

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Sroka
Gutachterbüro
Hofmannstraße 31
01277 Dresden

Gutachterliche Stellungnahme

zur Quantifizierung der durch den Grubenwasseranstieg in der Wassergroßprovinz Lohberg zu erwartenden Bodenbewegungen und deren Bergschadensrelevanz, insbesondere für den ordnungsgemäßen Betrieb sensibler Infrastruktureinrichtungen, einschließlich untertägiger Verkehrsinfrastruktureinrichtungen und Rohrfernleitungen.

Markscheiderisch - bergschadenkundliche Beurteilung

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Sroka

Dr. Antoni Sroka

Mitarbeiter: Dr.-Ing. habil. Krzysztof Tajduś, Prof. IMG PAN

08. Juli 2022.

Dr.-Ing. Rafał Misa

Dr.-Ing. Mateusz Dudek

Dipl.-Ing. Dawid Mrocheń

Dresden-Kraków, Mai 2022 – Juli 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass / Einführung.....	3
2. Kurze Darstellung des Untersuchungsraumes.....	4
3. Verfahren zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen	6
4. Berechnungsgrundlagen / Berechnungsergebnisse	14
5. Bewertung der Schadensrelevanz	19
5.1 Stetige Bodenbewegungen.....	19
5.2 Unstetige Bodenbewegungen.....	23
6. Zusammenfassung / Fazit.....	26
7. Literaturverzeichnis.....	27
8. Anlagen.....	34

1. Anlass / Einführung

Die RAG Aktiengesellschaft in Essen hat im Mai 2022 den Gutachter mündlich beauftragt, ein Gutachten zu den erwartenden Bodenbewegungen infolge des Grubenwasseranstiegs in der Wassergroßprovinz Lohberg zu erstellen.

Im Rahmen der Umsetzung des Grubenwasserkonzeptes der RAG Aktiengesellschaft wird die Wasserhaltung in zentralem Bereich des Ruhrreviers (zeitweise) eingestellt. Die Einstellung der Wasserhaltung führt zum großräumigen Anstieg des Grubenwassers im Gebirge und in dessen Folge, wie die Bodenbewegungsmessungen in Situ aus einigen Steinkohlenbergwerken, in denen bereits Grubenwasser angestiegen ist, eindeutig zeigen, zu großräumigen Hebungen an der Tagesoberfläche.

Zu den notwendigen Sachverhalten dieses Gutachtens zählen:

- Prognose der zu erwartenden Hebungen und den daraus resultierenden bergschadensrelevanten Bodenbewegungselementen (Schieflagen und horizontale Längänderungen) für den gesamten Einwirkungsbereich.
- Aussagen zur Bergschadensrelevanz für Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen, wie
 - Baudenkmäler (z.B. Welterbe Zeche Zollverein),
 - Verkehrsinfrastruktureinrichtungen (z.B. Stadtbahnanlagen, Tunnelbauwerke),
 - Versorgungs- und Entsorgungsleitungen, Rohrfernleitungen.
- Festlegung notwendiger Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des sicheren Betriebes der einzelnen Infrastruktureinrichtungen.

Außerdem, als Grundlage für die bautechnische Beurteilung von drei exemplarisch ausgewählten Stadtbahnbauwerken der Ruhrbahn in Essen und der Bogestra in Herne und in Bochum, sind die Berechnungen der zu erwartenden maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente durchzuführen.

Für das vorliegende Gutachten wurden einige Teile und Berechnungsergebnisse der in der Zeit 04.2019 – 10.2020 vom Institut für Gebirgsmechanik der Polnischen Akademie der Wissenschaften (IMG PAN) erstellten wissenschaftlichen Studie zum Thema „Grubenwasseranstiegsbedingte Bodenbewegungen in der Wassergroßprovinz Lohberg bei einem Wasseranstieg bis – 600 m NHN“, in der ursprünglichen Fassung, übernommen. Diese Studie entstand im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft in Essen unter fachlicher Leitung von Prof. Sroka.

2. Kurze Darstellung des Untersuchungsraumes

Der Untersuchungsraum ist durch die zusammenhängenden Wasserprovinzen, die die Wassergroßprovinz Lohberg bilden, definiert (Abb. 1). Sie erstreckt sich ca. 60 km in Ost - West und ca. 35 km in Süd - Nord Richtung und umfasst ca. 1200 km².

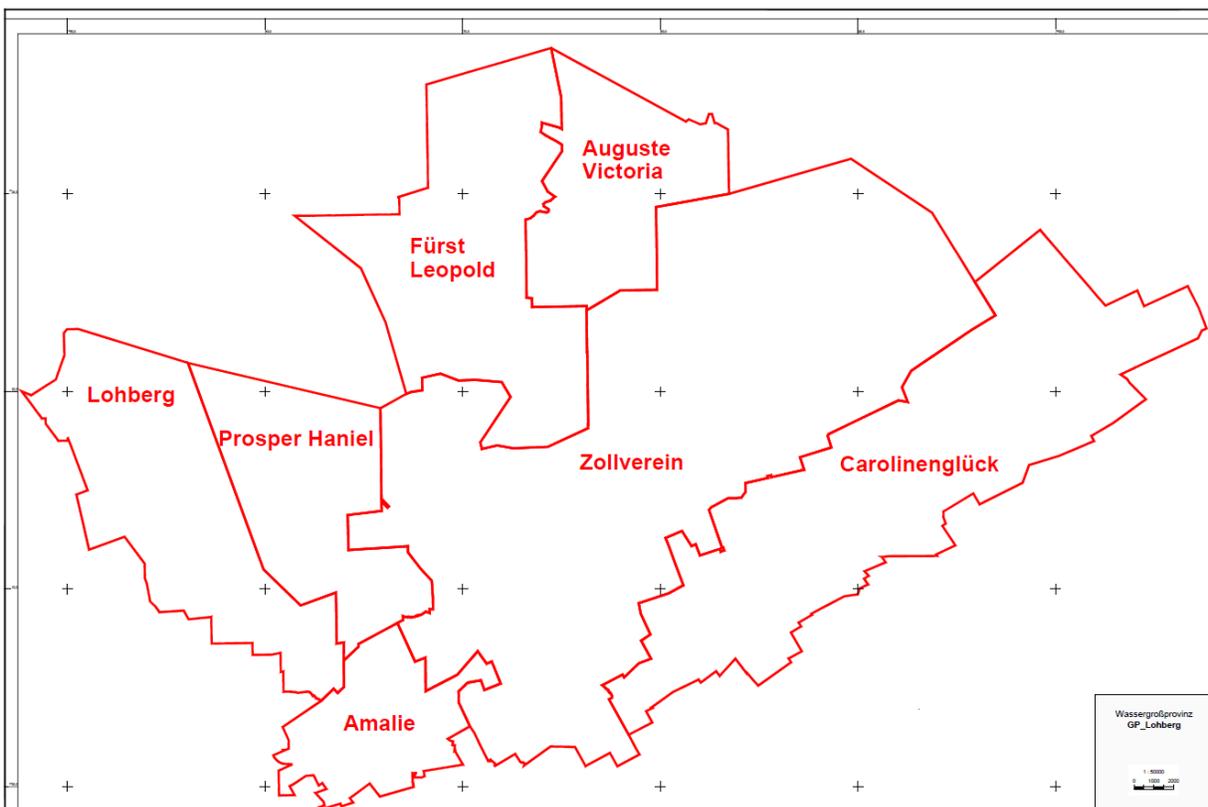


Abb. 1. Der Untersuchungsraum - die Wassergroßprovinz Lohberg.

Der Untersuchungsraum zeichnet sich durch eine sehr hohe Urbanisierungs-, Verkehrs- und Industriedichte aus, die einmalig in Europa ist (Abb. 2). Innerhalb des Untersuchungsraumes befinden sich u.a. mehrere Großstädte mit über 300 000 Einwohner, wie Essen und Bochum, sowie Städte mit über 100.000 Einwohner, wie Mülheim an der Ruhr, Oberhausen, Bottrop, Gelsenkirchen, Recklinghausen und Herne, mit der entsprechend komplexen öffentlichen Infrastruktur. Mehrere Eisenbahnlinien und Autobahnen sind sehr wichtige Teile des deutschen und europäischen Verkehrsnetzes. Hier sind speziell die Autobahnen A 2, A 40, A 42 und A 52 in die Ost - West Richtung und die A 3, A 31 und A 43 in die Süd - Nord Richtung hervorzuheben. Außerdem befinden sich im Untersuchungsraum mehrere Großindustrieanlagen, Raffinerien, Wasser- und Schifffahrtskanäle, lokale Flughäfen, Öl- und Gasfernleitungen sowie historische Bauwerke und Kulturgüter.

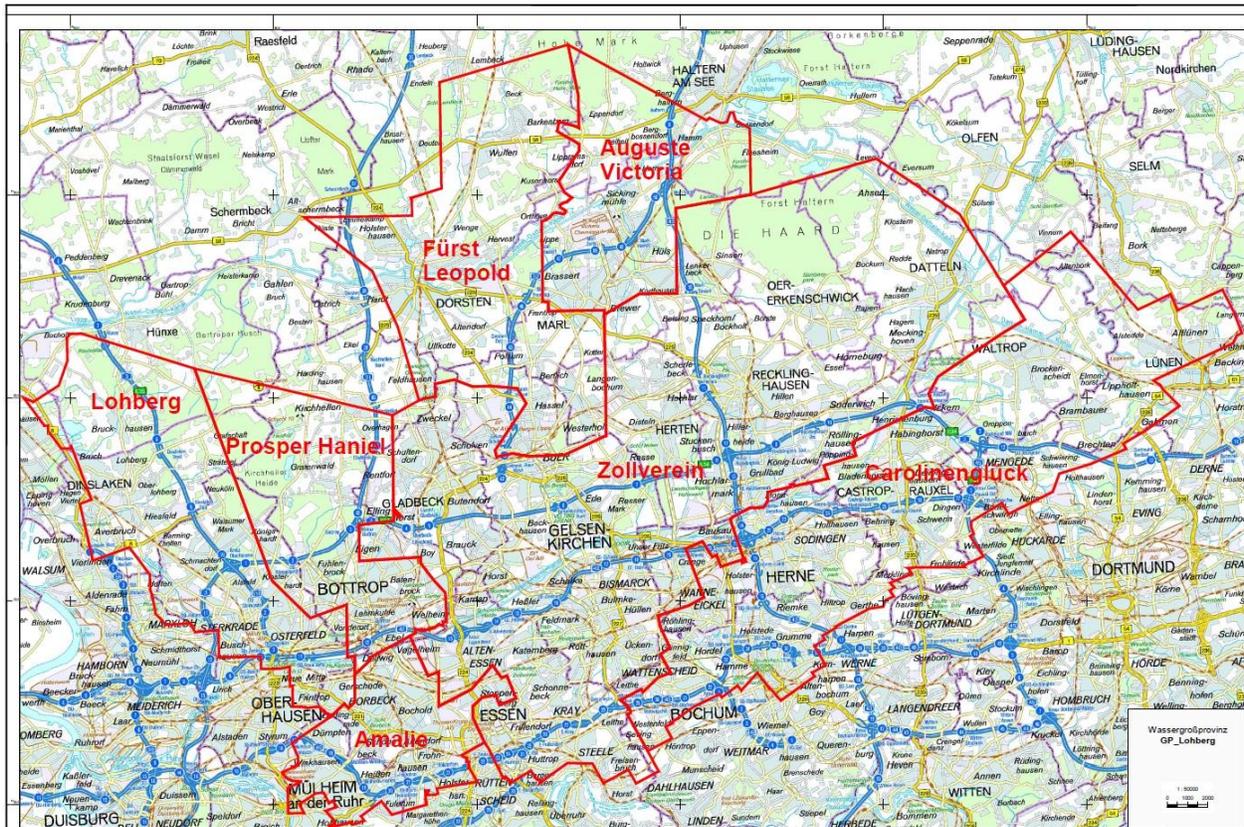


Abb. 2. Tagessituation und die Grenzen der einzelnen Wasserprovinzen.

(Kartengrundlage: © Regionalverband Ruhr, CC-BY 4.0)

Die Empfindlichkeit des Untersuchungsraumes gegenüber anthropogenen Bodenbewegungen ist somit sehr groß.

Die Bewertung der Schadensrelevanz erfordert zunächst die Prognose der grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen. Im nächsten Schritt erfolgt im Rahmen dieser wissenschaftlichen Studie eine auf dem Stand der Technik basierende, übergreifende Bewertung der Schadensrelevanz. So kann die Anzahl evtl. erforderlicher Einzelfallbetrachtungen auf das notwendige und sinnvolle Maß reduziert werden.

3. Verfahren zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen

Um die Schadensrelevanz der grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen zu bewerten, ist es notwendig, diese mittels mathematischer Modelle rechnerisch zu ermitteln. Als Stand der Technik stehen hier die Verfahren von Pöttgens (1985,1998), Fenk (2000) und Sroka (2005) zur Verfügung. Alle drei Verfahren haben identische theoretische Grundlagen zur Beschreibung der Hebungsursache, und zwar das elastische Auftriebsmodell des abbaubedingten rekonsolidierten Bruchkörpers. Infolge des Grubenwasseranstiegs kommt es im Bereich des dränbaren Bruchkörpers zur Erhöhung des Porendruckes, was zur vertikalen Ausdehnung des Bruchkörpers führt. Bei einer in die Tausende gehenden Anzahl abbaubedingter Bruchzonen, die im Grundriss mit den abgebauten Flözflächen etwa identisch sind, kann zurzeit nur das Verfahren von Sroka, unter Berücksichtigung der räumlichen Abbaufächenverteilung im Gebirge, die rechnerische Leistung zur komplexen Berechnung grubenwasserbedingten Bodenbewegungselemente erbringen. Dieses Verfahren wird im Nachfolgenden kurz beschrieben und erläutert.

Die Grundlage des Verfahrens zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen von Sroka bildet ein Ursache-Wirkung-Modell, das den markscheiderischen Verfahren zur Senkungsvorausberechnung in ihrer Struktur entspricht. Die Ursache bildet eine endliche Bruchzelle des durch den bergmännischen Eingriff entstandenen Bruchkörpers (Abb. 3). Als Folge des grubenwasseranstiegsbedingten Auftriebs wird die

Höhe und somit das Volumen der Bruchzelle vergrößert. Diese Volumenzunahme ist die Ursache der grubenwasseranstiegsbedingten Hebungen an der Tagesoberfläche.

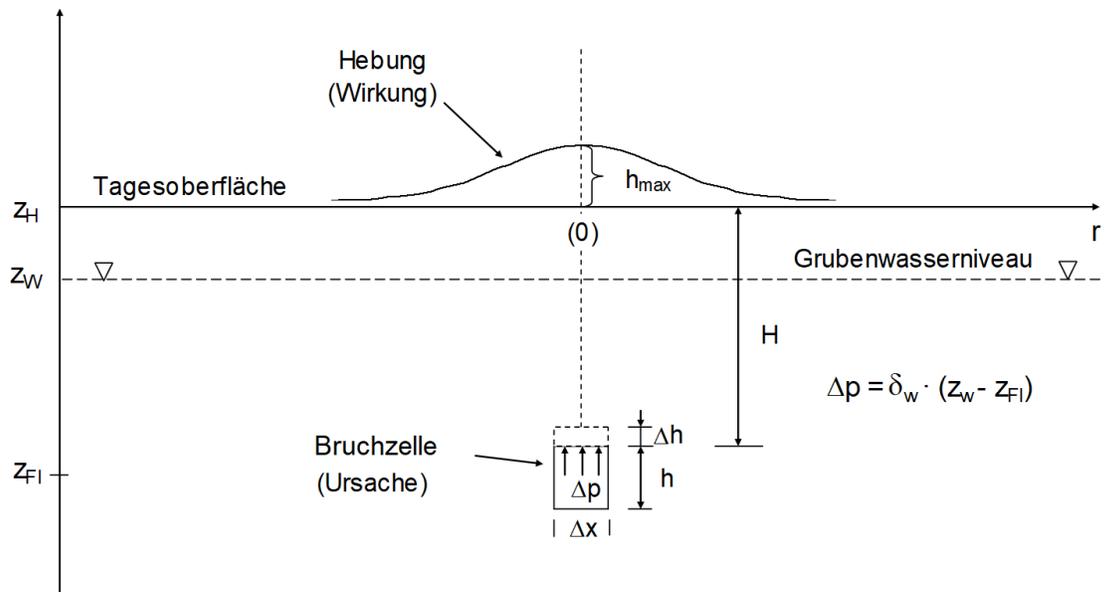


Abb. 3: Graphische Erläuterungen zum mathematischen Modell der grubenwasseranstiegsbedingten Hebungen (Sroka, 2005).

Die Verknüpfung der Ursache, d.h. der Volumenvergrößerung einer Bruchzelle, mit einer markscheiderischen Einfluss- bzw. Transformationsfunktion führt zu einer elementaren Hebungverteilung (Abb. 1). Durch Aufteilung des abbaubedingten Bruchkörpers, der im Grundriss den abgebauten Flächen gleich ist, in kleine, im Grundriss quadratische Bruchzellen, ist mittels der linearen Superposition die Berechnung der Hebung für jeden Punkt der Tagesoberfläche, bei beliebiger Abbaugeometrie im Raum, möglich. Die Hebungslösungen für eine einzelne Bruchzelle, mit den Einflussfunktionen von Knothe (1953), des Ruhrkohle-Verfahrens (1969) und von Geerstma (1973), wurden schon in mehreren Veröffentlichungen präsentiert (u.a. Sroka, 2005; Sroka und Preuße, 2009; Hager, 2010; Graowski et al., 2013 und Sroka et al., 2018). Im deutschen Steinkohlenbergbau wird seit ca.50 Jahren für die Vorausberechnung abbaubedingter Bodenbewegungselemente das so genannte Ruhrkohle-Verfahren erfolgreich angewandt. Aus diesem Grund wird in diesem Gutachten die Hebungslösung mit der

Einflussfunktion des Ruhrkohle-Verfahrens zur Vorausberechnung möglicher grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen an der Tagesoberfläche eingesetzt.

Für eine einzelne Bruchzelle ist dann die elementare Hebungverteilung an der Tagesoberfläche mit der Formel (1) zu beschreiben.

$$h(r, t) = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{\Delta V(t)}{R_w^2} \cdot \exp\left(-k \frac{r^2}{R_w^2}\right) \quad (1)$$

mit:

$$R_w = H \cdot \cot\gamma_w \quad (2)$$

$$\Delta V(t) = \Delta h(t) \cdot \Delta X^2 \quad (3)$$

$$\Delta h(t) = d_m \cdot \Delta p(t) \cdot h \quad (4)$$

$$\Delta p(t) = [z_w(t) - Z_{Fl}] \cdot \delta_w \quad (5)$$

$$h = \lambda \cdot M \quad (6)$$

wobei die Kurzbezeichnungen die nachfolgenden Bedeutungen haben:

k - Konstante des Ruhrkohle-Verfahrens ($k = -\ln 0.01$),

$\Delta V(t)$ - Volumenzunahme der Bruchzelle zum Zeitpunkt t ,

R_w - Einwirkungsradius bei Grubenwasseranstieg,

r - horizontale Entfernung zwischen dem Berechnungspunkt und der Bruchzelle,

h - Höhe der Bruchzelle,

γ_w - Grenzwinkel bei Grubenwasseranstieg bzw. Hebungsgrenzwinkel,

$\Delta h(t)$ - Zunahme der Bruchzellenhöhe zum Zeitpunkt t ,

ΔX - Seitenlänge der quadratischen Grundfläche einer Bruchzelle,

d_m - Dehnungskoeffizient,

$\Delta p(t)$ - Zunahme des Druckes in der Bruchzelle zum Zeitpunkt t ,

$z_w(t)$ - Höhenlage des Grubenwasserspiegels zum Zeitpunkt t ,

Z_{Fl} - Höhenlage der Bruchzelle,

- δ_w - Wasserwichte,
 h - Höhe der Bruchzelle,
 λ - relative Höhe der Bruchzelle (bezogen auf die gebaute Flözmächtigkeit),
 M - gebaute Flözmächtigkeit.

Die Lösung (1) ergibt die Möglichkeit, das Ruhrkohle-Verfahren zur Vorausberechnung abbaubedingter Bodenbewegungselemente, nach kleinen Korrekturen, im vollen Umfang zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen sowie bergschadensrelevanter Bodenbewegungselemente einzusetzen. Somit kann die Hebungsvorausberechnung mit etablierten Senkungsprogrammen durchgeführt werden, wobei statt des üblichen Absenkungsfaktors ein zeitlich spezifizierter Hebungsfaktor und statt des Senkungsgrenzwinkels ein Grenzwinkel für Grubenwasseranstieg bzw. Hebungsgrenzwinkel in die Berechnung eingeführt werden. Der Wert des zeitabhängigen Hebungsfaktors ist für jede einzelne Bruchzelle, bzw. für jede einzelne Flözfläche bei flacher Lagerung, mit Hilfe der Formel (7) festzulegen.

$$a_h(t) = d_m \cdot \lambda \cdot [z_w(t) - Z_{Fl}] \cdot \delta_w \quad (7)$$

Die zur Festlegung des Hebungsfaktors notwendigen Kennwerte d_m und λ sind von mehreren Autoren, auf der Basis der in Situ - Messungen mittels Parameteridentifikation, ermittelt und publiziert worden. Hier sind u.a. die Arbeiten von Pöttgens (1985, 1998), Goerke-Mallet (2000) sowie Sroka und Preuße (2008, 2009 und 2015) zu erwähnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in der nachfolgenden Tabelle (1) zusammengestellt.

Von den in der Tabelle (1) aufgeführten Untersuchungsergebnissen sind die des ehemaligen Bergwerkes Königsborn als repräsentativ für das Ruhrrevier anzusehen.

Die auf der Basis der Messungen in Situ identifizierten Werte des Dehnungskoeffizienten d_m sind stark abhängig von dem sehr unsicheren Wert der relativen Höhe λ der abbaubedingten Bruchzone. Um dieses zu vermeiden, haben Preuße & Sroka (2008) vorgeschlagen, einen integrierten, auf die Mächtigkeit des abgebauten Flözes bezogenen, Dehnungskoeffizienten μ einzuführen (Formel 8).

$$\mu = d_m \cdot \lambda \quad (8)$$

Daraus ergibt sich, dass die Werte des integrierten Dehnungskoeffizienten für die untersuchten Fälle zwischen $1,06 \cdot 10^{-2}$ und $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}$ liegen.

Tab. 1. Zusammenstellung der Kennwerte d_m , λ und γ_w für einige Steinkohlenreviere.

Steinkohlenrevier	d_m [m ² /MN]	λ	$d_m \cdot \lambda$ [m ² /MN]	γ_w [gon]
Südlimburger Revier (Pöttgens, 1985)	$0,350 \cdot 10^{-2}$	4	$1,40 \cdot 10^{-2}$	-
Ibbenbüren/ Westfeld (Goerke-Mallet, 2000)	$0,460 \cdot 10^{-2}$	3	$1,38 \cdot 10^{-2}$	-
Erkelenzer Revier/ Sophia Jacoba (Sroka & Preuße, 2008)	$0,265 \cdot 10^{-2}$	4	$1,06 \cdot 10^{-2}$	7-15 $\bar{\gamma}_w = 12$
Ruhrrevier/ Königsborn (Sroka & Preuße, 2015)	$0,364 \cdot 10^{-2}$	3	$1,092 \cdot 10^{-2}$	12

Die Werte des Dehnungskoeffizienten d_m und des Grenzwinkels γ_w sind für die Richtigkeit der Prognose grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen von entscheidender Bedeutung. Der Wert des Dehnungskoeffizienten entspricht dem Wert der vertikalen Deformation der rekonsolidierten Bruchzone bei Änderung des Porendruckes um eine Druckeinheit. Bei Annahme, dass die rekonsolidierte Bruchzone ein lineares elastisches und isotropes Medium von Biot ist, besteht die Möglichkeit, die empirisch gewonnenen Werte des Dehnungskoeffizienten zu überprüfen.

Vor dem Grubenwasseranstieg trägt die Gesteinsmatrix der rekonsolidierten Bruchzone die gesamte Gebirgslast. Der Grubenwasseranstieg führt zur Erhöhung des

Porendruckes in der Bruchzone und damit zur Entlastung der Gesteinsmatrix. Die mathematische Beschreibung dieses Sachverhaltes ist durch das Effektivdruckgesetz gegeben:

$$\sigma_{\mu} = \sigma_G - \alpha \cdot P_0 \quad (9)$$

mit:

σ_{μ} - Überlagerungsdruck,

σ_G - Gebirgsdruck, Belastung der Gesteinsmatrix,

P_0 - Porendruck und

α - sog. Biot-Koeffizient.

Durch den Biot-Koeffizienten wird im Allgemeinen ausgedrückt, dass der durch den Porendruck getragene Anteil des Überlagerungsdruckes nicht nur von der Höhe des Porendruckes, sondern auch von der Porosität und der Porengeometrie abhängt. In der Bruchzone tritt, bei gleichmassiger Erhöhung des Porendruckes, eine Divergenz, d.h. eine Vergrößerung der Bruchzonenmächtigkeit in vertikaler Richtung auf. Bei flacher Lagerung, homogener und isotroper Eigenschaften des Bruchkörpers sowie seitlicher Fixierung, ist davon auszugehen, dass in horizontaler Richtung keine Verschiebungen in der Bruchzone auftreten. Die horizontalen Deformationen in der Bruchzone sind folglich gleich Null. Durch die Erhöhung des Porendruckes infolge des Grubenwasseranstiegs um den Betrag Δp erfährt die Bruchzone eine vertikale Ausdehnung um die Grösse:

$$\Delta h(\Delta p) = \varepsilon_z(\Delta p) \cdot h \quad (10)$$

mit:

$$\varepsilon_z(\Delta p) = \frac{\alpha \cdot \Delta p}{E_s}$$

Der Vergleich dieser Formeln mit der Formel (4) ergibt:

$$d_m = \frac{\alpha}{E_s} \quad (11)$$

mit: E_s - Steifemodul

Der Wert des Biot-Koeffizienten α liegt gewöhnlich zwischen 0 und 1. Nach Untersuchungen von Gustkiewicz (1989) und Fabre & Gustkiewicz (1997) kann für Sandstein mit einer Porosität $\eta < 20\%$ ($\eta < 0.20$) der Wert des Biot-Koeffizienten mittels der Regressionsformel (12) bestimmt werden.

$$\alpha(\eta) = 1 - \exp\left(-3,5934 \cdot \tan\left(\eta \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (12)$$

Die mittlere „dränbare“ Porosität der rekonsolidierten Bruchzone ist mittels des Absenkungsfaktors a zu bestimmen. Für den Bruchbau im Ruhrrevier kann der Wert des Absenkungsfaktors mit der Regressionsformel (13) bestimmt werden.

$$a(H) = 1 - \exp(-\xi \cdot H) \quad (13)$$

mit: $\xi = 0,248 \cdot 10^{-2} \pm 0,032 \cdot 10^{-2} [m^{-1}]$

für: $600m \leq H \leq 1250m$.

Für eine mittlere Teufe von 900m bekommt man einen Wert des Absenkungsfaktors von $a = 0,8927$, d.h. ca. 0,9. Dieser Wert entspricht sehr gut den praktischen Erfahrungen. Daraus resultiert das ca. 10% (d.h. 0,1) des abgebauten Volumens als Porenvolumen in der abbaubedingten Bruchzone verbleiben. Die mittlere Porosität der rekonsolidierten Bruchzone beträgt dann:

$$\bar{\eta} = \frac{1-a}{\eta+1-a} \cong \frac{0,1}{\eta+0,1} \quad (14)$$

Nach den Untersuchungen von Fenk & Tzscharschuh (2007) liegen die Werte des Steifemoduls E_s der über dem Abbau liegenden zerrütteten Zone zwischen 46,6 und 56,0 MN/m². Zhao und Konietzky (2021) geben einen Wert von 45,9 an.

Für die Angaben:

- Absenkungsfaktor: $a = 0,9$
- Steifemodell: $E_s = 50 \text{ MN/m}^2$ und
- relative Höhe der Bruchzone: $\lambda_1 = 3$ und $\lambda_2 = 4$

sind die theoretisch berechneten Werte des Dehnungskoeffizienten wie folgt:

$$d_{m1} = 0,333 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN} \quad \text{und} \quad d_{m2} = 0,257 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}.$$

Die Werte des Integrierten Dehnungskoeffizienten betragen dann:

$$\mu_1 = 1,000 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN} \quad \text{und} \quad \mu_2 = 1,029 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}.$$

Diese theoretisch berechneten Werte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den auf der Basis der in Situ - Messungen mittels Parameteridentifizierung gewonnenen Werten.

Der Winkel γ_w resultiert aus der horizontalen Ausdehnung der Hebungserscheinungen, bezogen auf die äußeren Abbaugrenzen. Der Wert $\gamma_w = 12 \text{ gon}$ wurde auf der Basis von Hebungsmessungen in Situ mittels Parameteridentifizierung gewonnen (Tab. 1).

Die Wahrscheinlichkeit grubenwasseranstiegsbedingter Schäden an den Objekten der Tagesoberfläche ist nicht direkt von der Hebung, sondern von den zeiträumlichen Gradienten der vertikalen und der horizontalen Bodenbewegung abhängig. Die horizontalen Bodenbewegungselemente werden gemäß der Hypothese von Aviershin (1949) berechnet. Die Hypothese formuliert eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Vektor der horizontalen Verschiebung \mathbf{U} und dem Schiefelagevektor \mathbf{T} ,

$$\mathbf{U} = - \mathbf{B} \cdot \mathbf{T} \quad (15)$$

mit \mathbf{B} als Proportionalitätsfaktor.

Die Beziehung (15) impliziert eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Tensor der horizontalen Deformation $\boldsymbol{\varepsilon}$ und dem Tensor der vertikalen Krümmung \mathbf{K} .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = - \mathbf{B} \cdot \mathbf{K} \quad (16)$$

Für die Berechnung der grubenwasseranstiegsbedingten horizontalen Bodenbewegungselemente wird, in Anlehnung an die Vorausberechnung abbauinduzierter horizontaler Bodenbewegungen, die Abhängigkeit (17) angenommen.

$$B_w = \frac{R_w}{\sqrt{2k}} = \frac{1}{3} R_w \quad (17)$$

Die Berechnungen der grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen wurden mit Hilfe der von IMG PAN in Krakau entwickelten Software durchgeführt.

4. Berechnungsgrundlagen / Berechnungsergebnisse

Das Grubenwasserkonzept der RAG Aktiengesellschaft sieht den Grubenwasseranstieg im Bereich der Wassergroßprovinz Lohberg bis zu einem Endniveau von - 600 m NHN vor. Die Grundlage der Abschätzung der infolge des Grubenwasseranstiegs zu erwarteten Bodenbewegungen bildet ein von Sroka (2005) konzipiertes mathematisches Modell. Zur Berechnung wurden die nachfolgenden Modellkennwerte angenommen:

- Dehnungskoeffizient: $d_m = 0,364 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}$,
- grubenwasseranstiegsrelevante relative Bruchkörpermächtigkeit: $\lambda = 3$,
- Grenzwinkel bei Grubenwasseranstieg: $\gamma_w = 12 \text{ gon}$.

Der Wert des integrierten Dehnungskoeffizienten beträgt somit $1,092 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}$. Die abbaubedingten Bruchkörper wurden auf der Grundlage der im Bereich der einzelnen Wasserprovinzen durchgeführten Abbaue definiert.

Die zur Vorausberechnung notwendigen Abbaudaten wurden von der RAG Aktiengesellschaft zur Verfügung gestellt. Die Berechnung wurde mit allen vorliegenden Abbauflächen vorgenommen, inklusive der teilweise bereits bis heute abgesoffenen Bereiche im östlichen Teil der Wasserprovinzen Zollverein und Carolinenglück.

Die Anzahl der einwirkenden Bauhöhen beim Grubenwasseranstieg bis zum geplanten Endniveau von - 600 m NHN beträgt 12.275.

Die prognostizierte Hebungverteilung im Bereich der Wassergroßprovinz Lohberg ist, für den Grubenwasseranstieg bis zum Niveau von - 600 m NHN, in der Abbildung (4) dargestellt.

In der Abbildung (4) sind mehrere lokale Hebungsschwerpunkte deutlich zu erkennen. Diese sind auf die einzelnen Wasserprovinzen verteilt und stehen mit dem intensiven und konzentrierten Abbau einiger ehemaligen Steinkohlenbergwerke, wie z.B. Lohberg und Auguste Victoria, direkt in Verbindung (Abb. 5).

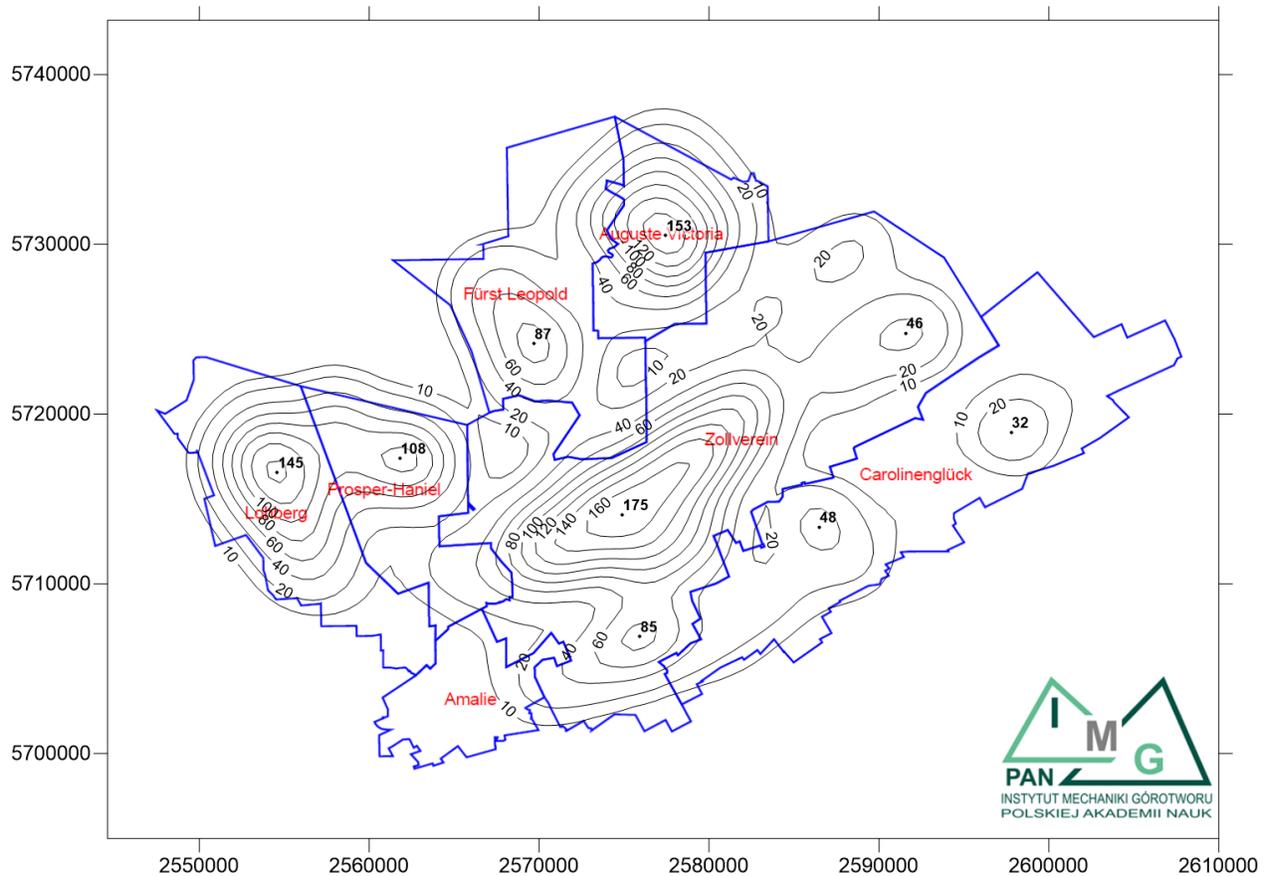


Abb. 4. Die prognostizierte Hebungverteilung im Bereich der Wassergrößprovinz Lohberg beim Grubenwasseranstieg bis zum Niveau von – 600 m NHN (Studie IMG PAN, 2020).

Im Vergleich zum restlichen Untersuchungsraum konnte die RAG Aktiengesellschaft für die Wasserprovinz Amalie nur begrenzt rechneraugliche Daten zur Verfügung stellen. Aufgrund der Tatsache, dass im westlichen Teil der Wasserprovinz Amalie der Grubenwasserstand bereits heute oberhalb von - 600 m NHN ansteht, geht im restlichen Bereich nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Abbaufächen in die Berechnung ein, so dass sich für die Wasserprovinz Amalie kein eigener Hebungsschwerpunkt ausbildet.

In der nachfolgenden Tabelle (2) sind die berechneten maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente, mit der Zuordnung zu der jeweiligen Wasserprovinz, zusammengestellt.

Tab. 2. Prognostizierte maximale Werte der bergschadensrelevanter Bodenbewegungselemente beim Grubenwasseranstieg bis zum Endniveau von - 600 m NHN (Studie IMG PAN, 2020).

Wasserprovinz	max. Werte			
	h [mm]	T [mm/m]	ε^- [mm/m]	ε^+ [mm/m]
Lohberg	145	0,050	- 0,030	0,046
Prosper- Haniel	108	0,038	- 0,023	0,034
Zollverein	175	0,060	- 0,037	0,055
Carolinenglück	48	0,017	- 0,010	0,015
Fürst Leopold	87	0,030	- 0,018	0,028
Auguste- Victoria	153	0,053	- 0,032	0,048

Die oben präsentierten Berechnungsergebnisse wurden der wissenschaftlichen Studie des Institutes für Gebirgsmechanik der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Krakau (IMG PAN) entnommen. Die nach Beendigung der Studie vorgenommene Änderung des Endniveaus des Grubenwasseranstiegs in der Wasserprovinz Carolinenglück von – 600 m NHN auf – 550 m NHN führt zu geringfügigen Veränderungen der maximalen Werte bergschadensrelevanter Bodenbewegungselemente im Vergleich zu Berechnungen in der Studie (s. Tab. 3).

Im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft wurden, unter Berücksichtigung der aktuellen Grubenwasseranstiegsdaten, Berechnungen für drei Verkehrsinfrastrukturbauwerke im Hebungsrandbereich durchgeführt. Es handelt sich um Abschnitte der Stadtbahnanlagen der Ruhrbahn in Essen und der Bogestra in Herne und Bochum. Außerdem wurden exemplarisch Berechnungen für das Weltkulturerbe Zeche Zollverein in Essen realisiert. Die Berechnungsergebnisse der maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente für diese Objekte sind in der Tabelle (4) und in den Anlagen 8.2 bis 8.5 dargestellt.

Tab. 3. Vergleich zwischen den aktuellen Berechnungsergebnissen und Ergebnissen der Studie des IMG PAN (2020).

	Ergebnisse Studie, 2020	Ergebnisse aktuelle Berechnungen
max. Hebung [mm]	175,4	180,2
max. Schiefelage [mm/m]	0,060	0,040
max. Pressung [mm/m]	-0,037	-0,037
max. Zerrung [mm/m]	0,055	0,057

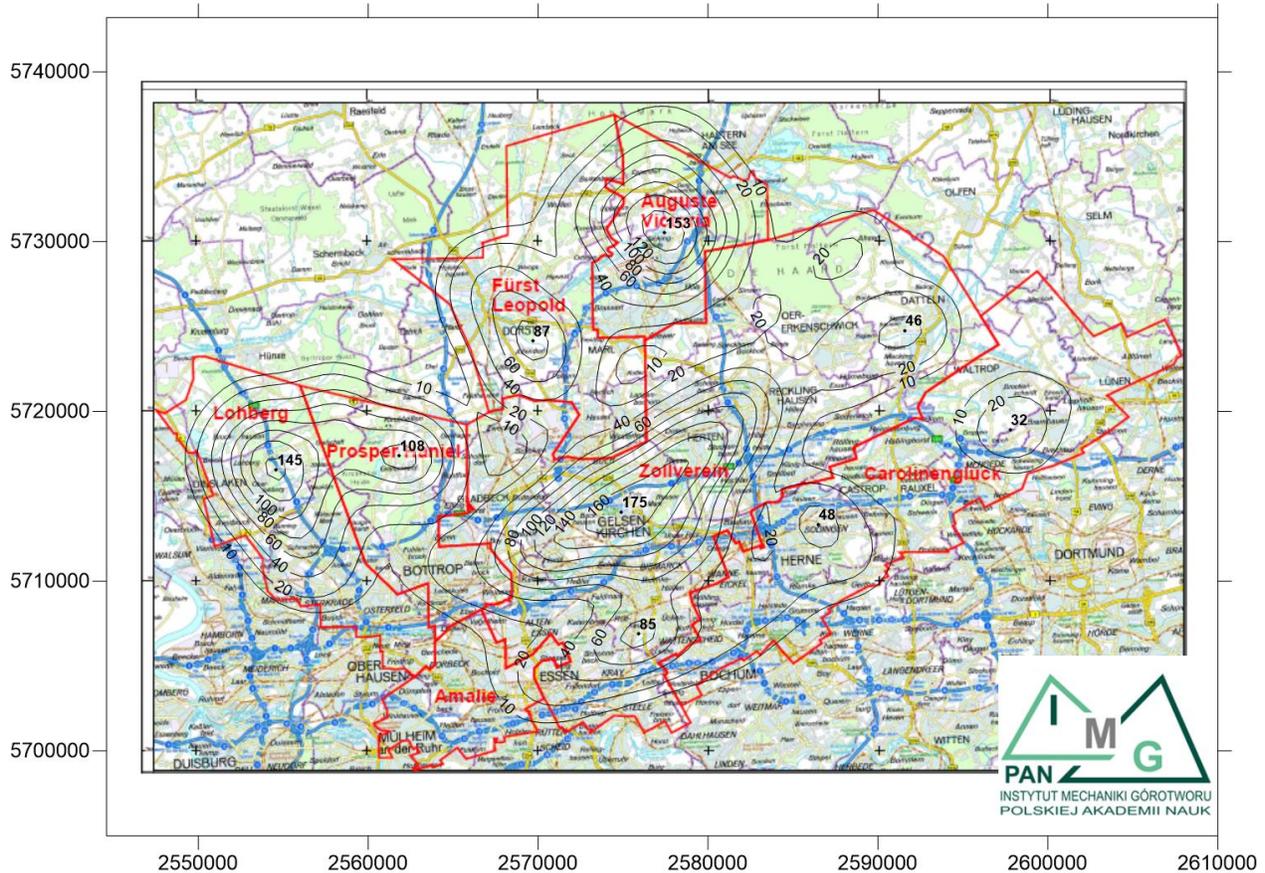


Abb. 6. Die Hebungsverteilung für das Anstiegsendniveau von - 600 m NNH (Studie IMG PAN, 2020).

(Kartengrundlage: © Regionalverband Ruhr, CC-BY 4.0)

Tab. 4. Die prognostizierten maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente für die festgelegten Sonderobjekte.

Objekt	Schieflage T [mm/m]	Pressung ε^- [mm/m]	Zerrung ε^+ [mm/m]
Stadtbahn Essen	0,01	-0,007	0,008
Stadtbahn Herne	0,02	-0,012	0,012
Stadtbahn Bochum	0,01	-0,006	0,017
Welterbe Zollverein	0,02	-0,011	0,016

5. Bewertung der Schadensrelevanz

5.1 Stetige Bodenbewegungen

Die grundwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen verlaufen invers zu den Abbaubedingten. Daraus resultiert, dass die Erddrucksituation für die Objekte der Tagesoberfläche in den Zentren der früheren schädlichen Abbaueinwirkungen, infolge des Grubenwasseranstiegs günstiger wird, d.h. sie wird sich zumindest nicht verschlechtern. Im Hinblick auf eine mögliche Schadensentwicklung an der Tagesoberfläche sind die relative horizontale Längenänderung (Pressung und Zerrung) und die Schieflage relevant. Die hier prognostizierten grubenwasseranstiegsbedingten maximalen Werte der schadensrelevanten Bodenbewegungselemente sind im Vergleich zu den abbaubedingten, auch schon beim Abbau einer einzelnen Bauhöhe, um mindestens eine, wenn nicht zwei Potenzen kleiner. Diese Werte stellen, nach langjährigen praktischen Erfahrungen und nach theoretischen Erkenntnissen, keine schadensrelevante Bedeutung für die Objekte der Tagesoberfläche dar. In der Tabelle (5) sind die absoluten Grenzwerte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente nach Literaturerkenntnissen zusammengestellt. Bei Einhaltung dieser Werte sind Bergschäden grundsätzlich auszuschließen, d.h. für den

Bergbautreibenden besteht grundsätzlich kein Handlungsbedarf in Bezug auf Vorsorge- oder Sicherungsmaßnahmen.

Tab. 5. Literaturerkenntnisse zu den absoluten Grenzwerten der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente (Preuße und Sroka, 2004; Sroka, 2011).

Name	Grenzwert [mm/m]
Pöttgens (1985)	$\epsilon_{Gr} = 0,25$
Sroka, Grün (1993)	$\epsilon_{Gr} = 0,25$
Schmidt-Schleicher (1998)	$\epsilon_{Gr} = 0,10$
Staege, Pohl (2000)	$\epsilon_{Gr} = 0,20$
Kwiatek, et al. (2000)	$\epsilon_{Gr} = 0,30$
	$T_{Gr} = 0,50$

Die für drei Stadtbahnanlagen in Essen, Herne und Bochum prognostizierten maximalen Zerrungs- und Pressungswerte (Tab. 4) sind so gering, dass sie für diese Infrastrukturobjekte einen völlig unkritischen Vorgang darstellen. Sie sind durchaus vergleichbar mit der Längsdehnung einiger Baustoffe, d.h. auch von Bauobjekten, bei Änderung der Temperatur um 1°C (Tab. 6).

Bei der Bewertung der Bergschadensrelevanz der für die gesamte Wassergroßprovinz Lohberg berechneten maximalen Werte der relativen horizontalen Längenänderungen ist im Hinblick auf die Versorgungs- und Entsorgungsleitungen sowie die Fernleitungen auf die Dissertation von Spielberg hinzuweisen (Spielberg, 1999).

Tab. 6. Längenausdehnungskoeffizienten der typischen Baustoffe und die daraus resultierenden Längenausdehnungen bei Temperaturänderung um 1°C.

Baustoff	α_T [1/°C]	ε [mm/m/°C]
Mauerwerk		
- Bruchstein	0,0000120	0,0120
- Mauerziegel	0,0000050	0,0050
Fensterglas	0,0000100	0,0100
Stahl	0,0000117	0,0117
Stahlbeton	0,0000120	0,0120
Eisen	0,0000123	0,0123
Grauguss	0,0000104	0,0104
Polyvinylchlorid	0,0000800	0,0800

In dieser Dissertation werden für unterschiedliche Rohrwerkstoffe und ihre Rohrleitungsverbindungen Anhaltswerte für die zulässige axiale Längenänderung genannt, bei deren Einhaltung in der Regel keine Rohrleitungsschäden entstehen (Tab.7). Diese Werte resultieren u.a. aus der langjährigen Praxis von Spielberg, bei der Bearbeitung von Rohrleitungen unter Bergbaueinfluss.

Danach ist festzustellen, dass die infolge des Grubenwasseranstiegs zu erwartenden maximalen Zerrungs- und Pressungswerte mindestens um eine Potenz, d.h. um das Zehnfache, kleiner sind als der Anhaltswert für den empfindlichsten Rohrleitungswerkstoff Asbestzement.

Tab. 7. Rohrwerkstoffabhängige zulässige axiale Längenänderungswerte (Spielberg, 1999).

Rohrleitungswerkstoff	Rohrverbindung	Anhaltswerte für die zulässige axiale Längenänderung in mm/m
Asbestzement	Muffenverbindung	0,6 mm/m
Grauguss	Muffenverbindung	1 mm/m
duktiler Guss	Muffenverbindung längskraftschlüssige Verbindung	2 – 5 mm/m 2 mm/m
Stahl	Muffenverbindung längskraftschlüssige Verbindung	1 – 2 mm/m 1 mm/m
Polyvinylchlorid	Muffenverbindung	3 – 5 mm/m
Polyethylen	längskraftschlüssige Verbindung	> 5 mm/m

Im Hinblick auf das Verhalten von Baudenkmalern und historischer Bauwerke unter Bergbaueinfluss hat Schmidt-Schleicher (1998), im Rahmen einer gemeinsamen Tagung des Sonderforschungsbereiches 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ der Universität Karlsruhe und der damaligen Ruhrkohle AG, die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens zum Thema „Vorschlag zur Erfassung und Bewertung historischer Bauwerke in Bergsenkungsgebieten“ vorgestellt und im Arbeitsheft des SFB 315 publiziert. Dieses Forschungsvorhaben hatte u.a. die Ausarbeitung praktischer Kriterien zur Erfassung und Bewertung von Baudenkmalern hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber abbauinduzierten Einwirkungen, im Rahmen der Erstellung von Umweltverträglichkeitsstudien für geplante bergbauliche Vorhaben zum Ziel. Für den von Schmidt-Schleicher angegebener Wert von $|\varepsilon| < 0,1$ mm/m besteht dann für die betroffenen Baudenkmalern sowohl im Rahmen von Umweltverträglichkeitsstudien als auch während des Abbaus, kein Handlungsbedarf. Dieser Wert wurde später, auf der Grundlage praktischer

Erfahrungen, auf 0,2 mm/m erhöht (Staege und Pohl, 2000; Pohl, 2002). Für die Einwirkungen $|\varepsilon| < 0,5$ mm/m besteht danach keine Besorgnis hinsichtlich der Objekt-sicherheit.

Die vorausberechneten maximalen Werte der grubenwasseranstiegsbedingten stetigen schadensrelevanten Bodenbewegungselemente für der gesamten Einwirkungsbereich der Wassergroßprovinz Lohberg unterschreiten deutlich die in der Fachwelt anerkannten absoluten Grenzwerte, bei deren Überschreitung es zu Schäden an historischen Bauwerken der Tagesoberfläche kommen könnte. Negative Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf diese Objekte sind somit gänzlich auszuschließen.

5.2 Unstetige Bodenbewegungen

Das Interesse der Öffentlichkeit bei einem Grubenwasseranstieg ist weniger auf die stetigen, sondern vielmehr auf mögliche unstetige Bodenbewegungen ausgerichtet. Dies wurde durch die Vorkommnisse verursacht, die bei dem Grubenwasseranstieg im Bereich des Steinkohlenbergwerkes Sophia – Jacoba im Erkelenzer Revier aufgetreten sind (u.a. Baglikow, 2003). Die Wasserhaltung wurde im Jahre 1997 eingestellt, fast zeitgleich mit der Schließung des Bergwerks. Während des Grubenwasseranstiegs kam es in den Jahren 1999 – 2004 zur Aktivierung der Ausbisse des Meinweg- und des Rurrand-Sprungs. Beide Sprünge bilden die westliche Grenze des sogenannten Wassenberger Horstes in dem sich die Baufelder des Bergwerkes Sophia - Jacoba befinden. Es entstand eine durchgehende Schadenslinie mit einer Gesamtlänge von ca. 9 km (Abb. 7). Es handelte sich um Bodenrisse mit lokal deutlichen Vertikalversatz von mehr als 10 cm. Bis 2003 wurden an ca. 110 Objekten Schäden registriert, mit 9 Totalschäden (Heitfeld et al., 2004).

Die Erfahrungen über die Bildung unstetiger Bodenbewegungen in der Zeit des aktiven Abbaus zeigen eindeutig eine Verbindung zu den tektonischen Strukturen. Diese stellen im Steinkohlenbergbau in der Regel die Abbaugrenzen dar. Durch das Heranbauen mehrerer Flöze an diese natürliche Grenze kommt es sehr oft zur Konzentration zerrender Deformationen, die zur Rissbildungen und Erdstufen führen können. Auf der Grundlage der in Situ – Untersuchungen hat Grün (1995) ein Verfahren entwickelt, das die Eingrenzung möglicher Unstetigkeitsbereiche beim aktiven Abbau ermöglicht. Die Analyse über

1000 erfassten un stetigen Bodenbewegungen führte zu einem Grenzwert der summarischen horizontalen Zerrung von 2 mm/m. Ähnliche Ergebnisse hat Kowalski (2007) für den Oberschlesischen Steinkohlenbergbau präsentiert. Da die grubenwasseransteigsbedingten Bodenbewegungselemente um eine bis zwei Potenzen kleiner sowie invers zu den abbaubedingten sind, ist deren alleiniger Einfluss auf die Entstehung der Schadenslinie beim Grubenwasseranstieg im Bereich des Bergwerkes Sophia – Jacoba praktisch auszuschließen. Außerdem ist zu bemerken, dass die Schadenslinie auch dort weitergeht, wo in der Vergangenheit keine Abbauaktivitäten des Bergwerkes direkt eingewirkt haben.

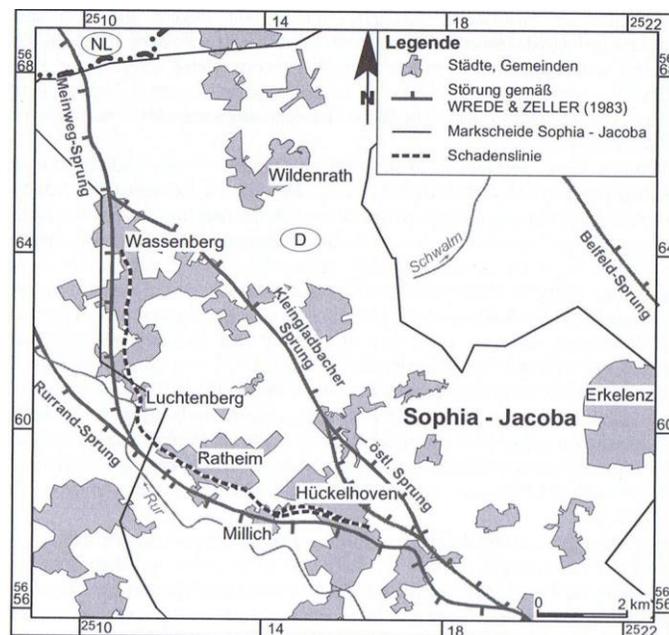


Abb. 7. Der Verlauf der Schadenslinie am Westrand des Wassenberger Horstes (Heitfeld et al., 2004).

Für die Aktivierung beider Sprünge und die Entstehung der Schadenslinie ist, nach Ansicht des Gutachters, deren östliche Randlage im Bereich der erdbebenaktiven Niederrheinischen Bucht wesentlich (u.a. Sroka et al., 2017). Die Niederrheinische Bucht ist eine der aktivsten Erdbebengebiete in Europa. Bei dem Erdbeben von Roermond im Jahre 1992 entstanden entlang der Maas und der Rur Spalten und Erdrutsche, an einigen Stellen traten Sandfontänen aus. Das Erdbeben von Roermond geht auf die Bewegung des Peelrand-Sprunges zurück, der nordöstlichen Begrenzung des

Rurgrabens, an dem die Südwestscholle um ca. einen halben Meter absank (Quelle: Wikipedia – Erdbeben von Roermond 1992). Bei der bis heute andauernden Dehnung der Erdkruste in der Niederrheinischen Bucht stellen die Ränder der einzelnen Bruchstellen, d.h. die von Nordwest nach Südost verlaufenden tektonischen Verwerfungen, sehr tiefe und bewegungsmäßig labile Trennfugen in der Erdkruste dar, die dann eine Voraussetzung für die Entstehung der un stetigen vertikalen und horizontalen Bodenbewegungen bilden. Aus diesem Grund ist der Rurrand-Sprung an vielen Stellen als Erdstufe in der Topografie der Niederrheinischen Bucht sichtbar. Der Grubenwasseranstieg im Bergwerk Sophia - Jacoba hat zum Spannungsabbau entlang der Trennflächen des Meinweg-Sprunges und des Rurrand-Sprunges geführt und stellt somit eine indirekte Ursache für deren un stetige Aktivierung und die Entstehung der Schadenlinie dar. Damit ist der Fall „Wassenberg“ einmalig und auf das Ruhrrevier nicht übertragbar.

Auf die Möglichkeit un stetiger Bodenbewegungen hat als erster Pöttgens im Jahre 1985 hingewiesen. Auf der Basis der in Situ – Höhenmessungen im Südlimburger Revier hat Pöttgens (1985, 1998) nur „gewisse Trends“ im Hebungsverlauf im Bereich der Ausbisslinien tektonischer Störungen erkannt, die zu lokal erhöhten Bodenbewegungsgradienten führen können. Inhaltlich ähnliche Ergebnisse haben auch Heitfeld et al. im Jahre 2017 publiziert. Die dort präsentierte Analyse der Hebungen am Heerlerheider Sprung im Südlimburger Revier ergab, dass diese sich über die begrenzende Störungszone „hinweg weitgehend kontinuierlich entwickelt haben, ohne einen signifikanten Un stetigkeitsbereich auszubilden“ (Zitatende).

Die beobachteten Bodenbewegungen bei Grubenwasseranstieg im Westfeld des Bergwerks Ibbenbüren (Goerke – Mallet, 2000) und des Bergwerks Königsborn (Preuße und Sroka, 2015), bestätigen, dass diese bei scheinbar vergleichbaren geologischen und tektonischen Verhältnissen nicht zu einer Aktivierung von Tektonik und daher auch zu keinen un stetigen Bodenreaktionen geführt haben.

Diese oben beschriebenen Erkenntnisse betreffen Auswirkungen der Grubenwasseranstiege fast bis zum Niveau der Tagesoberfläche. Der im Rahmen des Grubenwasserkonzeptes der RAG Aktiengesellschaft geplante Anstieg bis zum Niveau von - 600m NHN wird dann zu wesentlich geringeren Auswirkungen führen und schließt die Möglichkeit der Entstehung un stetiger Bodenreaktionen praktisch aus.

6. Zusammenfassung / Fazit

Die infolge des Grubenwasseranstiegs in den Wasserprovinzen Lohberg, Prosper-Haniel, Amalie, Zollverein, Carolinenglück, Fürst Leopold und Auguste Victoria prognostizierten maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente sind wie folgt:

max. Hebung:	$h_{\max} = 180 \text{ mm}$
max. Schiefelage:	$T_{\max} = 0.060 \text{ mm/m}$
max. Pressung:	$\epsilon_{\max} = - 0,037 \text{ mm/m}$
max. Zerrung:	$\epsilon_{\max} = +0.057 \text{ mm/m}$

In Anbetracht dieser Werte und der durchgeführten Untersuchungen ist eindeutig festzustellen, dass die infolge des im Rahmen des Grubenwasserkonzeptes der RAG Aktiengesellschaft geplanten Grubenwasseranstiegs zu erwartenden stetigen Bodenbewegungen mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit keine Bergschadensrelevanz für die Objekte der Tagesoberfläche und die untertägigen Verkehrsinfrastruktureinrichtungen, hier speziell die Tunnelbauwerke der Stadtbahnen, haben werden. Einschränkungen des Betriebs oder der Gebrauchstauglichkeit sind damit gänzlich auszuschließen. Somit ist die Sicherheit und Ordnung des Stadtbahnbetriebes im Untersuchungsgebiet von dem geplanten Anstieg des Grubenwassers nicht betroffen.

Aufgrund der bis heute vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnisse sind un stetige Bodenbewegungen in Bereichen der ausgehenden tektonischen Störungen und der früher entstandenen abbaubedingten Riss- und Stufenbildungen nicht zu erwarten.

Damit sind zusätzliche, in Verbindung mit dem Grubenwasseranstieg stehende Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des ordnungsgemäßen Betriebs der einzelnen Infrastruktureinrichtungen nicht notwendig.

Es ist jedoch grundsätzlich sinnvoll, den Prozess des Grubenwasseranstiegs in der Wassergroßprovinz Lohberg mittels eines periodischen Hebungsmonitorings zu überwachen.

Dadurch ist eine ausreichend genaue Validierung der vorausberechneten Parameter möglich.

7. Literaturverzeichnis

Aviershin, S. G. (1949). Mining subsidence engineering. (in Russisch). Handbook, Ugle-tiechizdat, Moscow, Russia.

Baglikow, V. (2003): Bergschäden nach Beendigung der Grubenwasserhaltung im tiefen Bergbau. Markscheidewesen 110 (2003), Nr. 2, S. 45 – 49.

Baglikow, V. (2006): Schadensentwicklung im Erkelenzer Steinkohlenrevier nach Beendigung der Grubenwasserhaltung. 8. Aachener Altlasten- und Bergschadenkundliches Kolloquium Wasseranstieg im Steinkohlenbergbau, Heft 8 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff und Umwelttechnik.

Baglikow, V. (2010): Schadensrelevante Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs im Erkelenzer Steinkohlenrevier. Dissertationsschrift, Schriftenreihe Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau an der Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Herausgeber: Univ. Prof. Dr.–Ing. A. Preusse, Heft 1-2000.

Blachowski, J., Cacoń, S. und Milczarek, W. (2009): Analysis of post-mining ground deformations caused by underground coal extractions in complicated geological conditions. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 6, No. 3 (155), S. 351 – 357.

Drebenstedt, C., Ortuta, J. und Sroka, A. (2007): Analyse vertikaler Bodenbewegungen infolge des Grubenwasserwiederanstiegs im Lockergestein. 8. Geokinematischer Tag, Freiberg 2007, Tagungsband S. 54 – 68.

Dudek, M., Tajduś, K., Misa, R. und Sroka, A. (2020): Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines – A case study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 132 (2020) 104377.

Fabre, D. und Gustkiewicz, J. (1997): Poroelastic Properties of Limestones and Sandstones under Hydroelastic Conditions. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, No. 1, pp. 127 – 134.

Fenk, J. (2000): Eine analytische Lösung zur Berechnung von Hebungen der Tagesoberfläche bei Flutung unterirdischer Bergwerksanlagen. Das Markscheidewesen 107 (2000), Heft 2, S. 420 – 422.

Fenk, J. und Tzscharschuch, D. (2007): Zur Berechnung flutungsbedingter Hebungen der Tagesoberfläche. Markscheidewesen 114 (2007), Nr. 2, S. 60 – 64.

Freese, H. (2015): Differentielle Hebungen. Umsetzung neuester Forschungsergebnisse in die Praxis. 16. Geokinematischer Tag, Freiberg 2015, Tagungsband, S. 107 – 120.

Geertsma, J. (1973): A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case. The analysis of surface subsidence resulting from gas production in the Groningen area. The Netherlands. Editor Nederlandse Aardolie Maatschappij B. V., Deel 28, 1973, S. 43 – 61.

Głowacki, T. und Milczarek, W. (2013): Powierzchniowe deformacje wtórne dawnych terenów górniczych. (Surface deformation of the secondary former mining areas); Mining Science, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, S. 39 – 55. (www.gornictwoigeologia.pwr.wroc.pl).

Goerke-Mallet., P. (2000): Untersuchungen zu raumbedeutsamen Entwicklungen im Steinkohlenrevier Ibbenbüren unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Bergbau und Hydrogeologie. Dissertationsschrift RWTH Aachen, Verlag Mainz.

Graovski, A., Sroka, A. und Wedekind, C. (2013): Untersuchungen zu Auswirkungen an der Tagesoberfläche nach Einleitung der Flutung am Beispiel des Sanierungsstandortes Königstein der Wismut GmbH. 14. Geokinematischer Tag, TU Bergakademie Freiberg 2013, Tagungsband S. 60 – 74.

Grün E. (1995): Analyse und Prognose von Unstetigkeiten als Folge bergbaubedingter Bodenbewegungen im linksrheinischen Steinkohlengebiet. Dissertationsschrift, RWTH Aachen.

Grün, E., Pöller, H. und Pohl, F. (2003): Klassifizierung von Bauwerken an der Tagesoberfläche hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit und Möglichkeiten zu ihrem Schutz gegenüber bergbaulichen Einwirkungen. Markscheidewesen 110 (2003), Nr. 3, S. 89 – 96.

Gustkiewicz, J. (1989): Volumetric Deformations of a Rock and its Pores. Archives of Mining Sciences, Volume 34, Issue 3, pp. 593 – 609.

Hager, S. (2010): Stand der Aktivitäten der RAG Aktiengesellschaft bei der Untersuchung möglicher flutungsinduzierter Bodenbewegungen. 11. Geokinematischer Tag, Freiberg 2010, Tagungsband, S. 132 – 145.

Hager, S. (2022): Integrierte Bewertung altbergbaulicher Risikoobjekte des Steinkohlenbergbaus der RAG Aktiengesellschaft. Dissertationsschrift, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Herausgeber: J. Benndorf, Heft 2022-1.

Heitfeld, M., Rosner, P., Mühlenkamp, M. und Sahl, H. (2004): Bergschäden im Erkelenzer Steinkohlenrevier. 4. Altbergbaukolloquium, Montanuniversität Leoben 2004, Tagungsband S. 281 – 295.

Heitfeld, M., Rosner, P. und Mohrdieck, P. (2014): 6. Bericht über die Auswertung der Ergebnisse des Mess- und Überwachungsprogramms in Hinblick auf den Grubenwasseranstieg im Erkelenzer Steinkohlenrevier. Beobachtungszeitraum 01.01.2012 bis 31.12.2013. Bericht im Auftrag der EBV GmbH, Aachen, den 15. August 2014, (unveröffentlicht).

Heitfeld, M., Denys, F., de Vent, J., Klünker, J. und Rosner, P. (2015): Bewertung der Risiken durch Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande. 15. Altbergbaukolloquium, Montanuniversität Leoben 2015, Tagungsband S. 130 – 146.

Heitfeld, M., Rosner, P. und Mühlenkamp, M. (2016): Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen des stufenweisen Grubenwasseranstiegs in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel. Bewertung des Einwirkungspotentials und Monitoring Konzept, Anstieg bis – 320 m NHN. Gutachten im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft, Herne - Aachen, 19. Februar 2016 (unveröffentlicht).

Heitfeld, M., Denys, F., Schouwstra, M., Klünker, J., Rosner, P. und Spaans, J. (2017): Spätfolgen des Steinkohlenbergbaus in Südlimburg/Niederlande – Bestandsaufnahme und Prognosen. 18. Geokinematischer Tag, S. 146 – 165.

Hovekamp, A., Poths, M., Salamon, M und Lehmann, K. (2016): Sumpfbewegungsbedingte Bodenbewegungen an geologischen Störungen am Beispiel des Rurrandes im Paläoseismikschurf Jülich-Stallbusch. Markscheidewesen 123 (2016), Nr.1, S. 3 – 9.

Juskis - Niederrhein in der Bronzezeit von schweren Erdbeben betroffen <http://juskis-erdbebennews.de/2016/02/dueren-erdbeben-bronzezeit/>

Keinhorst, H. und Kamp, H. (1956): Die Bodenbewegungsvorgänge im rechtsrheinischen Gebiet. Der Deutsche Steinkohlenbergbau, Technisches Sammelwerk, Band 2, Vermessungs- und Risswesen, Bergschäden, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1956, S. 410 – 423.

Kowalski, A. (2007): Surface Deformation for Today's Hard Coal Mining in Poland (polnisch). Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, AGH Kraków, H. 3/1.

Kratzsch, H. (1983): Mining Subsidence Engineering. Springer - Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Kwiatk, J. et al. (2000): Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górnictwa z uwagi na ochronę obiektów budowlanych. Seria: Instrukcje No. 12, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

Löbel, K.-H., Tamaskovics, N., Eckart, M. und Busch, W. (2015): Vertikale Bodenbewegungen im Zusammenhang mit dem Grubenwasseranstieg im ehemaligen Steinkohlenrevier Oelsnitz/Erzgebirge. 15. Altbergbaukolloquium, Montanuniversität Leoben 2015, Tagungsband S. 114 – 129.

Mühlenbeck, H. (2015): Hebungen nach Einstellung von Wasserhaltungen im Ruhrgebiet. Bergbau 8/2015, S. 346 – 349.

Oberste-Brink, K. (1940): Die Frage der Hebungen bei Bodenbewegungen infolge des Bergbaus. Glückauf 76, S. 249 – 256.

Pohl, F. (2002): Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich ihrer bautechnischen Empfindlichkeit gegenüber bergbauinduzierten Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche des Ruhrreviers. Dissertationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, 16.11.2001, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2002-2.

Pöttgens, J. J. E. (1985): Bodenhebung durch ansteigendes Grubenwasser. 6. Internationaler Kongress für Markscheidewesen. Harrogate 1985, Tagungsband S. 928 – 938.

Pöttgens, J. J. E. (1998): Bodenhebung und Grundwasseranstieg aus geotechnischer und markscheiderisch-geodätischer Sicht im Aachen-Limburger Kohlenrevier. Freiburger Forschungshefte, Bergbau und Geotechnik A 847, S. 193 – 207.

Preuße, A. und Sroka, A. (2004): Grenzwinkel und Einwirkungsgrenzen in deutschen Steinkohlenbergbau. Gutachten für die Deutsche Steinkohle AG, Herne.

Preuße, A. und Sroka, A. (2008): Projekt „Risiken durch Grubenwasseranstieg“, 3. Zwischenbericht. Auftragsgeber DSK AG Herne, November 2008.

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

Schäfer, A. (2015): Zur Verteilung der Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche nach Grubenwasseranstieg in einer Steinkohlenlagerstätte. Bergbau, Energie und Rohstoffe 2015, Freiberg, Tagungsband S. 158 – 170.

Schäfer, A. (2016): Zur Verteilung der Bodenbewegungen an der Tagesoberfläche nach Grubenwasseranstieg in einer Steinkohlenlagerstätte. Markscheidewesen 123 (2016), Nr.1, S. 21 – 28.

Schaefer, W. und Spata, M. (2007): Bodenbewegungen in Tektonikbereichen des Rheinischen Braunkohlereviers. Wissenschaftliche Schriftenreihe in Markscheidewesen, Heft 22, 45. Wissenschaftliche Fachtagung des Deutschen Markscheider- Vereins e.V., 12.-15. September 2007 in Leipzig.

Schmidt-Schleicher, H. (1998): Vorschlag zur Erfassung und Bewertung historischer Bauwerke in Bergsenkungsgebieten. Gemeinsame Tagung des SFB 315 „Erhalten Historisch

Bedeutsamer Bauwerke“ der Universität Karlsruhe und der Ruhrkohle Bergbau AG, Zeche Zollverein Essen, Essen 9. Bis 11 Oktober 1997, Bergbau und Denkmal 3, Heft 15/1998, S. 77 – 82.

Spielberg, P. (1999): Rohrleitungen im Einwirkungsbereich untertägigen Abbaus. Ein Beitrag zur Verhütung von Schäden. Dissertationsschrift, TU Bergakademie Freiberg.

Spielberg, P. und Sroka, A. (2004): Ein Verfahren zur Festlegung von Dehnerabständen für Stahlrohrleitungen im Bergbaugebiet. Markscheidewesen 111 (2004), Nr. 3, S. 106 – 114.

Sroka, A., Schober, F. und Sroka, T. (1988): Vorausberechnung von Gebirgsbewegungen bei geneigten flözartigen Lagerstätten unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften, des Durchbaungsgrades und des zeitlichen Konvergenz- und Verzögerungsverhaltens des Gebirges. DFG – Forschungsvorhaben, Institut für Markscheidewesen. TU Clausthal.

Sroka, A. und Fenk, J. (2003): Studie zu Auswirkungen des Grubenwasseranstiegs auf Bewegungen der Tagesoberfläche in stillgelegten Bergbaubereichen des Saarlandes. F + E-Bericht der TU Bergakademie Freiberg, im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft.

Sroka, A. (2003): Der Einfluss von Hochleistungsstreben auf das Gebirge und die Tagesoberfläche. Glückauf Forschungshefte 64 (2003), Nr. 3, S. 76 – 84.

Sroka, A. (2005): Ein Beitrag zur Vorausberechnung der durch den Grubenwasseranstieg bedingten Hebungen. 5. Altbergbau-Kolloquium, TU Clausthal 2005, Tagungsband S. 453 – 462.

Sroka, A., Preuße, A. und Holzheim, M. (2006): Auswirkung des Grubenwasseranstiegs auf die Tagesoberfläche – Stand der Forschung. 8. Aachener Altlasten- und Bergschadenkundliches Kolloquium, RWTH Aachen 2006, Tagungsband S. 57 – 68.

Sroka, A. (2006): Contribution to the Prediction of Ground Surface Movements Caused by a Rising Water Level in a Flooded Mine. Proceedings International Mining forum 2006, Taylor & Francis/Balkema, London/ Leiden/ New York/ Philadelphia/ Singapore, S. 57 – 68.

Sroka, A. (2007): Problems resulting from the change of the extraction technology in the present hard coal mining by the example of discontinuous deformations of linear type. (polnisch: Problemy wynikające ze zmian technologii eksploatacji we współczesnym górnictwie węgla kamiennego na przykładzie deformacji nieciągłych typu liniowego). Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, Nr. V/2007, S. 145 – 157, Katowice.

Sroka, A. und Preuße, A. (2009): Zur Prognose flutungsbedingter Hebungen. 9. Altbergbau-Kolloquium, Leoben 2009, Tagungsband S. 184 – 196.

Sroka, A. (2011): Zum Problem des die Weite der abbaubedingten Einwirkungen begrenzenden Winkels. Energie und Rohstoffe 2011, Freiberg, S. 312 – 323.

Sroka, A., Preuße, A, und Pohl, F. (2017): Gutachterliche Stellungnahme zum Einfluss möglicher Grubenwasserregulierungsmaßnahmen auf die Abwasserinfrastruktur der Emschergenossenschaft. Im Auftrag der Emschergenossenschaft in Essen, Dresden und Herten, Februar 2015 – Juni 2017.

Sroka, A., Tajduś, K. und Misa, R. (2017): Gutachterliche Stellungnahme zur Auswirkung des Grubenwasseranstiegs im Ostfeld des Bergwerkes Ibbenbüren auf die Tagesoberfläche. Im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft.

Sroka, A., Misa, R. und Tajduś, K. (2018): Modern applications of the Knothe theory in calculations of surface and rock mass deformation. Das Markscheidewesen, 125 (2018), Nr.2, S. 46 – 53.

Sroka, A., Tajduś, K., Misa, R. und Dudek, M. (2020): Grubenwasseranstiegsbedingte Bodenbewegungen in der Wassergroßprovinz Lohberg der RAG Aktiengesellschaft bei einem Anstieg bis – 600 m NHN. Wissenschaftliche Studie im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft. Institut für Gebirgsmechanik der Polnischen Akademie der Wissenschaften, Krakau, April 2019 – September 2020.

Staege, V. und Pohl, F.W. (2000): Ein Vorschlag zur Erfassung und Bewertung historischer Bauwerke in Bergsenkungsgebieten im Rahmen der Umwelt-Verträglichkeitsstudie. Bauingenieur, Band 75, April 2000, S. 192 – 197.

Tunger, K. (2009): Bodenbewegungen durch Flutung im Steinkohlenrevier Freital/Sachsen. Markscheidewesen 116 (2009), Nr. 1, S. 3 – 10.

Wikipedia - Erdbeben bei Düren 1756, [https://de.wikipedia.org/wiki/ Erdbeben_bei_Düren_1756](https://de.wikipedia.org/wiki/Erdbeben_bei_Düren_1756).

Wikipedia - Erdbeben von Roermond 1992, [https://de.wikipedia.org/wiki/ Erdbeben_von_Roermond_1992](https://de.wikipedia.org/wiki/Erdbeben_von_Roermond_1992).

Wings, R. W. M. G., Misere, W. M. H. und Pöttgens, J. J. E. (2004): Bodensenkung – Bodenhebung – Bergschäden? 44. Wissenschaftliche Tagung des Deutschen Markscheider-Vereins, Bochum 2004, Tagungsband S. 258 – 269.

Zhao, J. und Konietzky, H. (2021): An overview on flooding induced uplift for abandoned coal mines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 148 (2021) 104955, P. 1 – 14.

8. Anlagen

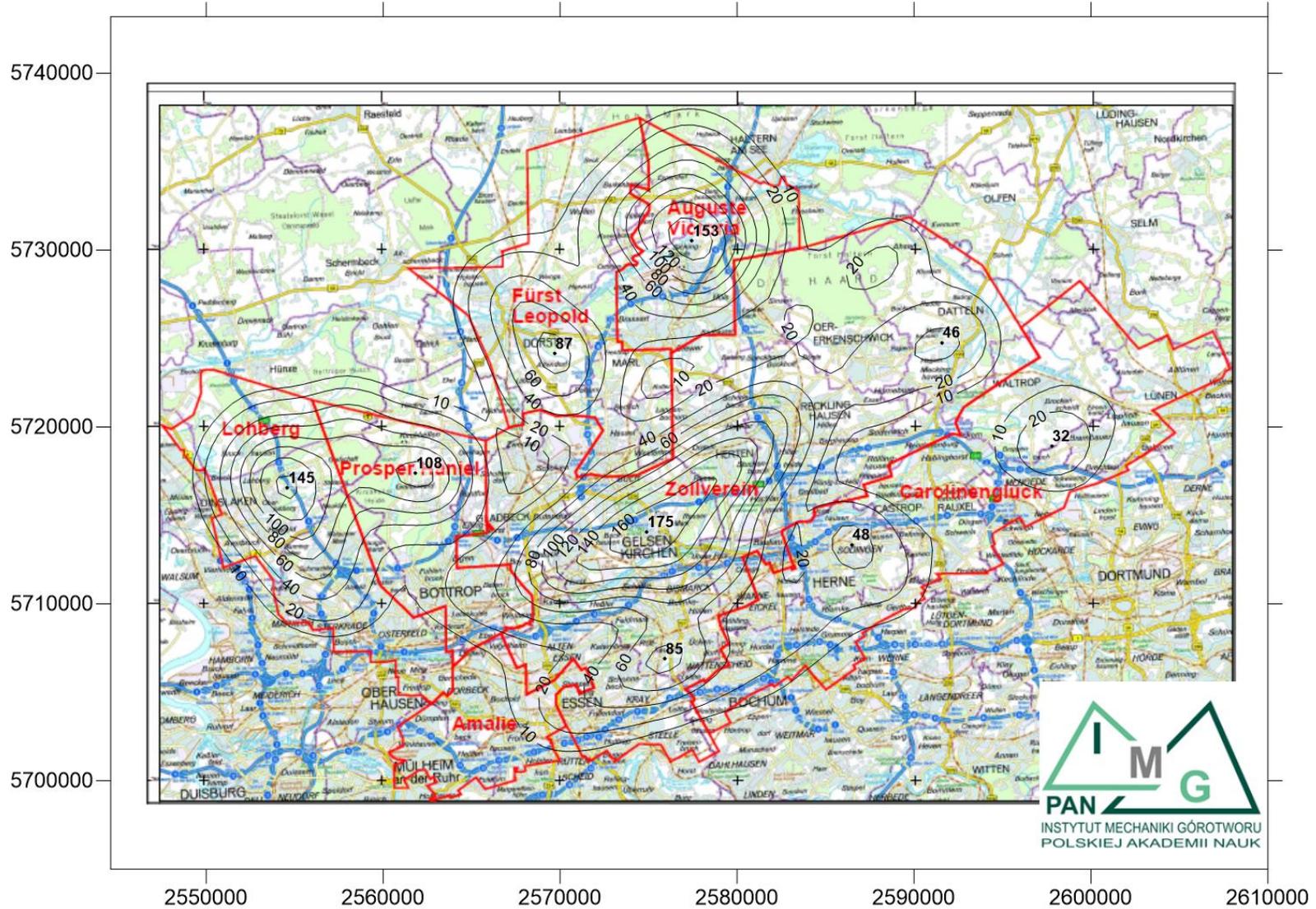
Anlage 8.1. Prognostizierte Hebungen im Bereich des Wassergroßprovinz Lohberg beim Grubenwasseranstieg bis zum geplanten Endniveau von - 600 m NHN (Studie IMG PAN, 2020)

Anlage 8.2 Hebungsrandbereich (IHS) Stadtbahn Essen

Anlage 8.3 Hebungsrandbereich U35 Stadtbahn Herne

Anlage 8.4 Hebungsrandbereich U35 Bochum

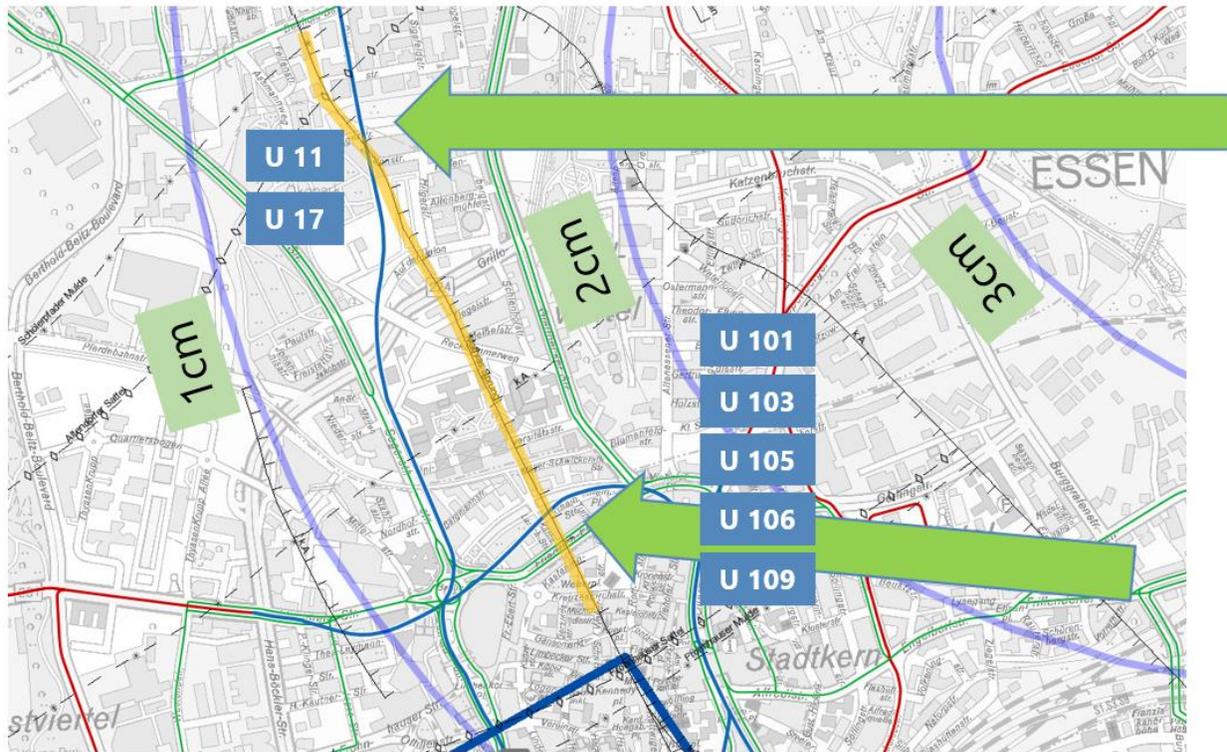
Anlage 8.5 Welterbe Zollverein



Anlage 8.1. Prognostizierte Hebungen im Bereich des Wassergroßprovinz Lohberg beim Grubenwasseranstieg bis zum geplanten Endniveau von – 600 m NHN (Studie IMG PAN, 2020).

Anlage 8.2.

Hebungsrandbereich (IHS) Stadtbahn Essen



Maximale Werte (U 11, U 17)

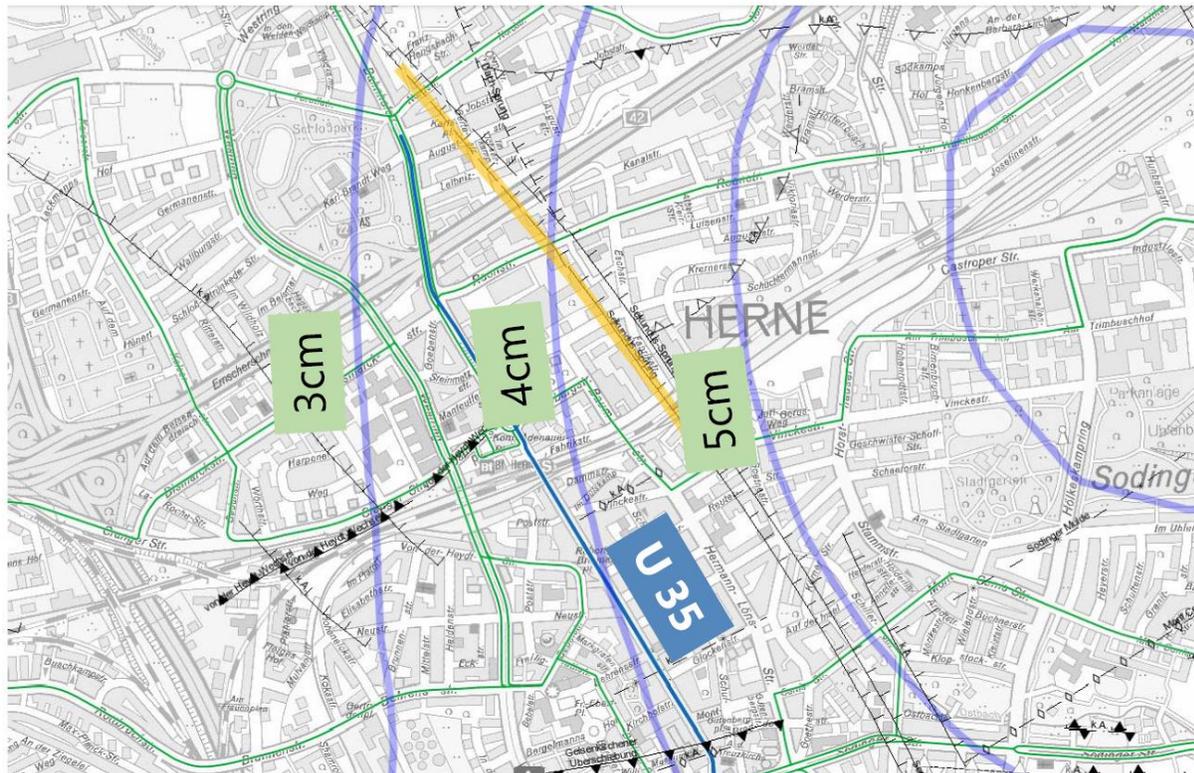
Schiefelage max. [mm/m]	-0,01
Zerrung/Pressung min. [mm/m]	-0,007
Zerrung/Pressung max. [mm/m]	0,006

Maximale Werte (U 101, U 103, U 105, U 106, U 109)

Schiefelage max. [mm/m]	-0,01
Zerrung/Pressung min. [mm/m]	-0,004
Zerrung/Pressung max. [mm/m]	0,008

Anlage 8.3.

Hebungsrandbereich U35 Stadtbahn Herne



Maximale Werte

Schiefelage max. [mm/m]	-0,02
Zerrung/Pressung min. [mm/m]	-0,012
Zerrung/Pressung max. [mm/m]	0,012

Anlage 8.4.

Hebungsrandbereich U35 Bochum

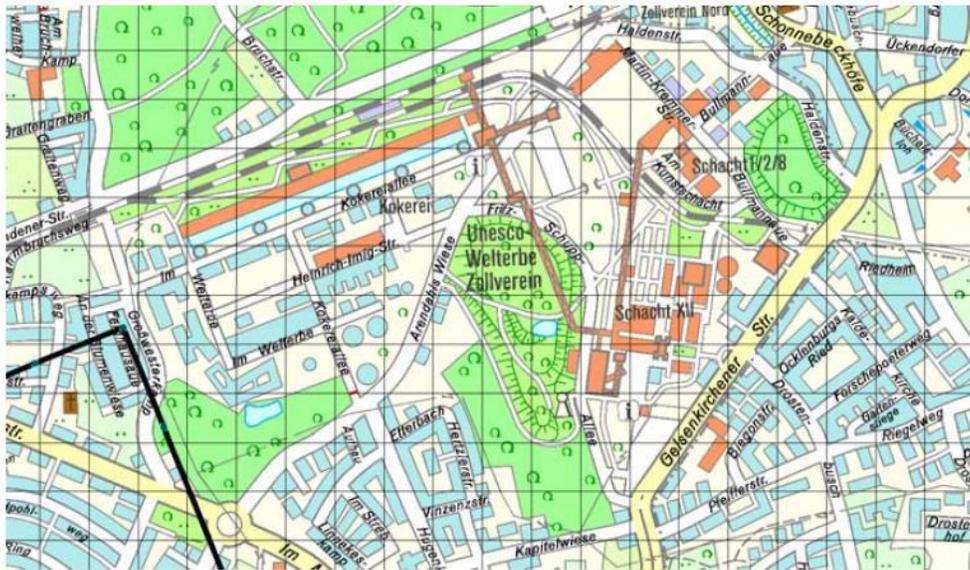


Maximale Werte

Schiefelage max. [mm/m]	-0,01
Zerrung/Pressung min. [mm/m]	-0,006
Zerrung/Pressung max. [mm/m]	0,017

Anlage 8.5.

Welterbe Zollverein



Maximale Werte

Schiefelage max. [mm/m]	-0,02
Zerrung/Pressung min. [mm/m]	-0,011
Zerrung/Pressung max. [mm/m]	0,016