Steinkohlenrevier – eine hydrogeologisch-bergbauliche Analyse der Wirkungszusammenhänge. Aachen, 2011.

Spickernagel, H. „Hebungen des Gebirges als Folgen des Bergbaus unter Tage.“ In Glückauf-Forschungshefte 36, 170-176. Glückauf Verlag, 1975.

Sroka, A. „Ein Beitrag zur Vorausberechnung der durch den Grubenwasseranstieg bedingten Hebungen.“ In 5. Altbergbau-Kolloquium, Tagungsband S. 453 - 462, TU Clausthal 2005

Sroka, A., Preuße, A., Holzheim, M. „Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf der Tagesoberfläche – Stand der Forschung.“ In Wasseranstieg im Steinkohlenbergbau, von Prof. Walter Frenz und Prof. Axel Preuße, 57-68. Aachen: GDMB, 2006.

Sroka, A., Preuße, A. „Zur Prognose flutungsbedingter Hebungen.“ In 9. Altbergbau-Kolloquium, Tagungsband S. 184 - 196, Leoben 2009

Sroka, A., Preuße A. „Risiken durch Grubenwasseranstieg.“ Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 0760 0000, November 2015, RAG Aktiengesellschaft, Herne (unveröffentlicht)