

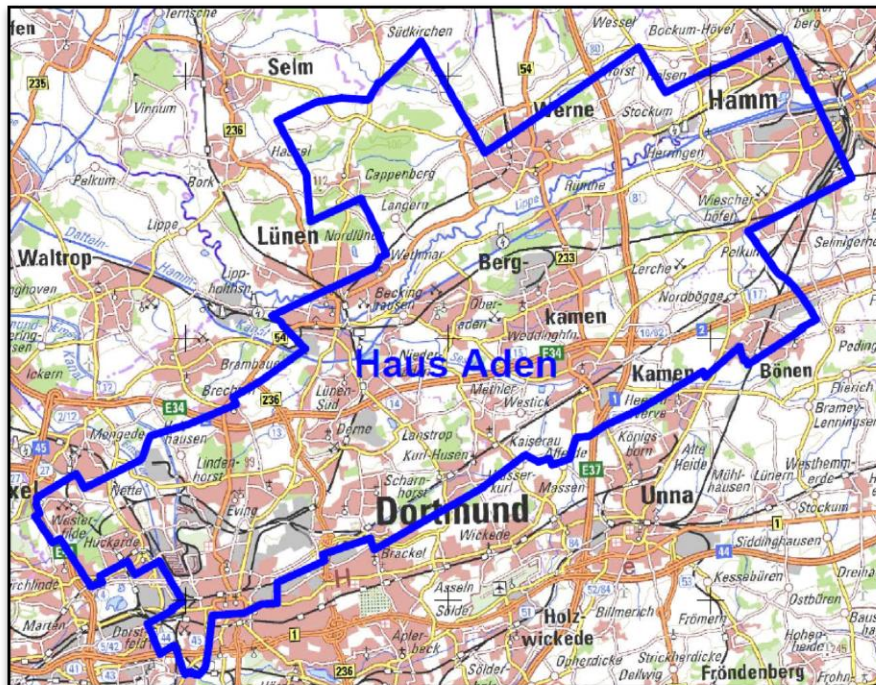
Auftragsgeber:

RAG Aktiengesellschaft

Im Welterbe 10

D - 45141 Essen

**Gutachten zu grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen in
der Wasserprovinz Haus Aden bei einem Anstieg bis -380m NHN**



Wasserprovinz Haus Aden

Copyright Quelle für Tagessituation: © GeoBasis-DE / BKG 2023

Kraków, Dezember 2023 – Februar 2024



STRATA MECHANICS RESEARCH INSTITUTE
POLISH ACADEMY OF SCIENCES
Address: Reymonta Str. 27, 30-059 CRACOW, POLAND
tel.: +48 (12) 637 62 00, fax: +48 (12) 637 28 84

Auftragsgeber:

RAG Aktiengesellschaft
Im Welterbe 10
D - 45141 Essen

**Gutachten zu grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen in
der Wasserprovinz Haus Aden bei einem Anstieg bis -380m NHN**

Projektleiter/Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Anton Sroka, IMG PAN

Dr. Antoni Sroka

.....
(Unterschrift)

Mitarbeiter:

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

Dr.-Ing. Rafał Misa, IMG PAN

Dipl.-Ing. Dawid Mrocheń, IMG PAN

Institutsdirektor

Dr.-Ing. habil. Przemysław Skotniczny, prof. IMG PAN

.....
(Unterschrift)

Kraków, Dezember 2023 – Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1. Anlass / Einführung	4
2. Kurze Darstellung des Untersuchungsraumes	5
3. Verfahren zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen	7
4. Berechnungsgrundlagen / Berechnungsergebnisse.....	15
5. Bewertung der Schadensrelevanz	20
5.1 Stetige Bodenbewegungen.....	20
5.2 Unstetige Bodenbewegungen.....	24
6. Zusammenfassung / Fazit	27
7. Quellenangaben	28
7.1. Literatur	28
7.2. Projektunterlagen	35
8. Anlagen	36
8.1. Prognostizierte Hebungen im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden bei einem Grubenwasseranstieg bis zum Endniveau von -380 m NHN.....	36

1. Anlass / Einführung

Die RAG Aktiengesellschaft hat an 16. Oktober 2023 bei dem Gutachter angefragt und am 02. Januar 2024 schriftlich beauftragt (Bestell-Nr. 5607487) eine gutachterliche Stellungnahme zur Prognose der grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen bei einem Grubenwasseranstieg bis -380m NHN im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden und zur Bewertung der daraus resultierenden Risiken für die Bauwerke und die Infrastruktureinrichtungen der Tagesoberfläche anzufertigen.

Die notwendigen Sachverhalte dieser gutachterlichen Stellungnahme sind wie folgt:

1. Die Prognose der zu erwartenden Hebungen und der daraus resultierenden bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente (wie Schiefelage, Krümmung und horizontale Längenänderung) im gesamten Eiwirkungsbereich der Wasserprovinz Haus Aden.
2. Die Bewertung der Bergschadensrelevanz der prognostizierten Bodenbewegungselemente für Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen, wie u.a.:
 - Baudenkmäler
 - Wohnbebauung
 - Industrieobjekte und –anlagen
 - Verkehrsinfrastrukturanlagen (z.B. Bahn- und Stadtbahnanlagen, Tunnelbauten)
 - Versorgungs- und Entsorgungsanlagen und Leitungen, Rohrfernleitungen.
3. Festlegung notwendiger Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des sicheren und ungestörten Betriebes der einzelnen Bauwerke und der Infrastruktureinrichtungen.

Für das vorliegende Gutachten sind einige allgemeine Teile der im Zeitraum Mai – Juli 2022 erstellten „Gutachterlichen 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 Verkehrsinfrastrukturein-

richtungen und Rohrfernleitungen (Markscheiderisch – bergschadenkundliche Beurteilung)“ in einer Teils veränderten Fassung übernommen worden. Diese Stellungnahme wurde im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft vom Prof. Sroka erstellt.

2. Kurze Darstellung des Untersuchungsraumes

Der Untersuchungsraum ist durch die zusammenhängenden einzelnen Wasserboxen, die die Wasserprovinz Haus Aden bilden, definiert (Abb. 1). Sie erstreckt sich max. 33 km in SW – NE und ca. 15 km in Süd - Nord Richtung und umfasst ca. 323 km².

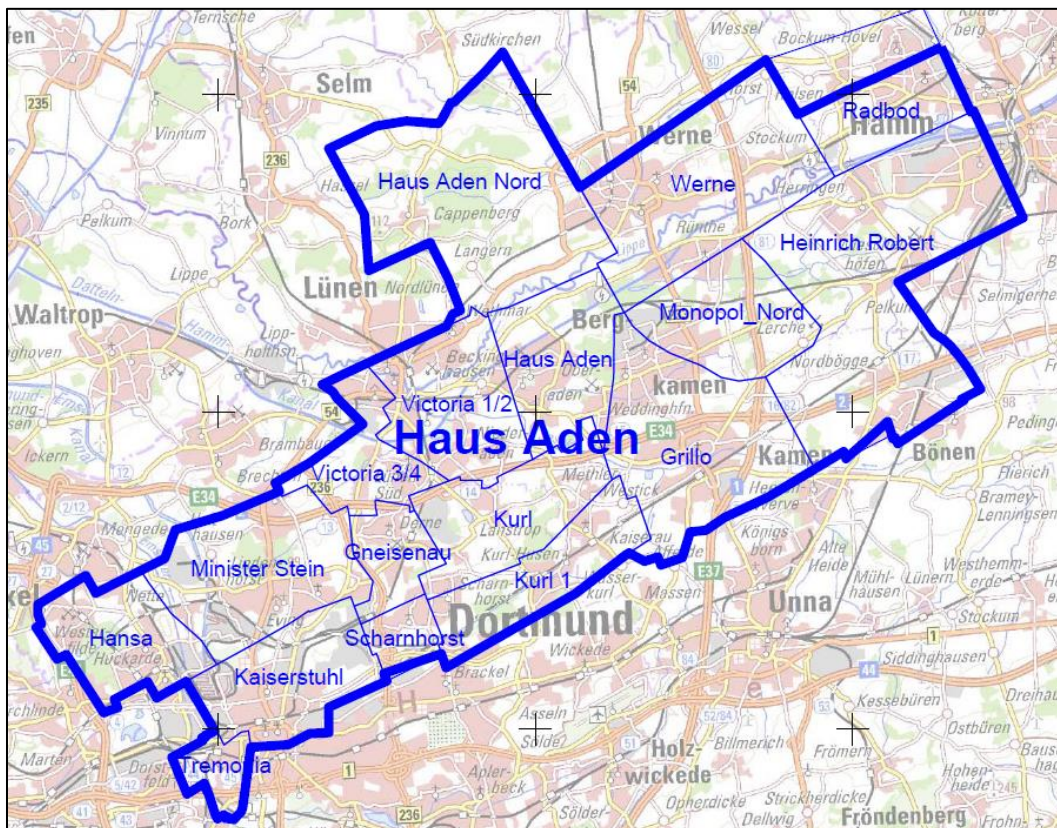


Abb. 1. Untersuchungsraum - die Wasserprovinz Haus Aden.

Copyright Quelle für Tagessituation: © GeoBasis-DE / BKG 2023

Der Untersuchungsraum zeichnet sich durch eine sehr hohe Urbanisierungs-, Verkehrs- und Industriedichte aus. Innerhalb des Untersuchungsraumes befinden sich mehrere

Städte wie Dortmund, Lünen, Kamen, Bergkamen, Werne und Hamm mit der entsprechend komplexen urbanen Infrastruktur. Mehrere Eisenbahnlinien und Autobahnen sind sehr wichtige Teile des deutschen und europäischen Verkehrsnetzes. Hier sind speziell die Autobahnen A 2 in die Ost - West Richtung und die A 1 in die Süd - Nord Richtung hervorzuheben. Außerdem befinden sich im Untersuchungsraum mehrere Großindustrieanlagen, Raffinerien, Wasser- und Schifffahrtskanäle, Öl- und Gasfernleitungen sowie historische Bauwerke und Kulturgüter.

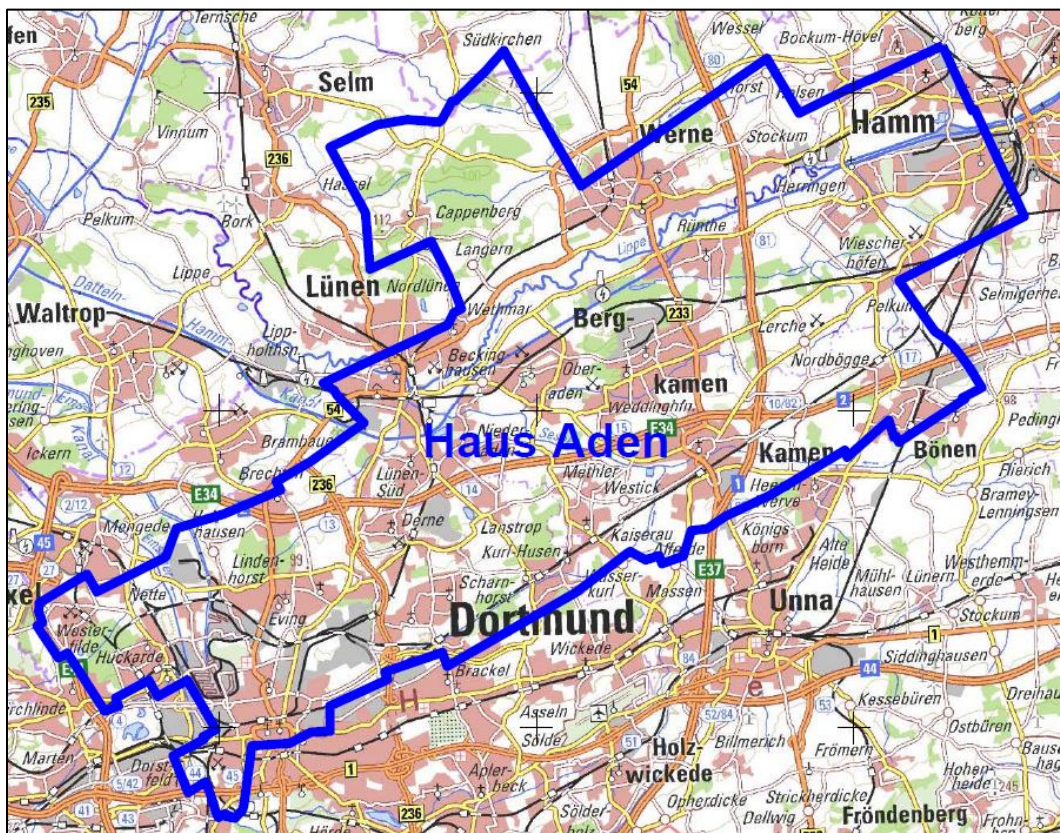


Abb. 2. Tagessituation im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden.

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 gutachterlichen Stellungnahme eine, auf dem Stand der Technik basierende, übergreifende Bewertung der Schadensrelevanz. So kann erfahrungsgemäß die Anzahl möglicher Einzelfallbetrachtungen auf das notwendige und sinnvolle Maß reduziert werden.

3. Verfahren zur Vorausberechnung grubenwasseranstiegsbedingter Hebungen

Um die möglichen negativen Auswirkungen des im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden von der RAG Aktiengesellschaft geplanten Grubenwasseranstiegs bis zum Niveau -380m NHN zu bewerten, ist es notwendig die durch den Grubenwasseranstieg induzierten Bodenbewegungen mittels mathematischer Modelle abzuschätzen. Als Stand der Technik stehen hier die analytischen Modelle von Pöttgens (1985, 1988), Fenk (2000) und Sroka (2005) zur Verfügung.

Alle drei Verfahren haben identische theoretische Grundlagen zur Beschreibung der Hebungsursache, und zwar das elastische Auftriebsmodell des rekonsolidierten abbaubedingten Bruchkörpers. Infolge des Grubenwasseranstiegs kommt es im Bereich des dränbaren Bruchkörpers zur Erhöhung des Porendruckes, was zur vertikalen Ausdehnung des Bruchkörpers führt. Für den Mehrflözabbau, 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 bil-

det eine einzelne 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.

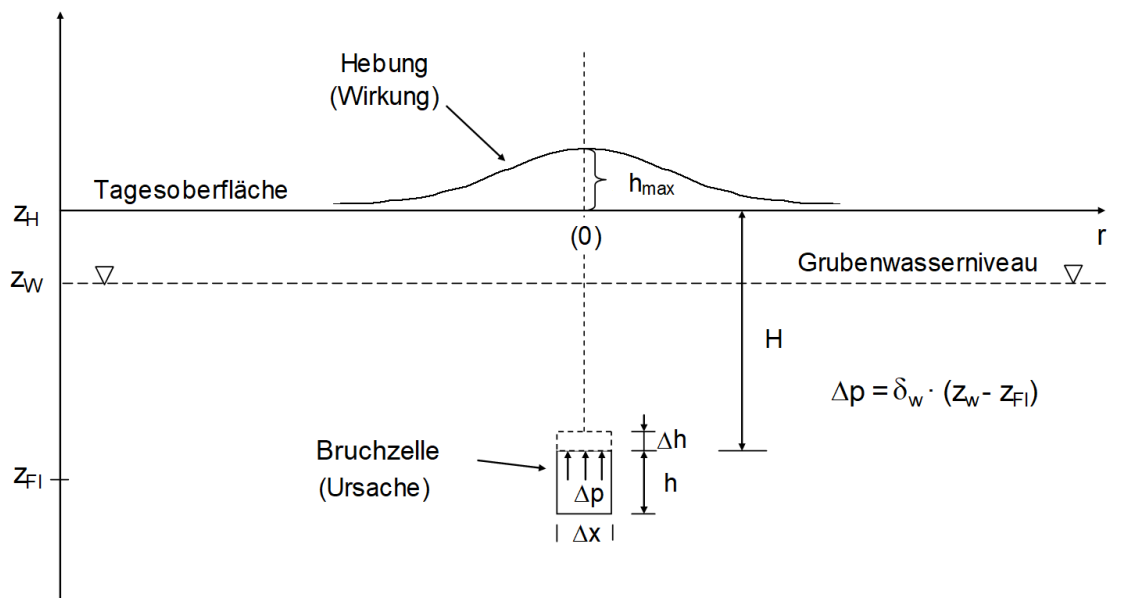


Abb. 3: Graphische Erläuterungen zum mathematischen Modell der grubenwasseranstiegsbedingten Hebungen (Sroka, 2005).

Die Verknüpfung der Ursache, d.h. der Volumenvergrößerung einer Bruchzelle, mit einer markscheiderischen Einfluss- bzw. Transformationsfunktion führt zu einer elementaren Hebungsverteilung (Abb. 3). Durch Aufteilung des abbaubedingten Bruchkörpers, der im Grundriss den abgebauten Fläche 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 Preuß, 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 des Ruhrkohle-Verfahrens 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 Hebungsverteilung 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 - Teufe 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 und Sroka (2008) vorgeschlagen, einen integralen auf die absolute Mächtigkeit des abgebauten Flözes bezogenen Dehnungskoeffizienten μ einzuführen (Formel 8).

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

Daraus ergibt sich, dass die Werte des integralen 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	$\mu = d_m \cdot \lambda$ [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 grubenwasseranstiegsbedingter 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 bzw. zu validieren.

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

ckes 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:

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

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

mit:

E_s - Steifemodul.

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

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

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:

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

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 integralen 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 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.

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

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 Wasserprovinz Haus Aden bis zu einem Endniveau von -380 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 integralen Dehnungskoeffizienten beträgt somit $1,092 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{MN}$. Die abbaubedingten Bruchkörper wurden auf der Grundlage der im Bereich der Wasserprovinzen durchgeführten Abbaue definiert.

Die zur Vorausberechnung der grubenwasseranstiegsbedingten Bodenbewegungen notwendigen Abbaudaten wurden von der RAG Aktiengesellschaft zur Verfügung gestellt. Insgesamt befinden sich im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden 10075 Abbaufächen in über 100 Flözen, davon 6615 unter -380m NHN (Abb. 4).

Die prognostizierte Hebungverteilung im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden für den Grubenwasseranstieg bis zum Endniveau von -380 m NHN ist in der Abbildung (5) dargestellt.

In der Abbildung (5) sind mehrere lokale Hebungsschwerpunkte deutlich zu erkennen. Diese stehen mit dem intensiven und konzentrierten Abbau einiger ehemaligen Steinkohlenbergwerke direkt in Verbindung (Abb. 4).

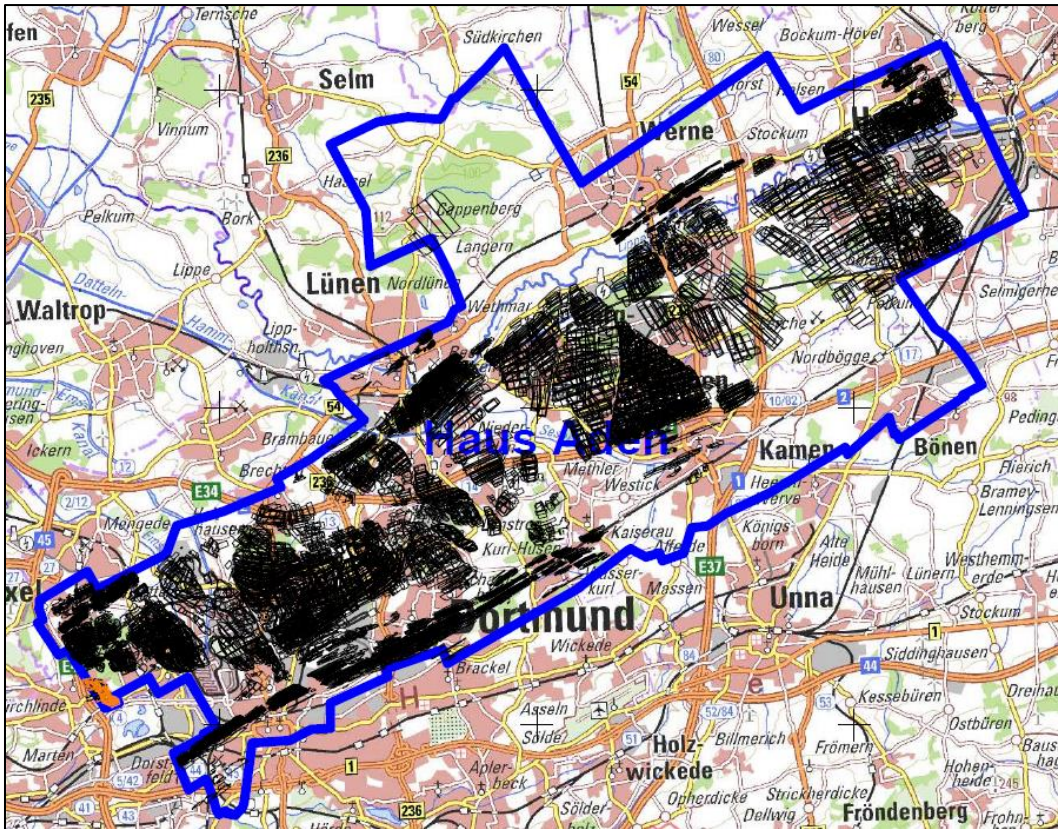


Abb. 4. Schematische Darstellung der abgebauten Flächen bis - 380 m NHN im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden.

Copyright Quelle für Tagessituation: © GeoBasis-DE / BKG 2023

In der nachfolgenden Tabelle (2) sind die berechneten maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden zusammengestellt.

Tab. 2. Prognostizierte maximale Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente beim Grubenwasseranstieg bis zum Endniveau von -380 m NHN.

	max. Werte			
Wasserprovinz	h	T	ε^-	ε^+
	[mm]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
Haus Aden	303,1	0,091	- 0,058	0,101



Abb. 5. Prognostizierte Hebungverteilung im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden beim Grubenwasseranstieg bis zum Niveau von -380 m NHN.

Die Tabelle (2) beinhaltet den berechneten maximalen Hebungswert und die maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente, d.h. der Schiefelage T , der Pressung ε^- und der Zerrung ε^+ . Die bergschadensrelevanten Werte der Schiefelage und der horizontalen relativen Längenänderungen (Pressung und Zerrung) sind sehr gering und überschreiten den Wert von 0,10 mm/m nicht. Die berechneten maximalen vertikalen Krümmungen erreichen Werte > 1000 km und werden hier nicht aufgeführt.

Die prognostizierte Hebungverteilung für den gesamten Bereich der Wasserprovinz Haus Aden mit der Berücksichtigung der Tagessituation ist in der Abbildung (6) und Anlage 8.1 dargestellt.

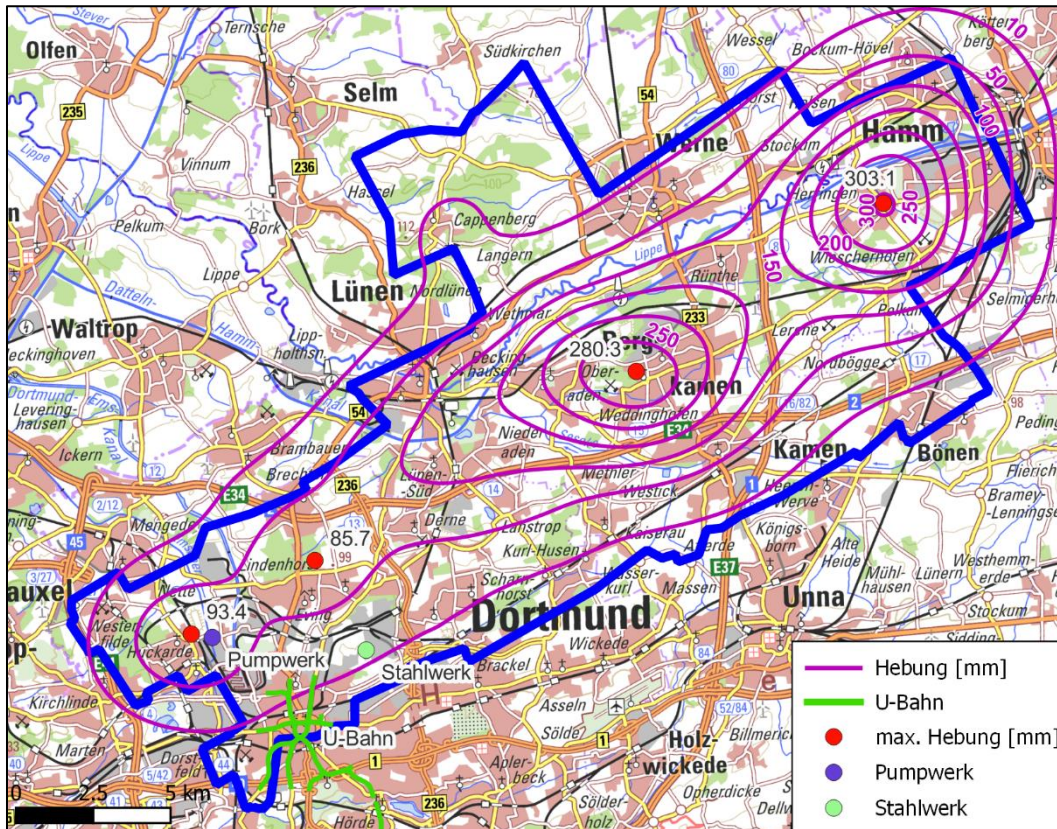


Abb. 6. Hebungsverteilung im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden für das Anstiegsendniveau von -380 m NHN.

Copyright Quelle für Tagessituation: © GeoBasis-DE / BKG 2023

Im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft wurden außerdem detaillierte Berechnungen für drei ausgewählte Infrastruktur- und Industrieobjekte durchgeführt, und zwar für:

1. die Tunnelbauwerke der U-Bahn,
2. das Pumpwerk Deusen EG/LV, und
3. die Betriebsanlagen der thyssenkrupp Steel Europe AG.

Die Lage dieser Objekte ist in den Abbildungen (6) und (7) dargestellt.

Die berechneten Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente sind in der Tabelle (3) zusammengestellt.

Die prognostizierten Werte der Horizontalen Längenänderungen sind so gering, dass eine Interaktion zwischen dem Boden, d.h. dem Baugrund, und den Objekten praktisch auszuschließen ist. Somit sind keine grubenwasseranstiegsbedingten negativen Auswirkungen auf diese Objekte zu erwarten.



Abb. 7. Hebungen in Umgebung der ausgewählten Objekte.

Copyright Quelle für Tagessituation: © GeoBasis-DE / BKG 2023

Tab. 3. Prognostizierte Werte der bergschadenrelevanten Bodenbewegungselemente für die ausgewählten Objekte.

Objekt	max. Werte			
	h [mm]	T [mm/m]	ε^- [mm/m]	ε^+ [mm/m]
Tunnelbauwerke der U-Bahn	17,9	0,016	-0,004	0,018
Pumpwerk Emschergenossenschaft	87,7	0,025	0,000	0,052
Stahlwerk thyssenkrupp Steel Europe AG	18,4	0,015	-0,005	0,008

5. Bewertung der Schadensrelevanz

5.1 Stetige Bodenbewegungen

Die Grubenwasseranstiegsbedingten 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 Schiefelage 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 (4) 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. 4. 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)	$\epsilon_{Gr} = 0,10$
Staeger, Pohl (2000)	$\epsilon_{Gr} = 0,20$
Kwiattek, et al. (2000)	$\epsilon_{Gr} = 0,30$
	$T_{Gr} = 0,50$

Die prognostizierten maximalen Zerrungs- und Pressungswerte (Tab. 2 und Tab. 3) sind so gering, dass sie für die Tagesoberfläche und deren Infrastruktureinrichtungen einen völlig unkritischen Vorgang darstellen. Sie sind durchaus vergleichbar mit der Längsdehnung einiger Baustoffe bei Änderung der Temperatur um einige °C (Tab. 5).

Bei der Bewertung der Bergschadensrelevanz ist im Hinblick auf die Versorgungs- und Entsorgungsleitungen sowie die Fernleitungen auf die Dissertation von Spielberg hinzuweisen (Spielberg, 1999).

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. 6). Diese Werte resultieren u.a. aus der langjährigen Praxis bei der Bearbeitung von Rohrleitungen unter Bergbaueinfluss.

Tab. 5. 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

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

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 Bau-

denkmäler 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).

Tab. 6. 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

Die vorausberechneten maximalen Werte der grubenwasseranstiegsbedingten stetigen schadensrelevanten Bodenbewegungselemente für den gesamten Einwirkungsbereich der Wasserprovinz Haus Aden 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 Rurand-Sprungs. Beide Sprünge bilden die westliche Grenze des sogenannten Wasserberger Horstes in dem sich die Baufelder des Bergwerkes Sophia-Jacoba befinden. Es entstand eine durchgehende Schadenslinie mit einer Gesamtlänge von ca. 9 km (Abb. 8). Es handelt 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 unstetigen 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 grubenwasseranstiegsbedingten 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 Abbaupraktiken des Bergwerkes direkt eingewirkt haben.

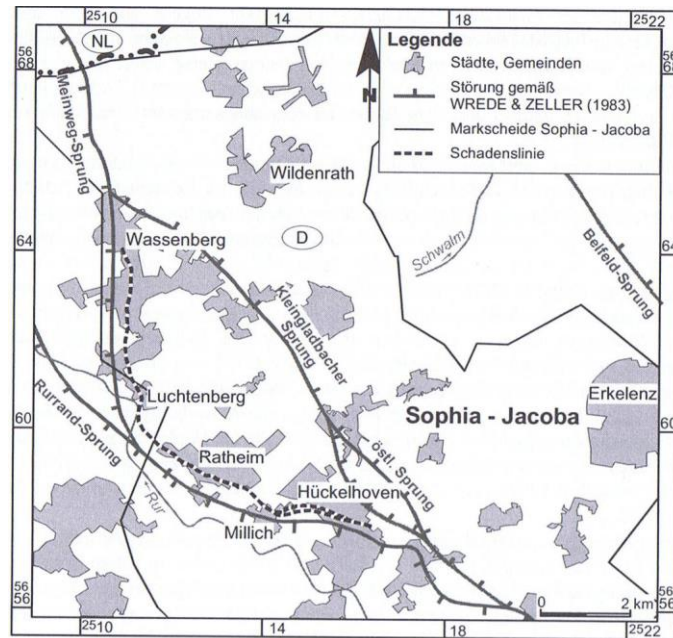


Abb. 8. Der Verlauf der Schadenslinie am Westrand des Wassenberger Horstes (Heitfeld et al., 2004).

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 Unstetigkeitsbereich 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 in der Wasserprovinz Haus Aden, im Rahmen des Grubenwasserkonzeptes der RAG Aktiengesellschaft geplanter Anstieg bis zum Niveau von -380m NHN wird dann zu wesentlich geringeren Auswirkungen führen. Damit ist die Möglichkeit der Entstehung un stetiger Bodenreaktionen praktisch ausgeschlossen.

6. Zusammenfassung / Fazit

Die für den geplanten Grubenwasseranstieg bis zum Niveau -380m NHN im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden prognostizierten maximalen Werte der bergschadensrelevanten Bodenbewegungselemente sind wie folgt:

- maximale Hebung: $h_{\max} = 303,1 \text{ mm}$
- maximale Schiefelage: $T_{\max} = 0,091 \text{ mm/m}$
- maximale Pressung: $\varepsilon_{\max}^- = -0,058 \text{ mm/m}$
- maximale Zerrung: $\varepsilon_{\max}^+ = 0,101 \text{ mm/m}$
- minimaler Krümmungsradius: $R_K > 1000 \text{ km}$

In Anbetracht dieser Werte und der im Rahmen dieser gutachterlichen Stellungnahme durchgeführten Untersuchungen und Analysen ist klar festzustellen, dass die Grubenwasseranstiegsbedingten stetigen Bodenbewegungen im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden keine Bergschadensrelevanz für alle Objekte der Tagesoberfläche haben werden. Dazu zählen u.a. die Gebäude, die Industrieobjekte und -anlagen, die Versorgungs- und Entsorgungsleitungen sowie die gesamte Verkehrsinfrastruktur mit den dazugehörigen Tunnelbauwerken.

Aufgrund der bis heute vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnisse sind un stetigen Bodenbewegungen in Form von langgezogenen Erdrissbildungen und Abrisskanten in Bereichen der Ausgehenden (Ausbisse) großtektonischen Störungen sowie in den während der aktiven Betriebszeit entstandenen abbaubedingten Riss- und Stufenzonen nicht zu erwarten.

Damit ist eindeutig, mit einer an die absolute Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit, festzustellen, dass von dem durch die RAG Aktiengesellschaft in der Wasserprovinz Haus Aden geplanten Grubenwasseranstieg bis -380m NHN keine Gefährdung für die Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen ausgeht.

Somit sind zusätzliche prophylaktische und Überwachungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung des ordnungsgemäßen und sicheren Betriebes der einzelnen Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen nicht notwendig.

7. Quellenangaben

7.1. Literatur

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., Mühlkamp, 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 Mühlkamp, 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): Sümpfungsbedingte 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 górniczej 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.

Misa, R., Dudek, M., Sroka, A., Tajduś, K., Mrocheń, D. (2024): Contribution to the a priori assessment of the value of the caving zone expansion coefficient in the forecast of ground surface uplift caused by the flooding of closed coal mines in the Ruhr region / Germany. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, DOI: 10.24425/bpasts.2024.148611

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 Bergbauggebiet. 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 Durchbauungsgrades 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.

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.

Wikipedia - 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.

7.2. Projektunterlagen

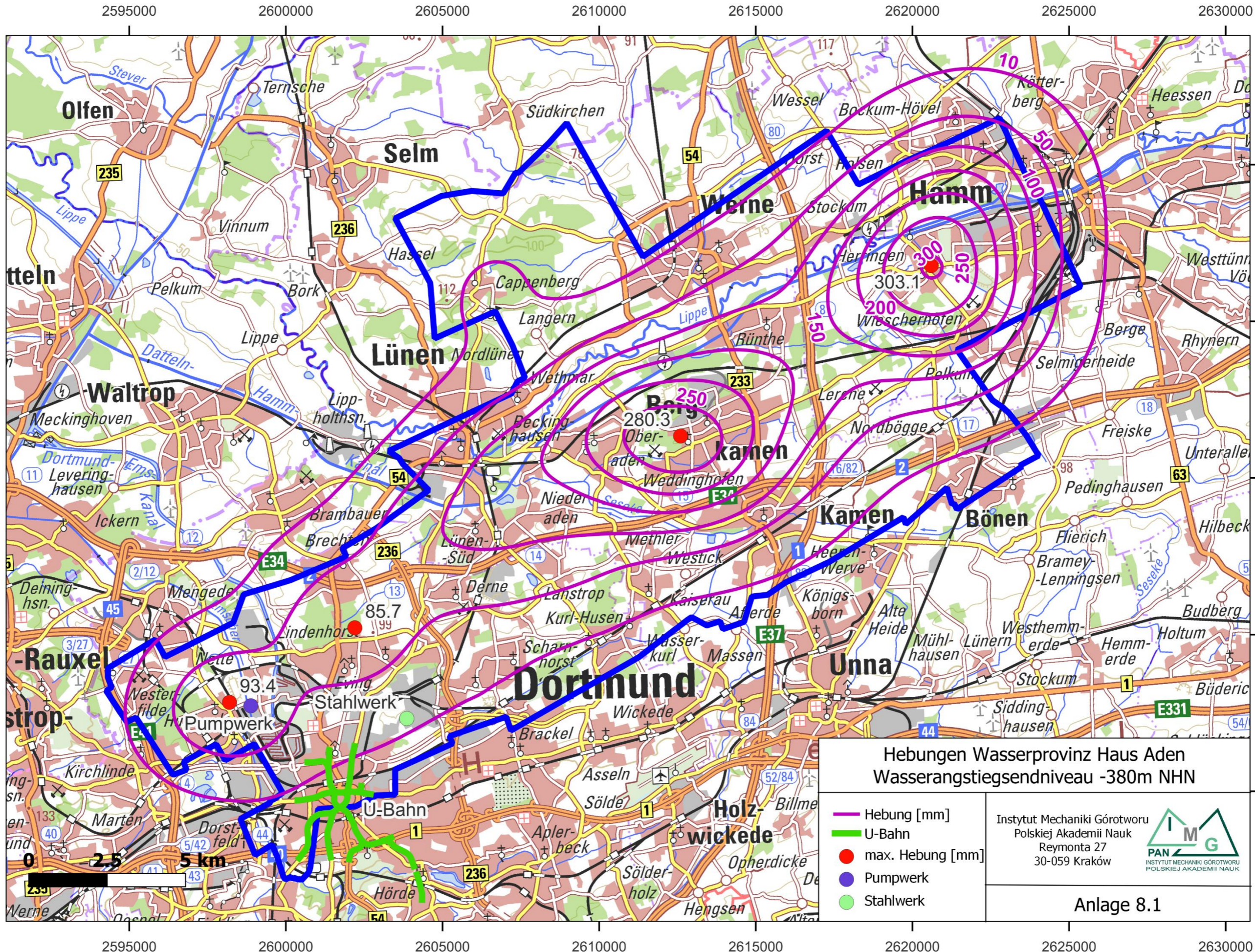
Heitfeld, M., Rosner, P., Mohrdieck, P. (2023): Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen des stufenweisen Grubenwasseranstieg im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden. Bewertung des Einwirkungspotentials und Monitoringprogramm für ein optimiertes Anstiegsniveau bei -380m NHN. Ingenieurbüro Heitfeld – Schetelig GmbH, Aachen, den 6. Oktober 2023. Im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft, Essen.

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.

Sroka, A., Tajduś, K., Misa, R., Dudek, M., Mrocheń, D. (2022): Gutachterliche Stellungnahme zur Quantifizierung der durch den Grubenwasseranstieg in der Wasserprovinz Lohberg zu erwartenden Bodenbewegungen und deren Bergschadensrelevanz, insbesondere für den ordnungsgemäßen Betrieb sensibler Infrastruktureinrichtungen, einschließlich untertägiger Verkehrseinrichtungen und Rohrfernleitungen. Markscheiderisch - bergschadenkundliche Bewertung. Im Auftrag der RAG Aktiengesellschaft, Krakau, Mai – Juli 2022.

8. Anlagen

8.1. Prognostizierte Hebungen im Bereich der Wasserprovinz Haus Aden bei einem Grubenwasseranstieg bis zum Endniveau von -380 m NHN.



Hebungen Wasserprovinz Haus Aden
Wasserangstiegsendniveau -380m NHN

- Hebung [mm]
- U-Bahn
- max. Hebung [mm]
- Pumpwerk
- Stahlwerk

Instytut Mechaniki Górotworu
Polskiej Akademii Nauk
Reymonta 27
30-059 Kraków

Anlage 8.1