

# The Use of Numerical Simulations in Longwall Coal Mining

Numerical simulations provide a cost-effective way to plan and optimize a longwall. In this study numerical simulations are used to identify the necessary support pressure and the maximum distance between shield support and coal face in a target coal seam.

The stress state, as well as the subsidence and the excavation damage zone in the hanging wall of a longwall panel are determined. Based on the excavation damage zone, the groundwater barrier of the target seam is analyzed.

## Der Einsatz numerischer Simulationen für Strebbauprozesse im Kohlebergbau

Numerische Simulationen bieten einen kostengünstigen Weg, Strebbauprozesse zu planen und zu optimieren. In dieser Studie werden numerische Simulationen verwendet, um sowohl den nötigen Stützdruck als auch den maximalen Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufont in einem Kohleflöz zu bestimmen.

Der Spannungszustand, die Setzungen und die durch den Abbau erzeugte Auflockerungszone im Hangenden eines Strebfelds werden ermittelt. Basierend auf der Auflockerungszone wird die Grundwasserbarriere des Zielflöz analysiert.

### 1 Introduction

The development of new deposits and extensions of existing mines for further exploitation are challenging tasks for the mining industry. Changes in the geotechnical or hydrogeological conditions can have a significant impact on the productivity during the operation of a mine. While the rock mass and features like the stress field or the pore pressure and permeability are mostly heterogeneous, the mine design and the design of the excavation support are often based on empirical relations. To maintain operational security, as well as a high productivity and consequently to increase cost efficiency, these challenges must be considered and analyzed in detail.

Numerical models are able to represent the behavior of varying rock types under consideration of the complex in situ situations for a wide range of scales. Mine scale models can be used to select an appropriate mining method or compare different mining sequences. Furthermore, ground subsidence or cave propagations are analyzed in large scale models. Detailed models on a panel or drift scale can be used to optimize room and pillar designs or to investigate the interaction of excavation support and rock mass.

### 2 Numerical simulations in longwall mining

This study focusses on the use of numerical simulations in longwall mining, which is one of the most common mining techniques especially in coal mining in Europe and Asia. In the approximately 18,000 longwalls various setups are used (1). These setups are varying by e.g. the direction of advance or the deployment of the backfill or caving system. Two of the most important

### 1 Einleitung

Die Erschließung neuer Lagerstätten und die Erweiterung bestehender Bergwerke um weitere Abbaufelder sind anspruchsvolle Aufgaben für die Bergbauindustrie. Änderungen der geotechnischen oder hydrogeologischen Voraussetzungen können einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität des Bergwerks haben. Während sowohl das Gebirge als auch Eigenschaften wie Spannungsfeld, Porendruck und Permeabilität weitgehend heterogen verteilt sind, basiert die Planung des Bergwerks und des Streckenausbaus oft auf empirischen Beziehungen. Zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit sowie einer hohen Produktivität und letztendlich zur Steigerung der Kosteneffizienz müssen diese Herausforderungen im Detail betrachtet und analysiert werden.

Numerische Modelle können das Verhalten unterschiedlicher Gesteinsarten unter Berücksichtigung der komplexen In situ-Zustände für unterschiedliche Größenordnungen darstellen. Modelle im Bergwerksmaßstab können genutzt werden, um eine geeignete Abbaumethode auszuwählen, verschiedene Abbaureihenfolgen zu vergleichen oder Bodensenkungen oder die Ausbreitung von Hohlräumen zu analysieren. Dahingegen können kleinere, detaillierte Modelle im Streb- oder Streckenmaßstab dafür genutzt werden, Kammer-Pfeiler-Dimensionen zu optimieren oder das Verhalten von Streckenausbau und Gebirge zu untersuchen.

### 2 Numerische Simulationen im StREBBAU

Diese Studie fokussiert sich auf den Einsatz numerischer Simulationen im StREBBAU, der besonders im Kohlebergbau in Europa und Asien zu den gängigsten Abbaumethoden zählt. In den

parameters for longwall mining are the length of the longwall as well as the mechanical supporting pressure during the mining process. The length of the longwall, usually between 150 m and 350 m (Figure 1) is a critical aspect that needs to be evaluated from a technical, operational safety and economical point of view. The advance rate of the coal face needs to be analyzed, to ensure that the unsupported roof caves into the goaf as close as possible behind the shield support. This minimizes the load on the support shields. A better understanding of these parameters helps to select appropriate support shields and pressures.

In this study two numerical models were used to analyze the stress state and the subsidence in the roof of a coal seam. The excavation damage zone in the hanging wall was analyzed and the results were used for an assessment of the groundwater barrier. In addition, the maximum unsupported distance between support shield and coal face for different support pressures was analyzed.

### 3 Numerical simulations

The numerical simulations were performed using FLAC<sup>3D</sup> Version 7.0 (2). FLAC<sup>3D</sup> is a three-dimensional explicit finite-difference program for geomechanical numerical simulations. The simulation was divided into two parts. In the first simulation, a small and detailed model was created to analyze the maximum unsupported distance between the shields and the coal face. The shield pressure was varied to analyze its influence on the distance. In the second simulation, a larger model was created to perform a geomechanical analysis of the roof of a coal seam.

No.	Depth [m a.s.l.]	Thickness [m]	Lithology Icon	Lithology Label
19	2.8	9.5		Siltstone-fine
20	-6.4	9.1		Sandstone
21	-10.9	4.5		Siltstone-fine
22	-13.1	2.2		Siltstone-medium
23	-16	2.9		Coal
24	-19.7	3.7		Siltstone-medium
25	-24.6	4.9		Siltstone-fine
26	-38	13.4		Sandstone
27	-41.8	3.8		Siltstone-medium
28	-45.5	3.7		Coal
29	-51.5	6		Siltstone-medium
30	-62.4	10.9		Sandstone
31	-71.5	9.1		Siltstone-fine
32	-74.5	3		Siltstone-medium
33	-78.4	3.9		Coal
34	-82.1	3.7		Siltstone-medium
35	-103.2	21.1		Sandstone

Fig. 2. Representative profile from the Sokolovsky coal field, with the target seam marked in red. // Bild 2. Repräsentatives Profil aus dem Sokolovsky Kohlefeld mit dem rot markierten Zielflöz. Source/Quelle: Itasca

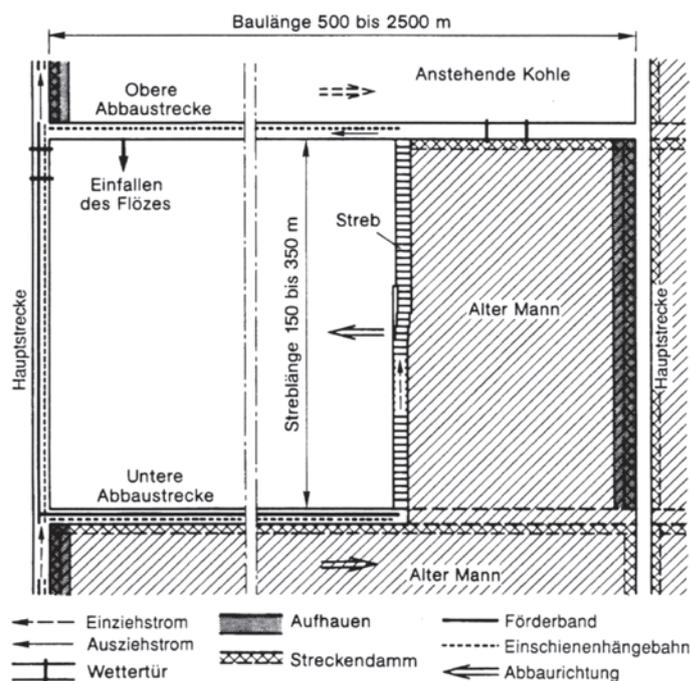


Fig. 1. Typical dimensions of a longwall panel (1).  
Bild 1. Typische Dimensionierung eines Strebbaus (1).

ca. 18.000 vorhandenen Streben werden verschiedene Konfigurationen verwendet (1), welche z.B. in der Vortriebsrichtung oder der Anwendung des Versatz- oder Abbausystems variieren. Zwei der wichtigsten Parameter für den Strebbau sind die Länge des Strebs sowie der mechanische Stützdruck während des Abbauvorgangs. Die Länge des Strebs, typischerweise zwischen 150 und 350 m (Bild 1), ist ein entscheidender Aspekt, welcher aus technischer, betriebssicherheitstechnischer und wirtschaftlicher Sicht bewertet werden muss. Die Vortriebsgeschwindigkeit der Abbaufont muss analysiert werden, um sicherzustellen, dass das Hangende im Alten Mann nah am Schildausbau verbricht. Dadurch wird die Belastung auf den Schildausbau minimiert. Ein besseres Verständnis dieser Parameter hilft bei der Wahl geeigneter Schildtypen und Stützdrücke.

In dieser Studie wurden zwei numerische Modelle verwendet, um den Spannungszustand und die Setzungen in der Firste eines Kohleflözes zu analysieren. Die durch den Abbau erzeugte Auflockerungszone im Hangenden wurde analysiert und die Ergebnisse für eine Bewertung der Grundwassersperre verwendet. Zusätzlich wurde der maximale ungestützte Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufont für verschiedene Stützdrücke analysiert.

### 3 Numerische Simulationen

Die numerischen Simulationen wurden mit FLAC<sup>3D</sup> Version 7.0 (2) durchgeführt. FLAC<sup>3D</sup> ist ein dreidimensionales explizites Finite-Differenzen-Programm für geomechanische numerische Simulationen. Die Simulation wurde in zwei Teile gegliedert. In der ersten Simulation wurde ein kleines und detailliertes Modell erstellt, um den maximalen ungestützten Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufont zu analysieren. Der Schilddruck wurde variiert, um seinen Einfluss auf den Abstand zu analysieren. Für die zweite Simulation wurde ein großräumiges Modell erzeugt, um eine geomechanische Analyse des Hangenden eines Kohleflözes durchzuführen.

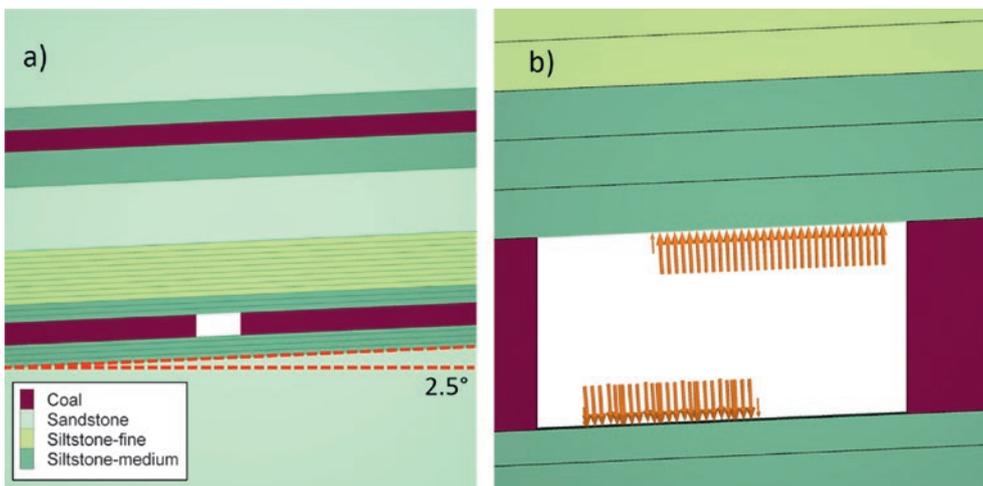


Fig. 3. a) Geology of the detailed model and position of the face start-up road; b) support pressure indicated by arrows, the layers are subdivided by bedding planes (black lines).

Bild 3. a) Geologie des detailreichen Modells und die Lage der Abbaustrecke; b) Schilddruck durch Pfeile angedeutet, Schichten sind durch Schichtungsflächen unterteilt (schwarze Linien).

Source/Quelle: Itasca

The geology of both models is based on a representative profile through a coal seam of the Sokolovskya, which is located in Kuznetzk Basin in Russia (Figure 2). The coal deposit is composed of rocks from the upper Permian age (Yerunakovo subseries, (3)), which are represented by sandstones, medium- and fine-grained siltstones and coal seams. In both parts of the simulation, the geology was modeled with an inclination of 2.5° in mining direction and 6.0° in direction of working. The hydrodynamic zone of the Yerunakovo subseries is reaching a maximum depth of 121 m.

### 3.1 Detailed model

The detailed model is an 80 m long slice (Figure 3), with layers inclined by 2.5° in mining direction. The model geology contains the lower and the middle coal seam from the profile in Figure 2, plus the siltstone and a sandstone layer above. The siltstone layers surrounding the target coal seam are divided into 1.0 m thick sublayers to take bedding planes into account. The sublayers are able to detach and collapse into the mined-out space.

The detailed model is used to analyze the maximum unsupported distance between shield and longwall face, and the required support pressure. In a first step, the face start-up road is excavated, and the support shield is installed with an initial distance of 0.4 m to the longwall face. Starting from this initial state, the coal seam is excavated in slices with increasing depth (0.4 m, 0.5 m, 0.6 m, 0.7 m and 0.8 m). This modeling sequence is repeated, using different support pressures.

Afterwards, the maximum z-displacement of the unsupported roof and the applied support pressure are analyzed. Experiences from longwall mining in the German Ruhr Valley have proven a z-displacement of 2.5 cm as a critical value for shield support. After identifying the maximum unsupported distance and a corresponding support pressure, the Factor of Safety is determined, using the shear strength reduction method.

### 3.2 Large scale model

The large-scale model has a length of 200 m in x-direction, 30 m in y-direction and 136 m in z-direction (Figure 4). All layers are inclined by 2.5° (x-direction) and 6.0° (y-direction). The model geology is including two more coal seams above the target seam. Similar to the detailed model, the siltstones building the roof of the target seam are subdivided to represent bedding planes.

Die Geologie beider Modelle basiert auf einem repräsentativen Profil durch ein Kohleflöz des Sokolovsky-Kohlefelds, welches sich im russischen Kusnetzsk-Becken befindet (Bild 2). Die Kohlelagerstätte besteht aus Gesteinen des Oberen Perms (Yerunakovo Unterserie, (3)), die durch Sandsteine, mittel- und feinkörnige Siltsteine und Kohleflöze repräsentiert werden. In beiden Teilen der Simulation wurde die Geologie mit einem Einfallen von 2,5° in Abbaurichtung und 6,0° in Vertriebsrichtung modelliert. Die hydrodynamische Zone der Yerunakovo Unterserie erreicht eine maximale Teufe von 121 m.

### 3.1 Detailliertes Modell

Das detaillierte Modell ist ein 80 m langer Schnitt (Bild 3), mit um 2,5° in Abbaurichtung geneigten Schichten. Die Modellgeologie enthält das untere und das mittlere Kohleflöz aus dem Profil in Bild 2 sowie den Siltstein und eine überlagernde Sandsteinschicht. Die Siltsteinschichten, die das Zielflöz umgeben, sind in 1.0 m mächtige Teilschichten untergliedert, um Schichtungsflächen zu berücksichtigen. Die Teilschichten sind in der Lage, sich voneinander zu lösen und in den Alten Mann zu verbrechen.

Das detailreiche Modell wird benutzt, um den maximalen ungestützten Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufont sowie den erforderlichen Stützdruck zu analysieren. In einem ersten Schritt wird die Abbaustrecke aufgefahren und der Stützschild mit einem Anfangsabstand von 0,4 m zum Streb eingebaut. Ausgehend von diesem Ausgangszustand wird das Flöz schrittweise mit zunehmender Schnitttiefe (0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m und 0,8 m) abgebaut. Diese Modellierungssequenz wird unter Verwendung verschiedener Stützdrücke wiederholt.

Anschließend werden die maximale z-Verschiebung des ungestützten Hangenden und der aufgebrauchte Stützdruck analysiert. Erfahrungen aus dem Strebbau im deutschen Ruhrgebiet haben eine z-Verschiebung von 2,5 cm als kritischen Wert für den Schildausbau nachgewiesen. Nachdem der maximale ungestützte Abstand und ein entsprechender Stützdruck ermittelt wurden, wird der Factor of Safety mit der Methode der Scherfestigkeitsreduzierung bestimmt.

### 3.2 Großräumiges Modell

Das großräumige Modell hat eine Länge von 200 m in x-Richtung, 30 m in y-Richtung und 136 m in z-Richtung. Alle Schichten fallen

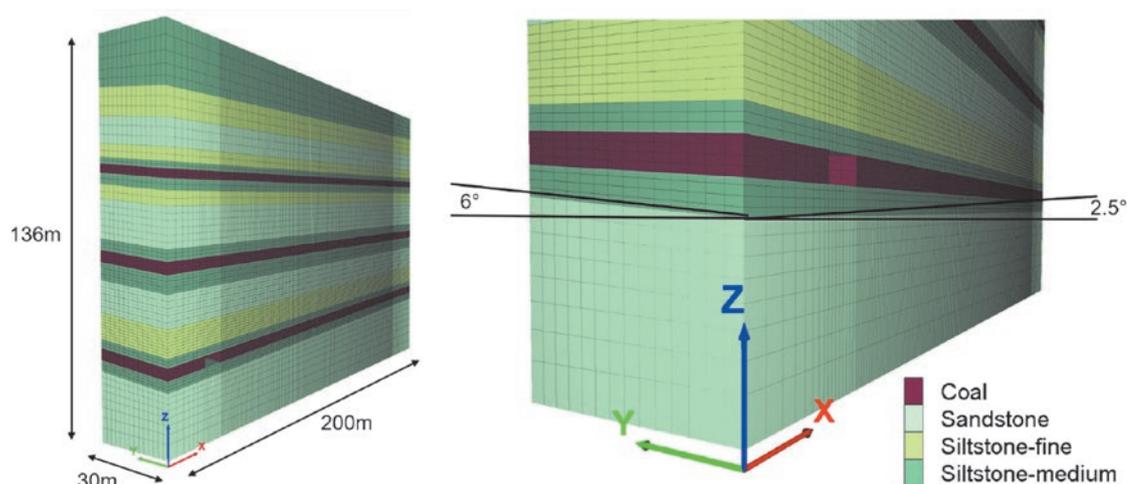


Fig. 4. Dimensions and geology of the large-scale model.

Bild 4. Dimensionierung und Geologie des großräumigen Modells.

Source/Quelle: Itasca

The large-scale model is used to analyze the stress state, the subsidence, and the excavation damaged zone in the roof of the target seam. After excavating the face start-up road, the support pressure is applied. Starting from this initial state, the coal is excavated in 0.8 m slices (maximum cutting depth of the shearer loader) until a steady state of fracturing and displacement in the roof is reached.

### 3.3 Boundary conditions and material parameters

The nodes at the lateral model boundaries and the bottom boundary are fixed in normal direction. An anisotropic, lithostatic stress state is initialized in the model with the vertical stress  $\sigma_V$  as the minimum principal stress

$$\sigma_H = \sigma_h = k_0 * \sigma_V$$

with  $k_0=0.5$ . An overburden pressure corresponding to a ground surface at 259.0 m above sea level and an average overburden density of 2,500 kg/m<sup>3</sup> was applied to the top face.

The sandstone and the fine- and medium-grained siltstones were modelled using ITASCA's iMASS model (Itasca Model for Advanced Strain Softening). This constitutive model was developed using strain-softening/hardening material models, with strain-dependent properties adjusted to reflect the impacts of dilation and bulking as a result of induced stress changes and is based on a Hoek-Brown peak strength envelope (4) and two residual strength envelopes.

The coal was modeled using FLAC<sup>3D</sup>'s strain-softening/hardening model, which is based on the Mohr-Coulomb model with the option that the MC-parameters can harden or soften. The friction angle, cohesion and tensile strength of the coal were assumed to soften linear to their residual values at maximum plastic strain  $\epsilon_{Max}$ .

FLAC<sup>3D</sup> provides the possibility to model discontinuities like bedding planes or geological layer boundaries using interfaces. Their constitutive behavior is characterized by a frictional Coulomb sliding and/or tensile and shear bonding.

## 4 Calculation results

Since the support pressure and the unsupported distance between shield and longwall face both have an influence on roof displacements, several pressure-distance combinations were analyzed. Starting from the initial distance of 0.4 m additional 0.4 m, 0.5 m, 0.6 m, 0.7 m and 0.8 m slices were excavated, result-

mit 2.5° (x-Richtung) und 6.0° (y-Richtung) ein (Bild 4). Die Modellgeologie beinhaltet zwei weitere Kohleflöze oberhalb des Zielflöztes. Ähnlich zur Herangehensweise des detailreichen Modells wird die Siltsteinschicht oberhalb des Zielflöztes in Teilschichten unterteilt, um Schichtungsflächen darzustellen.

Das großräumige Modell wird zur Analyse des Spannungszustands, der Setzungen und der durch den Abbau erzeugten Auflockerungszone im Hangenden des Zielflöztes verwendet. Nach Auffahrung der Abbaustrecke wird der Stützdruck aufgebracht. Ausgehend von diesem Anfangszustand wird die Kohle in 0,8 m tiefen Schnitten (maximale Schnitttiefe des Walzenschrämladers) abgebaut, bis ein stationärer Zustand von Verbruch und Verschiebung in der Firste erreicht ist.

### 3.3 Randbedingungen und Materialparameter

Die seitlichen Modellgrenzen und die Unterkante sind in Normalenrichtung fixiert. Im Modell wird ein anisotroper, lithostatischer Spannungszustand mit der Vertikalspannung  $\sigma_V$  als minimale Hauptspannung initialisiert

$$\sigma_H = \sigma_h = k_0 * \sigma_V$$

mit  $k_0=0.5$ . Für die Deckschicht wurde ein Überlagerungsdruck angesetzt, der einer Geländeoberkante von 259,0 m über N.N. und einer mittleren Überlagerungsdichte von 2.500 kg/m<sup>3</sup> entspricht.

Der Sandstein und die fein- und mittelkörnigen Siltsteine wurden mit dem iMASS-Stoffgesetz (Itasca Model for Advanced Strain Softening) modelliert. Dieses Stoffgesetz wurde unter Verwendung von dehnungsentfestigenden/-verfestigenden Materialmodellen entwickelt, wobei die dehnungsabhängigen Eigenschaften so angepasst wurden, dass die Auswirkungen von Dilatanz und Auflockerung infolge von Spannungsänderungen abgebildet werden. Es basiert auf einem Bruchkriterium nach Hoek-Brown mit zwei unterschiedlichen Restfestigkeitskurven (4).

Die Kohle wurde mit dem Dehnungsentfestigungs/-verfestigungsmodell von FLAC<sup>3D</sup> modelliert, das auf dem Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb basiert, mit der Möglichkeit, dass sich die Mohr-Coulomb-Parameter ent- oder verfestigen können. Für den Reibungswinkel, die Kohäsion und die Zugfestigkeit der Kohle wurde eine lineare Entfestigung auf ihre Restwerte bei maximaler plastischer Dehnung  $\epsilon_{Max}$  angenommen.

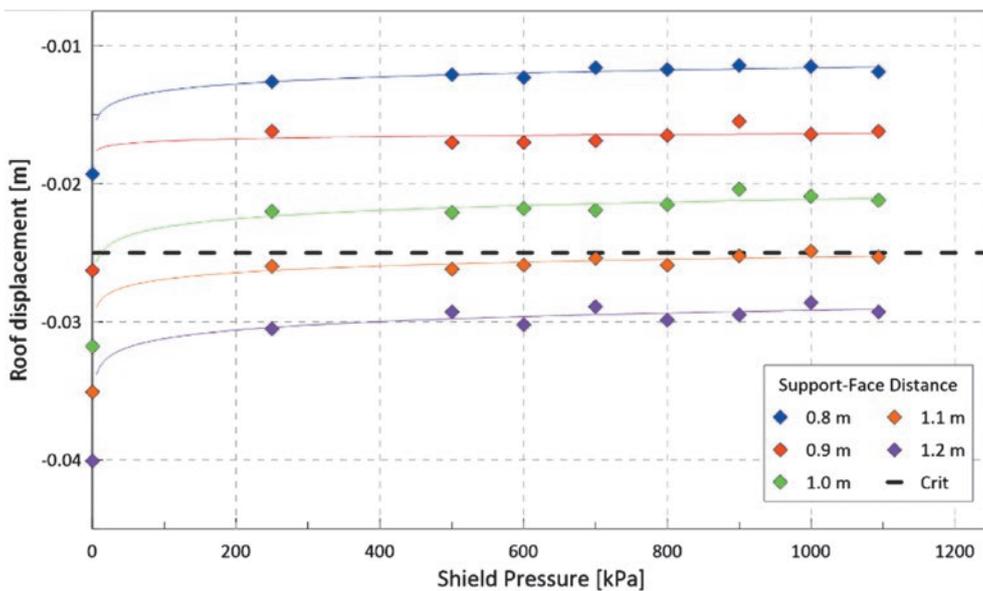


Fig. 5. Results of the support pressure and shield-face distance variations. The dashed line indicates the critical value. Combinations above the dashed lines are deemed safe.  
 Bild 5. Ergebnisse der Variationen des Stützdrucks und des Abstands zwischen Schild und Abbaufront. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den kritischen Wert. Kombinationen oberhalb der gestrichelten Linie gelten als sicher.  
 Source/Quelle: Itasca

ing in distances ranging from 0.8 to 1.2 m. The support pressure was varied from 0 to 1,094 kPa.

The roof displacements between shield and longwall face are mainly influenced by the support pressure for values below 600 kPa (Figure 5). For higher values, the influence of the pressures is negligible and roof displacements are dominated by the length of the unsupported distance. Assuming a critical value of -2.5 cm, a maximum unsupported distance of up to 1.0 m between shield and longwall-face is possible. A support pressure of 600 kPa was selected for the large-scale model.

The combination of 1.0 m unsupported distance and 600 kPa shield pressure is reaching a stable safety factor of 1.52 with the shear strength reduction method. With a reduction in shear strength beyond 1.52, shear bands develop in the roof in front of the shield and the model fails (Figure 6).

Between 12 and 16 m of excavation from the face startup road in the large-scale model, the medium grained siltstone in the roof is starting to collapse and cave into the mined out

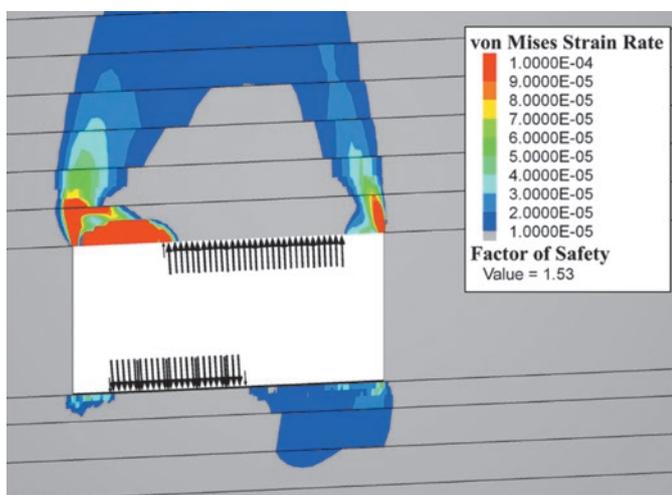


Fig. 6. Shear bands resulting from a safety factor of 1.53.  
 Bild 6. Resultierende Scherbänder durch einen Sicherheitsfaktor von 1,53.  
 Source/Quelle: Itasca

FLAC<sup>3D</sup> bietet die Möglichkeit, Diskontinuitäten wie Schichtungsflächen oder geologische Schichtgrenzen durch Grenzflächen zu modellieren, deren Verhalten durch Coulomb-Gleiten (Reibung) und/oder Zug- und Scherfestigkeit charakterisiert ist.

#### 4 Berechnungsergebnisse

Da sowohl der Stützdruck als auch der ungestützte Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufront einen Einfluss auf die Verschiebungen der Firste haben, wurden unterschiedliche Druck-Abstand-Kombinationen untersucht. Ausgehend von einem Anfangsabstand von 0,4 m, wurden zusätzliche 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m und 0,8 m Schnitte abgebaut, sodass sich Abstände von 0,8 bis 1,2 m ergaben. Der Stützdruck wurde von 0 bis 1.094 kPa variiert.

Die Verschiebungen der Firste zwischen Schildausbau und Abbaufront werden bei Werten unter 600 kPa hauptsächlich durch den Stützdruck beeinflusst (Bild 5). Für höhere Werte ist der Einfluss der Drücke vernachlässigbar und die Firstverschiebungen werden von der Länge des ungestützten Abstands dominiert. Ausgehend von einem kritischen Wert von -2,5 cm ist ein maximaler ungestützter Abstand von bis zu 1,0 m zwischen Schildausbau und Abbaufront möglich. Für das großräumige Modell wurde ein Stützdruck von 600 kPa gewählt.

Die Kombination aus 1.0 m ungestütztem Abstand und einem Schilddruck von 600 kPa erreicht mit der Methode der Scherfestigkeitsreduktion einen stabilen Sicherheitsfaktor von 1,52. Bei einer Reduktion über den Faktor 1,52 hinaus, entstehen im Hangenden vor dem Schildausbau Scherbänder und das Modell versagt (Bild 6).

Im großräumigen Modell beginnt der mittelkörnige Siltstein im Hangenden bei einem Abbaufortschritt zwischen 12 und 16 m im Alten Mann zu verbrechen. Nach einem Abbaufortschritt von 40 m ist ein stationärer Zustand des Verbruchs erreicht und das Hangende versagt direkt hinter dem Schildausbau (Bild 7). Zu diesem Zeitpunkt verbrechen beide Siltsteinschichten über dem Zielflöz. Die Absenkung erreicht die obere Grenze des Modells mit z-Verschiebungen von 0,7 m.

Der Spannungszustand wird zunächst von den Spannungsumlagerungen dominiert, die durch die Auffahrung der Abbaustrecke

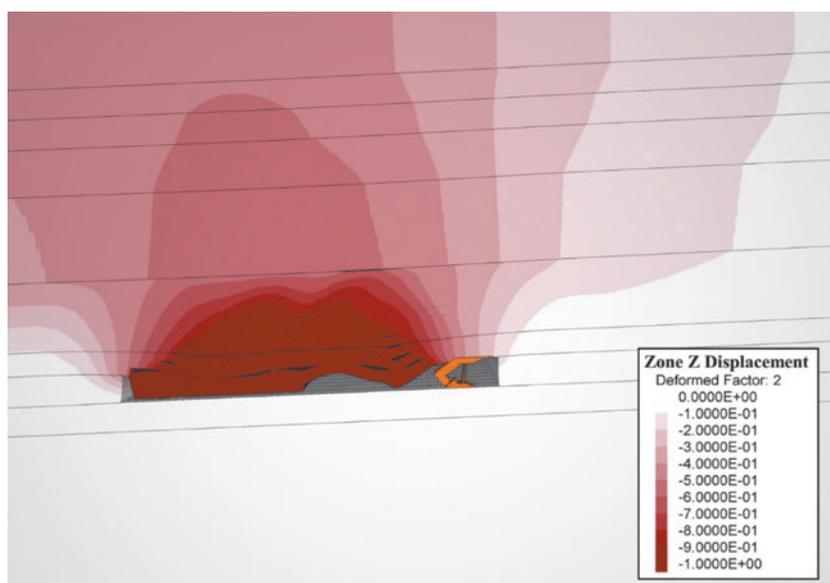


Fig. 7. z-displacement after 40 m of excavation. The roof is collapsing directly behind the shield. The orange shield symbol is indicating where the support pressure was applied over the complete model depth.

Bild 7. z-Verschiebungen nach 40 m Abbaufortschritt. Das Hangende versagt direkt hinter dem Schildausbau. Das orangene Schildsymbol zeigt an, wo der Stützdruck über die gesamte Modelltiefe aufgebracht wurde.

Source/Quelle: Itasca

space. A steady state of caving is reached after 40 m of excavation and the roof is collapsing directly behind the support shield (Figure 7). At this stage, both siltstone layers above the target coal seam are caving into the goaf. The subsidence is reaching the top boundary of the model with z-displacements of 0.7 m.

The stress state is first dominated by the stress redistributions, induced by the excavation of the face start-up road. Stress concentrations are located near to the side walls with a minimum principal stress of  $-18$  MPa. With advancing excavation, stresses start to accumulate in the sandstone layers above the target coal seam. The minimum principal stress is reaching more than  $-33$  MPa. The bulked material in the goaf is consolidating and attracting stresses near to the face start-up road (Figure 8).

## 5 Conclusion

The displacements in the unsupported roof are mainly influenced by the distance between shield and coal face. Support pressures

induziert werden. Die Spannungskonzentrationen befinden sich in der Nähe der Stöße mit einer minimalen Hauptspannung von  $-18$  MPa. Mit fortschreitendem Abbau beginnen sich die Spannungen in den Sandsteinschichten oberhalb des Zielflöz zu akkumulieren. Die minimale Hauptspannung erreicht mehr als  $-33$  MPa. Das verbrochene Material im Alten Mann verfestigt sich und zieht Spannung in der Nähe der Abbaustrecke an (Bild 8).

## 5 Zusammenfassung

Die Verschiebungen im ungestützten Hangenden werden hauptsächlich durch den Abstand zwischen Schildausbau und Abbaufont beeinflusst. Stützdrücke über 600 kPa haben keinen signifikanten Einfluss auf das Verhalten des numerischen Modells. Bei einem Gesamtabstand von 1.0 m und einem Stützdruck von 600 kPa bleiben die Hangendverschiebungen unterhalb des kritischen Werts von 2.5 cm. Lokale Variationen der Gesteinsqualität werden im numerischen Modell nicht berücksichtigt.

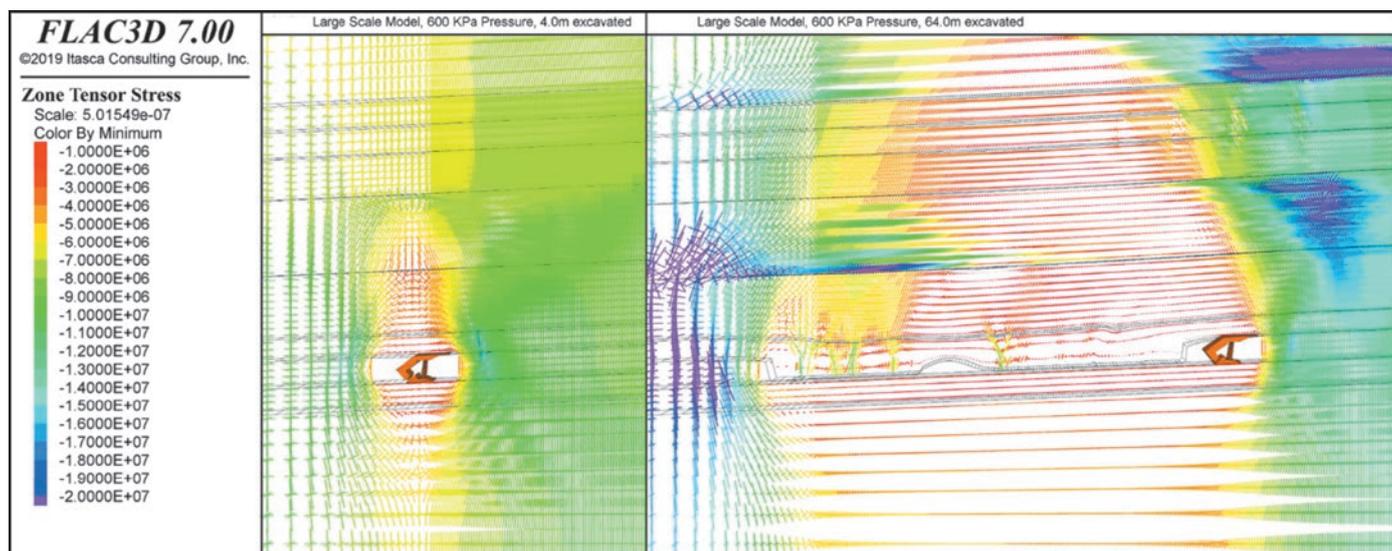


Fig. 8. Stress state after 4 m (left) and 64 m (right) of excavation.

Bild 8. Spannungszustand nach 4 m (li.) und 64 m (re.) Abbaufortschritt. Source/Quelle: Itasca

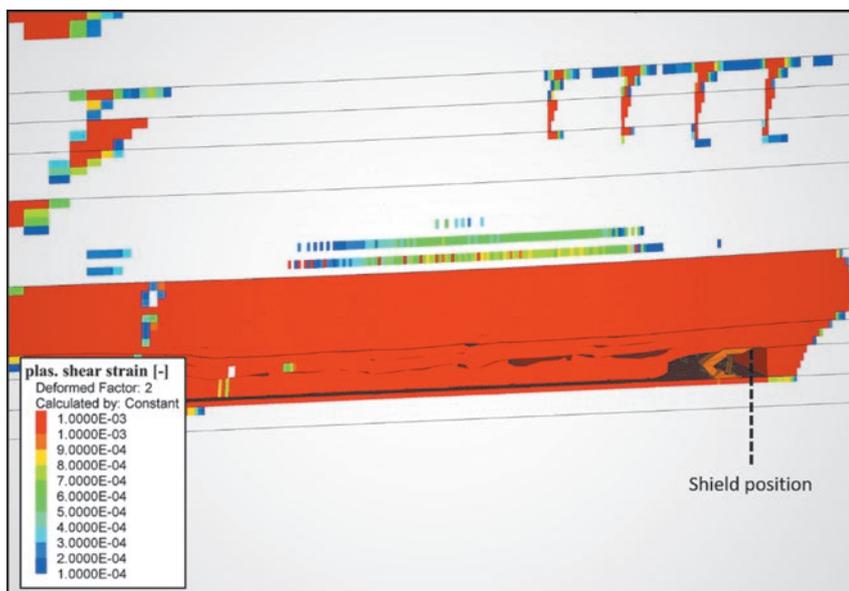


Fig. 9. Plastic shear strain after 72 m of excavation.  
Bild 9. Plastische Scherdehnung nach 72 m Abbaufortschritt. Source/Quelle: Itasca

above 600 kPa have no significant influence on the behavior of the numerical model. For a total distance of 1.0 m and a support pressure of 600 kPa, the roof displacements remain below the critical value. Local variations of the rock quality are not included in the numerical model.

After 12 m of excavation from the initial state, the roof starts to collapse and cave into the goaf. Both siltstone layers above the target coal seam are affected by caving and bulking. The stiff sandstone forming the main roof remains at the initial density, but the plastic shear strain indicates that some sublayers start to fracture (Figure 9). Shear bands are developing in the layers around the next seam in the hanging wall, induced by a subsidence above the goaf.

Considering the assumptions made in the large-scale model, the roof of the target coal seam is providing a sufficient groundwater barrier to the hydrodynamic zone of the Yerunakovo subseries. The excavation damage zone is not reaching the top boundary of the model. However, it must be noted, that the model is not considering damage induced by longwall mining in panels above the target coal seam. A potential groundwater migration through preexisting fracture zones must be analyzed.

Further investigations could be made, using a discontinuum approach. A model containing joints within sublayers could deliver more conclusions about the caving behavior of the direct roof layers. This approach would allow an implementation of very thin sublayers ( $\leq 0.1$  m) at the coal-siltstone boundary, which are not considered in the continuum model, used in this study.

#### References / Quellenverzeichnis

- (1) Reuther, E. U.: Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus. Band 1, VGE Verlag GmbH, Essen, 2010.
- (2) ITASCA Consulting Group Inc.: FLAC<sup>3D</sup> Version 7.00 Documentation. 2018.
- (3) SUEK-Kuzbass JSC: Research Report (Contract No. 806-2017/IPEB of 18.04.2017). Kemerovo. 2017.
- (4) Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B.: Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proceedings of the 5th North American rock mechanics symposium, Toronto, 2002.

Nach einem Abbaufortschritt von 12 m beginnt das Hangende in den Alten Mann einzubrechen. Beide Siltsteinschichten oberhalb des Zielflözes sind von der Auflockerung und dem Verbruch betroffen. Der steife Sandstein im Hangenden zeigt noch keine Volumenzunahme durch Auflockerung, aber die plastische Scherdehnung zeigt, dass einige Unterschichten zu brechen beginnen (Bild 9). In den Schichten um das nächste Flöz im Hangenden entwickeln sich Scherbänder, die durch eine Absenkung oberhalb des Alten Manns verursacht werden.

Unter Berücksichtigung der im großräumigen Modell getroffenen Annahmen bildet das Hangende des Zielflözes eine ausreichende Grundwasserbarriere zur hydrodynamischen Zone der Yerunakovo-Teilserie. Die durch den Abbau erzeugte Auflockerungszone erreicht nicht die obere Grenze des Modells. Es ist jedoch zu beachten, dass das Modell keine Auflockerungszonen berücksichtigt, die durch vorherige Abbautätigkeiten im Hangenden des Zielflözes entstanden sein können. Eine mögliche Grundwassermigration durch bereits vorhandene Bruchzonen muss analysiert werden.

Weitere Untersuchungen könnten mit einem diskontinuumsmechanischen Ansatz durchgeführt werden. Ein Modell, das Klüfte innerhalb von Teilschichten enthält, könnte mehr Aussagen über das Einsturzverhalten der direkten Hangendschichten liefern. Dieser Ansatz würde auch eine Implementierung von sehr dünnen Teilschichten ( $\leq 0,1$  m) an der Kohle-Siltstein-Grenze ermöglichen, die in dem Kontinuumsmodell, welches in dieser Studie verwendet wurde, nicht berücksichtigt werden.

#### Authors / Autoren

Benedikt Wöhrl M. Sc., Ivan Akinshin M. Eng. und Dr. Lothar te Kamp, ITASCA Consultants GmbH, Gelsenkirchen, Dr. Yewgeni Yakunchikov, SUEK JSC, Moskau/Russland