



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Ausschlusskriterium Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke

Erläuterung zur Anwendungsmethode
in Nordrhein-Westfalen

Stand 28.09.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2	
Abbildungsverzeichnis	3	
Tabellenverzeichnis	3	
Abkürzungsverzeichnis	3	
1	Veranlassung und Einleitung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Abgrenzung des Gebirgsbereichs mit negativer Beeinflussung	7
2.2	Auswahl des Indikators	8
3	Verfahren zur Abschätzung der Beeinflussungsbereiche	9
3.1	Abschätzung mittels analytischem Ansatz	9
3.2	Abschätzung mittels vereinfachtem numerischen Modell	11
4	Anwendung der Verfahren auf ausgewählte Bergwerke	14
4.1	Verwendete Eingangsparameter	14
4.2	Verifizierung/Abgleich mit Messdaten	16
4.3	Darstellung exemplarischer Berechnungsergebnisse	16
4.4	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	18
5	Fazit und Empfehlungen	20
6	Literaturverzeichnis	21
Anzahl der Blätter dieses Dokumentes		22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der geometrischen Größen und Zustandsgrößen für das analytische Verfahren	10
Abbildung 2:	Ausschnitt des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“ mit Angaben zur Tiefe und Ausdehnung in Metern	12
Abbildung 3:	Überlagerung mehrerer Sohlenrisse des Bergwerks „Westfalen“ zur Ermittlung der geometrischen Eingangsdaten der Modellierung	15
Abbildung 4:	Exemplarische Darstellung der Auswertung der kleinsten Hauptspannung $\sigma_3/\sigma_{3,GSZ}$ des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“	17
Abbildung 5:	Exemplarische Darstellung der von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{eqv}/\sigma_{eqv,GSZ}$ des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung der geometrischen Eingangsdaten der Bergwerke	15
Tabelle 2:	Angesetzte Materialparameter (für alle Bergwerke)	16
Tabelle 3:	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse	19

Abkürzungsverzeichnis

Δ	Änderung
$\Delta\sigma$	Spannungsänderungen
$\Delta\sigma_{1\%, 4\%, 5\%}$	Beträge der Spannungsänderung gegenüber dem initialen Zustand
$\Delta\sigma_3$	Änderung der kleinsten Hauptspannung
$\Delta\sigma_{eqv}$	Änderung der von-Mises-Vergleichsspannung
ϕ	Reibungswinkel
ν	Poissonzahl
σ_3	Kleinste Hauptspannung
σ_{eqv}	von-Mises-Vergleichsspannung
$\sigma_H \sigma_h$	Horizontalspannung
σ_{ij}	Komponenten des Spannungstensors
σ_r	Radialspannung
σ_t	Tangentialspannung
σ_v	Vertikalspannung

σ_z	Zugfestigkeit
ψ	Dilatanzwinkel
3D, 2D	Dreidimensional, zweidimensional
a	Abbaufaktor
ALZ	Auflockerungszone
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
c	Kohäsion
D_{eff}	Effektiver Hohlraumdurchmesser
E	Elastizitätsmodul (unverritztes Gebirge)
E*	Elastizitätsmodul (Abbaubereich)
EdZ	Excavation disturbed Zone (beeinflusster Gebirgsbereich)
GOK	Geländeoberkante
GSZ	Gebirgsspannungszustand
H	Teufenbereich
HdZ	Hydraulic disturbed zone (hydraulisch beeinflusster Gebirgsbereich)
L	Laterale Erstreckung
p_a	Äußere Spannung
p_i	Innere Spannung
r	Hohlraumradius / Abbauradius
r_{eff}	Effektiver Hohlraumradius
StandAG	Standortauswahlgesetz

1 Veranlassung und Einleitung

Gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG) werden Bergwerke, in denen Bodenschätze gewonnen werden bzw. wurden, als Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ausgeschlossen. Der Ausschluss von Bergwerken wird im StandAG mit dem Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ in (§ 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG) geregelt.

Grundlage der Anwendungsmethode für Bergbau im Rahmen des Ausschlusskriteriums „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ sind die Beeinflussungsbereiche, die – je nach landesspezifischem Vorgehen und Verfügbarkeit – von den Bergbehörden ausgewiesen bzw. durch die BGE selbst abgeschätzt werden. Die Einschätzung der Beeinflussungsbereiche durch die BGE erfolgt auf Grundlage der an die Erdoberfläche projizierten größten lateralen Erstreckung eines Bergwerkes anhand vorliegender Risswerke. Das hierfür verwendete Verfahren mit Berücksichtigung eines Grenzwinkels wird in BGE (2020h) beschrieben.

Die Bewertung der Datenlage und -menge zu den Regionen des Steinkohlenbergbaus in Nordrhein-Westfalen erfordert ein methodisches Vorgehen, das von der vorher beschriebenen Ausschlussmethode abweicht (BGE 2020h).

Steinkohlenbergwerke sind in Nordrhein-Westfalen auf Basis sogenannter „Rissblattumhüllender“ digital erfasst. Solche Rissblattumhüllende repräsentieren Ränder analoger Kartenblätter, auf denen das Grubengebäude dargestellt ist. Durch das Übereinanderlegen und Zusammenführen sämtlicher zu einem Bergwerk gehörender Kartenränder entsteht eine Fläche, die das darunterliegende Bergwerk in Hinblick auf seine laterale Ausdehnung abdeckend erfasst. Der Abstand zwischen Rissblattumhüllender und der tatsächlichen lateralen Erstreckung eines Bergwerkes ist jedoch variabel und reicht von einigen Metern bis hin zu wenigen Kilometern (BGE 2020h).

Ein Ausschluss auf Basis dieser Rissblattumhüllenden kann im Randbereich der Steinkohlereviere in Nordrhein-Westfalen ggf. zu einer Überschätzung von ausgeschlossenen Gebieten führen. Um dies zu vermeiden, wurde der tatsächliche geometrische Zusammenhang zwischen der maximalen lateralen Ausdehnung des Grubengebäudes und der dazugehörigen Rissblattumhüllenden von der BGE für eine Stichprobe von fünf Bergwerken untersucht. Um ferner die räumliche Distanz zwischen Rissblattumhüllender und dem tatsächlich aufgefahrenen Grubengebäude in Hinblick auf eine mögliche Überschätzung von ausgeschlossenen Gebieten zu bewerten, ist zudem eine Abschätzung der Ausdehnung von Beeinflussungsbereichen nötig (Entfernung, in der ein Ausschluss um das Grubengebäude herum erfolgt). Die hierbei verwendete Methode weicht von der allgemeinen Verfahrensweise der Abschätzung von Beeinflussungsbereichen auf Basis des steilsten Grenzwinkels (BGE 2020h) ab. Anhand einer Stichprobe von fünf Bergwerken erfolgt hierfür bereits in Phase 1, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens eine detailliertere Abschätzung des Bereichs, in dem nach § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG „*negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges [...] zu besor-*

gen sind“. Dazu führt die BGE auf Basis analytischer und numerischer Verfahren rechnerische Abschätzungen durch, um die Änderungen des Spannungszustandes im Gebirge zu erfassen und diese in Abhängigkeit des Abstandes zum Abbaubereich zu quantifizieren (BGE 2020h).

In der vorliegenden Unterlage wird die Methodik der Abschätzung der durch die Bergwerke potenziell negativ beeinflussten Bereiche erläutert.

2 Grundlagen

2.1 Abgrenzung des Gebirgsbereichs mit negativer Beeinflussung

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG sind jene Bereiche auszuschließen, in denen das Gebirge durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt ist, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind. Der Gesetzestext "*negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität*" (§ 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG) wird dahingehend ausgelegt, dass ein potenziell negativer Einfluss auf den Spannungszustand und/oder die Permeabilität betrachtet werden kann. Die Verknüpfung mit "und" ist hier widersprüchlich, da bspw. im Fall eines bruchhaft verformten Gebirges nach dem Bruch in der Regel ein günstigerer Spannungszustand (Abbau Deviator und Niveau) vorliegt, obwohl die Permeabilität in dem Bereich stark ansteigt.

Auf Basis dieser Anpassung wird durch die BGE zur Abgrenzung von potenziell negativ beeinflussten zu unbeeinflusstem Gebirge im Folgenden die äußere Grenze des beeinflussten Gebirgsbereiches (EdZ, excavation disturbed zone) herangezogen, in welchem zwar keine Veränderung der mechanischen Eigenschaften oder strukturelle Schädigung eintritt, jedoch eine Veränderung des mechanischen Gebirgsspannungszustandes erfolgt. So wird im Hinblick auf den vorsorgenden Schutzgedanken der Formulierung des StandAG Rechnung getragen, dass auch potenzielle negative Einflüsse zu berücksichtigen sind.

Die EdZ stellt eine äußere Umhüllende auch für die Bereiche mit stärkerer Beeinflussung/Schädigung dar. Folgende Zonen werden dabei räumlich ebenfalls erfasst:

- "Plastische Zone": bruchhaft verformtes Gebirge; Entstehung von Makrorissen infolge Überschreitung der Gebirgsfestigkeit/Bruchgrenze und
- "Geschädigter Gebirgsbereich" oder Auflockerungszone (ALZ, ist gleichbedeutend mit der „excavation damaged zone“): aufgelockertes Gebirge, welches infolge Überschreitung der Dilatanzfestigkeit unterhalb der Bruchgrenze strukturell (vor-) geschädigt ist. Durch Entstehen von Mikrorissen erfolgt eine Veränderung der initialen hydraulischen Eigenschaften.

Anmerkung: In Abhängigkeit der hydraulischen Gegebenheiten kann ein hydraulisch beeinflusster Gebirgsbereich (HdZ, hydraulic disturbed zone) vorliegen, d. h. ein Gebirgsbereich, in dem zwar keine Veränderung der hydraulischen Eigenschaften, jedoch eine Veränderung des Porendruckfeldes erfolgt. In Abhängigkeit von Zeit und Raum kann dies in die geomechanisch günstige (Porendruckabbau) oder ungünstige Richtung führen. Für lange Zeiträume der Drainage und/oder hohe Durchlässigkeit kann die HdZ deutlich weiter ausgedehnt als die EdZ sein.

2.2 Auswahl des Indikators

Als Indikator einer möglichen negativen Beeinflussung wird gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG eine signifikante Veränderung des mechanischen Gebirgsspannungszustandes betrachtet. Es werden sowohl Spannungserhöhungen als auch -reduktionen gegenüber dem initialen Zustand (vor umgehenden Bergbau) als potenziell negativ betrachtet. Hintergrund hierfür ist, dass eine Veränderung des Spannungszustandes in die geomechanisch ungünstige Richtung:

- mit einer Erhöhung des Spannungsdeviators bzw. des Ausnutzungsgrades der Festigkeit (relevant für das Dilatanzkriterium) und/oder
- der Absenkung der kleinsten Hauptspannung σ_3 (relevant für das Fluidruckkriterium)

einhergehen kann. Ferner kann die Änderung des Spannungszustandes auch bei Spannungszuständen unterhalb der Schädigungsgrenze eine (graduelle) Veränderung der Permeabilität bewirken (Abhängigkeit der Permeabilität vom Spannungszustand).

Als nicht signifikante Beträge der Spannungsänderung gegenüber dem initialen Zustand werden als Arbeitshypothese ca. 1 % bis 4 % und 5 % zugrunde gelegt. Diese Werte repräsentieren typische Grenzwerte derartiger gebirgsmechanischer Fragestellungen.

Negative Einflüsse auf die Permeabilität werden hier nicht explizit bewertet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Bereich der EdZ (bei dem eine Erhöhung der Permeabilität per se nicht ausgeschlossen werden kann) den der ALZ mit struktureller Schädigung und Entstehen von Sekundärporosität abdeckt.

3 Verfahren zur Abschätzung der Beeinflussungsbereiche

Zur Abschätzung des „Einflussbereiches bergbaulicher Aktivitäten“ werden ein analytisches sowie ein numerisches Verfahren verwendet. Beide Verfahren zielen darauf ab, Änderungen des Spannungszustandes im Gebirge zu erfassen und sie in Abhängigkeit des Abstandes zum Abbaubereich zu quantifizieren.

Anmerkung: beide Verfahren erfordern zum Teil deutliche Abstraktionen und Vereinfachungen der realen Gegebenheiten. Die jeweils zugrundeliegenden Annahmen und Vereinfachungen werden nachfolgend an den entsprechenden Stellen benannt. Fakt ist, dass neben der Kenntnis zum Bergwerk/Grubengebäude selbst noch eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren auf die Ausdehnung der ALZ und EdZ eines gegenwärtigen oder abgeworfenen Bergwerkes existieren, wie beispielsweise

- (ggf. heterogene und anisotrope) Gebirgsfestigkeit und ggf. rheologisches Verhalten des Gebirges,
- initiale (ggf. anisotrope) Gebirgsspannung,
- Geologie/Tektonik,
- Standzeit,
- Auffahrungszeitpunkt und -verfahren sowie Ausbau- und Sicherungsmittel,
- Versatzzeitpunkt, -material und -verfahren,
- Gebirgstemperatur,

Ungeachtet der zu treffenden Annahmen und starken Abstraktionen, welche für die vereinfachten numerischen Analysen Anwendung finden, werden die im Folgenden beschriebenen Modelle (siehe Kapitel 3.2) auf die komplexe bergbauliche Situation im Ruhrgebiet angewendet. Durch die vereinfachten analytischen Lösungen (siehe Kapitel 3.1) wird die Plausibilität der Ergebnisse abgeschätzt. Dieses Vorgehen beruht auf der Einschätzung, dass die Daten insbesondere für den Altbergbau nicht in der hinreichenden Güte vorliegen, um aufwendige bzw. aufwendigere Abschätzungen/Berechnungen rechtfertigen zu können.

Beide Verfahren betrachten lediglich die mechanische Problemklasse. Eine hydraulische/hydromechanische Beeinflussung des angrenzenden Gebirges durch den Bergbau wird nicht betrachtet.

3.1 Abschätzung mittels analytischem Ansatz

Aufgrund der Anwendungsgrenzen dient das analytische Verfahren einer groben Abschätzung der Größenordnung des Einwirkungsbereichs und dem Plausibilitätstest (Vergleich mit den Ergebnissen der vereinfachten numerischen Modellierung). Das analytische Verfahren zur Abschätzung der Spannungsänderungen im bergwerksfernen Gebirge basiert auf dem Prinzip von St. Venant der Elastizitätstheorie. Die Spannungsän-

derung im als homogen und unendlich angenommenen Raum mit elastischen Eigenschaften nimmt hierbei mit zunehmendem Abstand umgekehrt proportional zum Quadrat des Hohlraumradius r ab:

$$\sigma_{ij} \sim \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

Tangentialspannung σ_t und Radialspannung σ_r ermitteln sich wie folgt:

$$\sigma_t = (p_a - p_i) \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^2 + p_a \quad (2)$$

$$\sigma_r = (p_i - p_a) \cdot \left(\frac{r}{x}\right)^2 + p_a \quad (3)$$

Hierbei sind p_a die äußere Spannung bzw. isotrope Gebirgsspannung, p_i die innere Spannung normal zur Abbaukontur (Stützdruck, isotrop) und r der Abbauradius.

Bei dieser vereinfachten Betrachtung findet lediglich eine geometrische Größe („Abbauradius“ r) sowie der Spannungszustand Verwendung (siehe Abbildung 1).

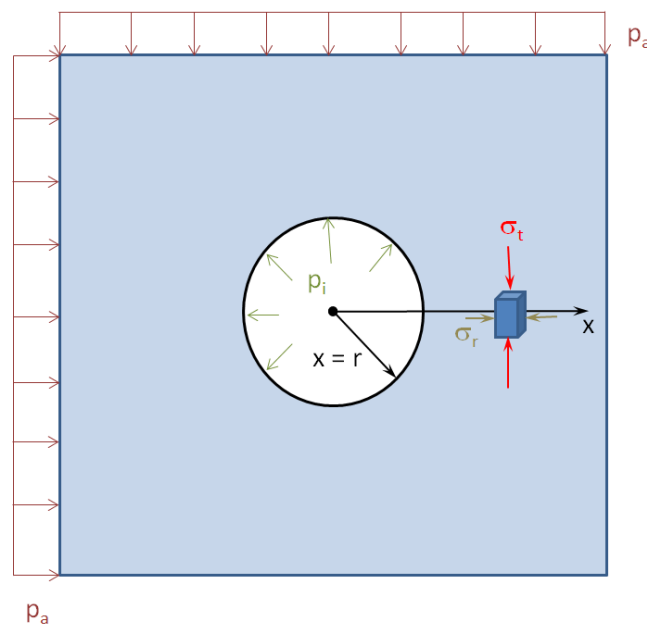


Abbildung 1: Schematische Darstellung der geometrischen Größen und Zustandsgrößen für das analytische Verfahren

Unter bestimmten Bedingungen ist es möglich, auch komplexere Abbausysteme mittels einer charakteristischen Vergleichslänge („effektiver Hohlraumdurchmesser“ D_{eff} bzw. „-radius“ $r_{eff} = \frac{D_{eff}}{2}$) zu beschreiben. Dies kann bspw. im Fall höherer Durchbaugrade und geringmächtiger Tragelemente durch die Vernachlässigung der Tragwirkung von Schweben und Pfeilern erfolgen. In diesem Fall kann D_{eff} als repräsentative Erstreckung des Bergwerkes (Pfeiler und Schweben vernachlässigend) in einer betrachteten

Ebene aufgefasst werden. Die Grenze des „Einwirkbereiches“ kann dann in Normalenrichtung zu dieser Ebene, beginnend am Rand des Bergwerkes abgeschätzt werden. Im vorliegenden Fall der zu betrachtenden Steinkohlenbergwerke treffen i. d. R. folgende Spezifika zu:

- Abbau von Flözen auf mehreren Sohlen über einen Teufenbereich (H) von mehreren hundert Metern,
- große laterale Erstreckung (L) der Abbaugrenzen von mehreren km mit L deutlich größer H.

Zur Beschreibung der Spannungsänderung jenseits der Abbaugrenze wird das Bergwerk durch einen „liegenden Zylinder“ mit $D_{eff} = H$ beschrieben. Die Abbaugrenze wird bei $x = r$ angesetzt. Das Modell „liegender Zylinder“ ist hinsichtlich der räumlichen Erstreckung in Abbaurichtung nicht konservativ, da die real großflächige geometrische Ausprägung der Steinkohlenbergwerke vernachlässigt wird.

Für die konservative Annahme, dass kein Innendruck (Versatzdruck/Stützdruck $p_i = 0$) wirkt, können gemäß Gleichung (2) und (3) die Spannungsänderungen mit den Abständen zur Abbaugrenze korreliert werden. Als relevante Beträge der Spannungsänderung gegenüber dem initialen Zustand werden als Arbeitshypothese ca. 1 bis 4 % und 5 % zugrunde gelegt. Hierbei wird unterstellt, dass das Gebirge keine ausgeprägten rheologischen Eigenschaften besitzt. Andernfalls sind für rheologisches Gebirge größere Abstände vorzusehen und ggf. in Abhängigkeit von Standzeit, Kriechfähigkeit und Versatz separat abzuschätzen. Die Spannungsänderungen ergeben sich wie folgt:

$$\Delta\sigma_{1\%} = 4,5 \times D_{eff} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma_{4\%} = 2 \times D_{eff} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_{5\%} = 1,735 \times D_{eff} \quad (6)$$

3.2 Abschätzung mittels vereinfachtem numerischen Modell

Die Abschätzung auf Basis einer numerischen Modellierung ermöglicht gegenüber der analytischen Abschätzung zusätzlich die Berücksichtigung der lateralen Ausdehnung, verschiedener geometrischer Konstellationen sowie elasto-plastischen Materialverhaltens.

Geometrisches Modell/Vereinfachungen

Aufgrund der o. g. Spezifika der Bergwerke werden die Berechnungen zur Abschätzung mittels 2D-Modellen mit ebenem Verzerrungszustand („Scheibe“) durchgeführt. Die Berechnungsmodelle repräsentieren vertikale Schnitte, näherungsweise mittig durch das Bergwerk. Der Abbau auf mehreren Sohlen (siehe Abbildung 3) wird vereinfachend dadurch abgebildet, dass im Modell der Abbaubereich zwischen oberster und unterster Sohle des Bergwerks homogenisiert wird (siehe Abbildung 2).

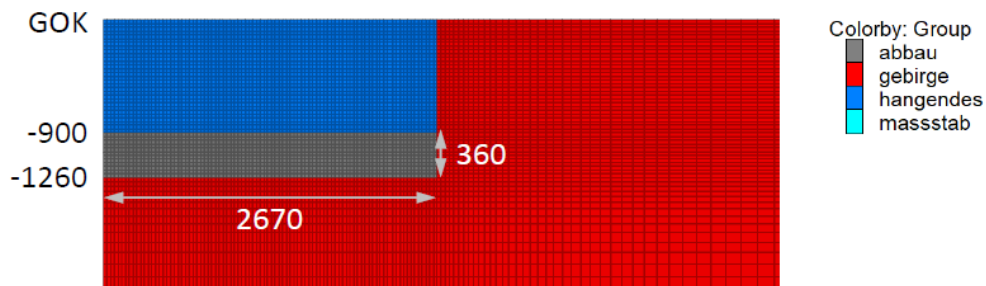


Abbildung 2: Ausschnitt des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“ mit Angaben zur Tiefe und Ausdehnung in Metern

Im Zentrum des Bergwerkes (linker Modellrand in Abbildung 2) werden Symmetrierandbedingungen genutzt.

Die Modelloberkante entspricht der Geländeoberkante (GOK). Die übrigen Modellränder werden in Abhängigkeit der Größe der Bergwerke so gewählt, dass Randeffekte vermieden werden, d. h. die laterale Erstreckung des Modells bis zum rechten Modellrand beträgt ca. 10 km bis 40 km; die vertikale Erstreckung des Modells ca. 5 km bis 15 km (in Abbildung 2 nicht mit dargestellt).

Anhand einer Vergleichsberechnung mit einem 3D-Modell (Viertel des Bergwerks bei Ansatz von Symmetrierandbedingungen) wurde die Zulässigkeit der Vereinfachung in einer 2D-Darstellung geprüft.

Vernetzung

Die Modelle werden unter Verwendung von Hexaedern regelmäßig vernetzt. Sie besitzen eine Zone in „Tiefenrichtung“ (normal zum Berechnungsschnitt).

Randbedingungen

Es werden Spannungsrandbedingungen verwendet. An den seitlichen Modellrändern und der Modellunterkante werden die Verschiebungen in die jeweiligen Normalenrichtung unterbunden. Durch Verhinderung der Verschiebungen normal zum Berechnungsschnitt wird ein ebener Verzerrungszustand erreicht.

Materialverhalten

Es wird ideal elastisch und ideal plastisches Materialverhalten mit einer Fließbedingung nach Mohr-Coulomb mit Zugspannungsbegrenzung (tension cut-off) unterstellt.

Der gesamte Modellbereich wird als homogen und isotrop angenommen. Eine Ausnahme stellt der Abbaubereich dar. Dieser wird mit einer reduzierten Systemsteifigkeit (E^*) modelliert. Das Tragverhalten wird in diesem Modellbereich homogenisiert. Es erfolgt keine explizite Abbildung der Tragelemente (Pfeiler, Schweben, Verbruch etc.).

Berechnungssequenz

Es wird ein transversal-anisotroper Grundspannungszustand initialisiert. Hierbei stellt die Vertikalspannung σ_v die größte Spannungskomponente dar und entspricht dem lithostatischen Teufendruck, welcher sich für eine angesetzte Wichte von 24 kN/m^3 ergibt. Die

Horizontalspannungskomponenten sind gleich groß (Annahme: $\sigma_h = \sigma_H = 0,5 * \sigma_v$). Ausgehend von diesem Grundspannungszustand erfolgt der Parametertausch im Abbaubereich (Simulation Bruchbau durch Reduktion der Systemsteifigkeit) mit anschließender Gleichgewichtsiteration.

Berechnungsmethode/Berechnungscode

Die Berechnungen werden mit dem Programm FLAC^{3D} durchgeführt. FLAC^{3D} verwendet die Methode der Finiten Differenzen mit einem expliziten Verfahren sowie eine gemischte Diskretisierungstechnik, die eine Vernetzung mit unstrukturierten – also der realen geometrischen und geologischen Situation angepassten – Gittern erlaubt. Die hier durchgeführte Berechnung ist geometrisch linear.

Auswertung und Auswertegrößen

Entsprechend Kapitel 2.2 werden die Änderungen folgender Zustandsgrößen/Indikatoren gegenüber dem initialen Spannungszustand bewertet:

- kleinste Hauptspannung $\Delta\sigma_3$:
Relevanz für die Erfüllung/Verletzung des Fluiddruckkriteriums
- von-Mises-Vergleichsspannung $\Delta\sigma_{\text{eqv}}$ (Maß für die deviatorische Beanspruchung des Gebirges):
Relevanz für die Erfüllung/Verletzung des Dilatanzkriteriums

Es werden die Entfernungen ab „Abbaukante“ ermittelt, für die eine relevante Änderung der Zustandsgrößen vorliegt. Jenseits dieser „Grenze“ wird unterstellt, dass das Gebirge (mechanisch) ungestört ist und die Spannungen gegenüber dem initialen Spannungszustand nahezu unverändert sind.

Die Beeinflussung der Gebirgsbereiche oberhalb 300 m Teufe wird nicht betrachtet.

4 Anwendung der Verfahren auf ausgewählte Bergwerke

Anhand einer Stichprobe von folgenden fünf Bergwerken aus dem Randbereich des Steinkohlenbergbaus in Nordrhein-Westfalen wird die Ausdehnung von Beeinflussungsbereichen abgeschätzt:

- Auguste-Victoria
- Westfalen
- Friedrich Heinrich
- Walsum
- Stock und Scherenberg

Es kommen die oben beschriebenen Verfahren (Kapitel 3.1 und 3.2) zur Anwendung. Die Bergwerke werden hierbei methodisch identisch behandelt.

4.1 Verwendete Eingangsparameter

Geometrische Daten

Im Ergebnis einer Recherche werden die in Tabelle 1 zusammengestellten geometrischen Eingangsdaten für das analytische und numerische Verfahren verwendet. Für das zu Plausibilitätsprüfungen herangezogene analytische Verfahren (Kapitel 3.1) stellt die vertikale Höhe des Abbaubereiches H unter dem vereinfachenden Ansatz $H = D_{eff}$ die maßgebende geometrische Kenngröße dar. Die Höhe ergibt sich als Differenz der maximalen und minimalen Teufe des jeweiligen Bergwerkes (Niveau von Abbausohlen mit relevantem Durchbauungsgrad bzw. Niveau abgebauter Flöze).

Für die numerischen Analysen (Kapitel 3.2) wird vereinfachend unterstellt, dass die (real lokal anzutreffende) maximale und minimale Teufe entsprechend Tabelle 1 der Unter- bzw. Oberkante des Abbaubereiches im Modell entsprechen. Diese maximale vertikale Erstreckung wird für das gesamte Bergwerk angenommen.

Die vereinfachte numerische Modellierung erfordert zusätzlich Angaben zur lateralen Erstreckung des Bergwerkes. Hierfür wird – je nach flächenhafter Ausrichtung des Bergwerkes – ein Radius (siehe bspw. Abbildung 3) oder die Hälfte (im flächenmäßigen Zentrum des Bergwerkes Symmetrierandbedingungen angenommen) der größten lateralen Erstreckung in Richtung Unverritztes verwendet. Es wird vereinfachend angenommen, dass die oberste und unterste Abbausohle auch im Randbereich des Bergwerkes aufgeschlossen ist. Der Abbaubereich wird somit räumlich abdeckend erfasst.



Abbildung 3: Überlagerung mehrerer Sohlenrisse des Bergwerks „Westfalen“ zur Ermittlung der geometrischen Eingangsdaten der Modellierung

Tabelle 1: Zusammenstellung der geometrischen Eingangsdaten der Bergwerke

Bergwerk	Abbaubereich			
	Min. Teufe in m	Max. Teufe in m	Höhe H, vertikal in m	Länge L/2, lateral in m
Auguste-Victoria	546	1250	704	3500
Westfalen	892	1260	368	2670
Friedrich Heinrich	226	1103	877	6600
Walsum	250	1104	854	7100
Stock und Scherenberg	142	590	448	725

Materialparameter

Für alle fünf Bergwerke wird das in Kapitel 3.2 genannte ideal elastisch-ideal plastische Materialverhalten nach Mohr-Coulomb zur Beschreibung des Gebirgsverhaltens verwendet. Die verwendeten Modellparameter werden in Tabelle 2 aufgeführt. Sie wurden

auf der Basis von TU Clausthal (2015) für das Bergwerk „Auguste-Victoria“ abgeschätzt und werden auf die anderen Bergwerke übertragen.

Der gesamte Modellbereich wird, wie oben beschrieben, als homogen und isotrop angenommen. Eine Ausnahme stellt der Abbaubereich dar. Dieser wird mit einer reduzierten Systemsteifigkeit $E^* / E = 0,1$ modelliert (Tragwirkung der Pfeiler, Schweben und des Verbruchs werden somit im Modellbereich homogenisiert). Die verminderte Systemsteifigkeit korreliert mit dem in TU Clausthal (2015) und TU Clausthal (2018) aufgeführten Abbaufaktor $a = 0,9$ der Bergwerke.

Tabelle 2: *Angesetzte Materialparameter (für alle Bergwerke)*

Parameter	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul E (unverritztes Gebirge)	GPa	10
Elastizitätsmodul E* (Abbaubereich)	GPa	1 ($E^* = \frac{1}{10} \times E$)
Poissonzahl ν	-	0,33
Reibungswinkel ϕ	°	30
Kohäsion c	MPa	3,5
Zugfestigkeit σ_z	MPa	0,1
Dilatanzwinkel ψ	°	10

4.2 Verifizierung/Ableich mit Messdaten

In TU Clausthal (2015) werden für das Bergwerk „Auguste-Victoria“ Messdaten übertägiger Senkungsmessungen dokumentiert. Es wurden Senkungsbeträge bis ca. 7 m an der Tagesoberfläche festgestellt. Für die Berechnung mit reduzierter Systemsteifigkeit $\frac{E^*}{E} = 0,1$ liegen die Berechnungsergebnisse zur Senkung (je nach Variante ca. 6,8 m bis ca. 10 m) in der Größenordnung der Messungen. Da der Abbaufaktor $a = 0,9$ auch für die Bergwerke „Westfalen“, „Friedrich Heinrich“ und „Walsum“ zutrifft (siehe TU Clausthal 2018) wird die reduzierte Systemsteifigkeit E* auch auf die weiteren Bergwerke übertragen.

4.3 Darstellung exemplarischer Berechnungsergebnisse

Wie oben beschrieben, werden anhand der vereinfachten numerischen Modellierung die Änderungen der kleinsten Hauptspannung $\Delta\sigma_3$ sowie der von-Mises-Vergleichsspannung $\Delta\sigma_{\text{eqv}}$ gegenüber dem initialen Spannungszustand ausgewertet.

Die Berechnungsergebnisse für die o. g. Spannungsänderungen werden anhand von Abbildung 4 und Abbildung 5 exemplarisch für das Modell des Bergwerks „Westfalen“ dargestellt, siehe hierzu auch Abbildung 2 und Abbildung 3. Der Abbaubereich wird in den Abbildungen dunkelgrau dargestellt. Hellgrau hinterlegt ist der Bereich bis 300 m

Teufe, welcher für die Bewertung ausgeschlossen wird. Es werden beispielhaft die Spannungsänderungen bis zu einem Betrag von 5 % dargestellt. Über- bzw. Unterschreitungen dieses Betrages erscheinen in den Abbildungen flächenhaft hellgrau.

Anhand Abbildung 4 ist eine Spannungsentlastung (Abnahme der kleinsten Hauptspannung) im Hangenden und Liegenden des Abbaubereiches ersichtlich. In lateraler Richtung liegt im unverritzten Gebirgsbereich im Niveau der Abbaukante eine Spannungserhöhung gegenüber dem Ausgangszustand vor. Die maximale Entfernung einer Beeinflussung des Gebirges mit $\Delta = 5\%$ liegt in Form einer Spannungsentlastung im Hangenden in ca. 3 km Entfernung zur Abbaukante vor (am Rand des Senkungstrichters).

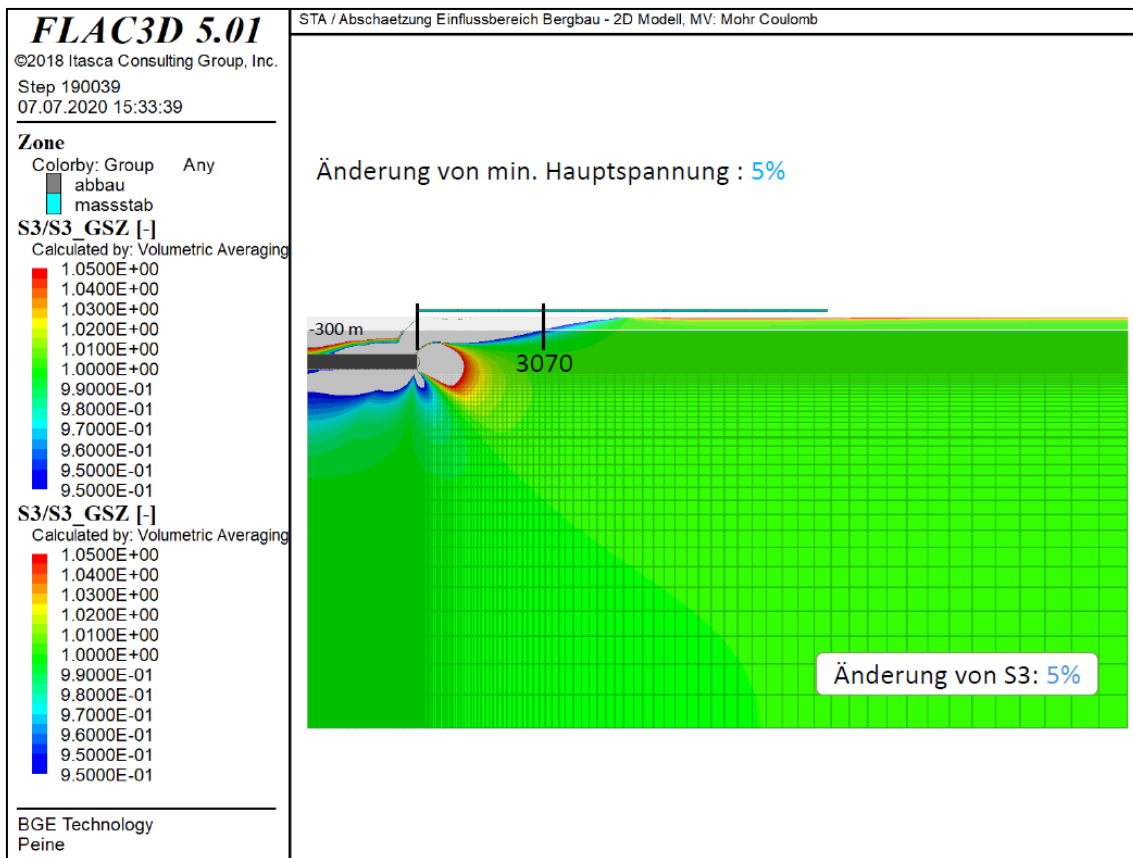


Abbildung 4: Exemplarische Darstellung der Auswertung der kleinsten Hauptspannung $\sigma_3/\sigma_{3,GSZ}$ des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“ (Über- und Unterschreitungen von 5 % gegenüber dem Ausgangszustand werden hellgrau dargestellt)

Abbildung 5 stellt exemplarisch die Auswertung für die Vergleichsspannung dar. Die maximale Entfernung einer Beeinflussung des Gebirges mit $\Delta = 5\%$ liegt hier in Form einer Spannungsentlastung im Hangenden in ca. 2,8 km Entfernung zur Abbaukante vor.

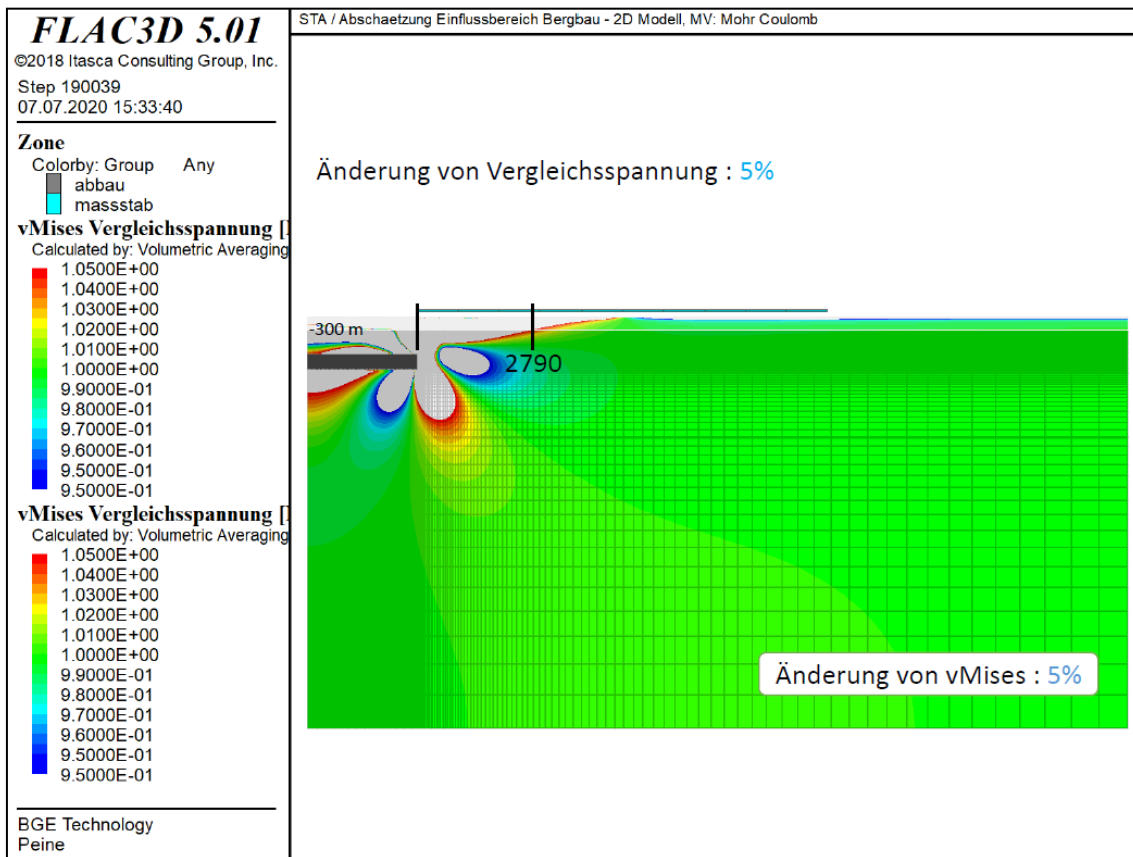


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{eqv} / \sigma_{eqv, GSZ}$ des Berechnungsmodells Bergwerk „Westfalen“ (Über- und Unterschreitungen von 5 % gegenüber dem Ausgangszustand werden hellgrau dargestellt)

4.4 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der vereinfachten numerischen Modellierung zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß einen Zusammenhang zwischen räumlicher Erstreckung des Bergwerks und rechnerischer Ausdehnung des Einwirkungsbereiches auf.

Für die weitere Bearbeitung sind Spannungsänderungen mit Beträgen von ca. 4 bis 5 % (rot markierte Werte) zugrunde gelegt. Diese Abweichung repräsentiert eine typische Bandbreite von Ergebnissen numerischer Verfahren für derartige geomechanische Fragestellungen und befindet sich mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb des Ergebnisraumes für die Bandbreite weiterer Ungewissheiten (Modell-Parameter und Datenungleichheiten).

Mit Ausnahme des Bergwerkes „Stock und Scherenberg“ ergeben sich Einwirkungsgebiete von 3 050 m (Bergwerk „Westfalen“) bis 3 650 m (Bergwerk „Friedrich Heinrich“). Der maßgebende maximale Abstand zum Bergwerk wird jeweils für die Auswertung der kleinsten Hauptspannung ermittelt. Insbesondere für große Teufenlagen des Bergwerkes reicht die Spannungsentlastung weit ins hangende Vorfeld, vgl. Abbildung 4.

Im Fall des Bergwerkes „Stock und Scherenberg“ (Altbergbau) liegt der maximale Betrag der Spannungsdifferenz als Erhöhung der deviatorischen Spannung vor. Es ist die von-Mises-Vergleichsspannung für die weitere Bearbeitung zu wählen (größerer Abstand gegenüber $\Delta\sigma_3$). Aufgrund der vergleichsweise geringen Teufenlage des Bergwerkes (142 m bis 590 m unter GOK) ist die Spannungsentlastung im angrenzenden Gebirgsbereich unterhalb 300 m weniger deutlich ausgeprägt als bei den tiefer liegenden Bergwerken.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse

Bergwerk	Analytische Abschätzung	Numerische Abschätzung			
	$\Delta\sigma = 5\%$ ($\Delta\sigma = 1\%$)	$\Delta\sigma_3 = 4\%$ (und 5%)	$\Delta\sigma_{\text{eqv}} = 4\%$ (und 5%)	$\Delta\sigma_3 = 1\%$	$\Delta\sigma_{\text{eqv}} = 1\%$
Auguste-Victoria	1220 (3170)	3250	1770	4500	3900
Westfalen	640 (1660)	3050	2800	4200	3920
Friedrich Heinrich	1520 (3950)	3650	3000	5850	4850
Walsum	1480 (3840)	3600	3000	5650	4800
Stock und Scherenberg	780 (2020)	120	500	1400	900

Die in **fetter** Schrift dargestellten Werte werden für die weitere Bearbeitung verwendet. Die Werte in *kursiver* Schrift stellen Ergebnisse des analytischen Verfahrens zu Vergleichszwecken dar.

Das Standardverfahren der BGE würde im Vergleich deutlich kleinere Beeinflussungsbereiche von 142 m bis 320 m ausweisen.

5 Fazit und Empfehlungen

Ungeachtet der zu treffenden Annahmen und starken Abstraktionen können vereinfachte numerische Analysen Anwendung finden, um die komplexe bergbauliche Situation im Ruhrgebiet zu bewerten. Aufgrund der realitätsnäheren Abbildung der Gegebenheiten (Geometrie, elasto-plastisches Materialverhalten) werden die Ergebnisse gegenüber dem analytischen Verfahren als belastbarer eingestuft. Durch die vereinfachten analytischen Lösungen wird die Plausibilität der numerischen Ergebnisse abgeschätzt.

Die Ergebnisse des analytischen Verfahrens liegen in der gleichen Größenordnung – unterschätzen aber aufgrund der geometrischen Restriktionen (real großflächiger Abbau gegenüber Annahme „liegender Zylinder“) tendenziell die Auswirkungen des Bergbaus auf den Spannungszustand im Unverritzten.

Wie bereits erwähnt, stellen die Analysen konservative Abschätzungen auf Basis zum Teil stark abstrahierter Modelle dar. Im Rahmen weiterführender Betrachtungen kann die Realitätsnähe gesteigert und Konservativitäten abgebaut werden. Ansatzpunkte hierbei sind beispielsweise bei entsprechender Verfügbarkeit der Daten:

- die Verwendung lokationsspezifischer geologischer Modelle,
- die Verwendung lokationsspezifischer geomechanischer Kennwerte,
- die Kalibrierung der Senkungen bzw. des Abbaufaktors anhand von Nivellements,
- die sohlgenaue Abbildung des Abbaus der Flöze.

6 Literaturverzeichnis

BGE (2020h): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist

TU Clausthal (2015): Bergwerk Auguste Victoria der RAG AG - Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereiches. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld

TU Clausthal (2018): Zusammenfassende Stellungnahme- Analyse von Senkungserscheinungen außerhalb des prognostizierten Einwirkungsbereichs aktiver und in jüngerer Zeit stillgelegter Steinkohlebergwerke der RAG AG. Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de