

Simulation of Pre-Drainage in Hard Coal Mining by Application of the Software SimedWin

An operation as economically advantageous as possible by guaranteeing occupational safety in the underground is of great importance in the field of mining. Furthermore, safe working conditions should be provided until the end of the subsidized hard coal mining in Germany at the end of 2018. Pre-drainage of methane, an application of which the gas content of a coal seam is reduced before coal extraction at Prosper-Haniel colliery, contributes significantly to this. Hard coal collieries worldwide tend to operate at greater depths as well as must handle higher gas contents, which can also only guarantee safe conditions if pre-drainage is conducted. It is possible to quantify and estimate the probable drained gas volume as well as the reduction of the gas

content previously by applying an adequate software. This forms the basis for dimensioning the borehole diameters and lengths, the distances between the boreholes, the drilling level and their service life. The software SimedWin is available to pre-calculate the pre-drainage at DMT GmbH & Co. KG, Essen/Germany, for this purpose. This paper is a summary of the author's diploma thesis "Installation of a simulation for pre-degassing in an extraction panel of the hard coal mine Prosper-Haniel by application of the software SimedWin and verification of the results with the current status" conducted in conjunction with Prosper-Haniel Colliery of RAG Aktiengesellschaft, Herne/Germany, and Technical University Bergakademie Freiberg.

Simulationsbasierte Vorausberechnung der Vorentgasung im Steinkohlenbergbau mit der Software SimedWin

Ein möglichst wirtschaftlicher Betrieb bei Gewährleistung der Sicherheit der Belegschaft unter Tage ist im Bergbau von essentieller Bedeutung. Bis zum Ende des subventionierten Steinkohlenbergbaus in Deutschland Ende 2018 soll weiterhin ein sicheres Arbeiten ermöglicht werden. Hierzu leistet die Vorentgasung von Methan, womit auf dem Steinkohlenbergwerk Prosper-Haniel der RAG Aktiengesellschaft, Herne, der Gasinhalt eines Bauflözes vor dem Abbau reduziert wird, einen signifikanten Beitrag. Aber auch im internationalen Steinkohlenbergbau erfolgt der Abbau in immer größeren Teufen mit höheren Gasgehalten, die einen sicheren Gewinnungsbetrieb häufig nur durch die Durchführung einer Vorentgasung gewährleisten können. Mit Hilfe einer adäquaten Software lassen sich die voraussichtlich abgesaugten Gasvolumina sowie die Reduktion des Gasinhalts quantifizieren

bzw. im Vorfeld einschätzen. Dies bildet beispielsweise die Basis für die Dimensionierung der Bohrlochdurchmesser und -längen, der Abstände der Bohrungen voneinander, ihrer Höhenlage im Flöz sowie der Bohrlochstandzeiten. Zur Vorausberechnung der Vorentgasung steht der DMT GmbH & Co. KG, Essen, das Programm SimedWin zur Verfügung. Der vorliegende Bericht ist eine Zusammenfassung der Diplomarbeit des Autors mit dem Thema „Aufbau eines Modells zur Simulation der Vorentgasung in einer Bauhöhe des Steinkohlenbergwerks Prosper-Haniel mit dem Rechnerprogramm SimedWin und Verifikation der Rechnergebnisse mit dem Ist-Zustand“, die in Zusammenarbeit mit der DMT, dem Steinkohlenbergwerk Prosper-Haniel der RAG Deutsche Steinkohle AG, Herne, und der Technischen Universität Bergakademie Freiberg verfasst wurde.

1 Introduction

Pre-drainage is applied for two essential reasons. First, the gas emission from gassy working seams can be reduced, which should largely avoid the interruption of electric machinery due to an excess of the maximum permissible value for methane – 1% in a normal operation as well as 1.5% in an exceptional case. The reduction of the gas content of a working seam, which results in a loss of the gas outburst risk, can be mentioned as a further reason (1). The permeability, which is dependent on the mechani-

1 Einleitung

Die Vorentgasung wird aus zwei wesentlichen Gründen durchgeführt. Bei einem Abbau mit starken Gaszuströmen kann die Grundaussaugung, also die Ausgasung aus dem Bauflöz, verringert werden, so dass während des Abbaus Abschaltungen elektrischer Betriebsmittel aufgrund der Überschreitung der CH_4 -Grenzwerte – im Regelbetrieb 1% und im Ausnahmebetriebsbetrieb 1,5% – weitgehend vermieden werden können. Ein weiterer Grund zur Anwendung der Vorentgasung ist die Möglichkeit der Absenkung

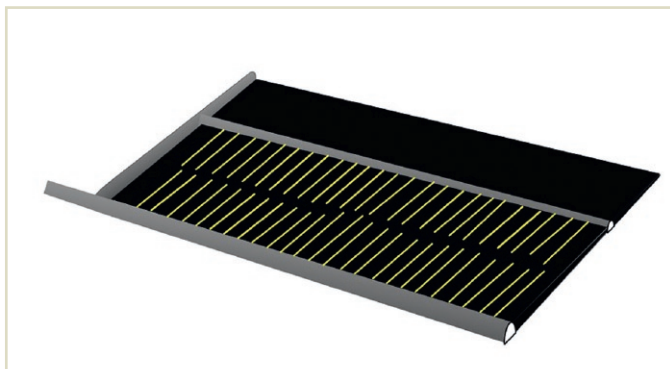


Fig. 1. Arrangement of the parallel boreholes for pre-drainage (2).
Bild 1. Anordnung der parallelen Bohrlöcher zur Vorentgasung (2).

cal pressure as well as which needs to be high enough to allow a gas migration, may be understood as an outstanding parameter within the software SimedWin.

The type of pre-drainage being considered in this paper is the pre-degassing before the coal extraction has started by application of parallel boreholes every 10 to 20 m with a diameter of 45 to 95 mm. The boreholes for the pre-drainage are drilled from the gate roads to the centre of the panel (Figure 1).

To meet the objective to transfer a complex deposit such as Zollverein 1/2 seam into a model as well as to simulate the pre-drainage, it is necessary to examine the rock-mechanical and the geological status within a panel precisely.

2 Description of panel 123, Zollverein 1/2 seam

Panel 123 is situated in the Prosper Nord mine district at an average depth of around 1,145 m below normal height null on the 7th level (Figure 2). The coal seam thickness of the Zollverein 1 and 2 seams averaged 2.27 m. The part of the mine waste between the two seams was 1.21 m, the thickness of the partings – consisting of coal and rock – varied from 0.6 m to 2.35 m as well as the effective seam thickness ranged in thickness from 3 up to 4 m. Zollverein 1/2 seam has a desorbable gas content of 9 to 11 m³/t.

2.1 Geological structure of the floor and roof strata

The geological structure of the floor and roof strata exerts influence on the result of pre-drainage. A rock layer such as sandstone, which is solid enough to hold out against increasing mechanical pressure without collapsing, is capable of absorbing elastic energy caused by

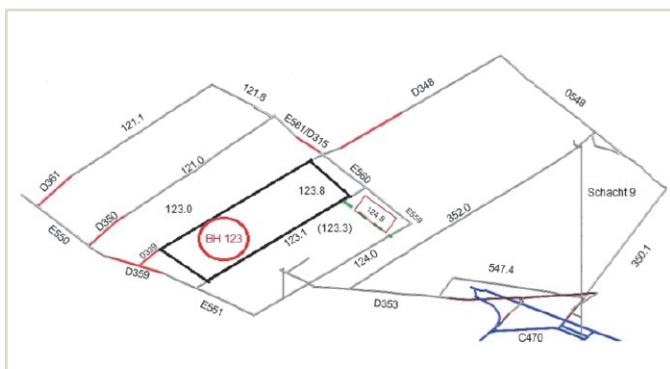


Fig. 2. Overview of the working places in the Prosper Nord panel (3).
Bild 2. Übersicht der Betriebspunkte im Baufeld Prosper Nord (3).

des Gasinhalts eines Bauflözes, wodurch ein gasausbruchsdiskontiniertes Flöz die Gasausbruchsdiskontinuität verlieren soll (1). Als bedeutende Voraussetzung und herausragenden Parameter für die Software SimedWin gilt die vom mechanischen Druck abhängige Permeabilität, die ausreichend hoch sein muss, um eine Gasmigration ermöglichen zu können.

Unter der für den Bericht relevanten Vorentgasung wird eine Entgasung des Bauflözes vor Beginn des Abbaus mittels flözgängiger paralleler Bohrlöcher im Abstand von 10 bis 20 m mit einem Durchmesser von 45 bis 95 mm verstanden. Die Vorentgasungsbohrlöcher werden in den Abbaubegleitstrecken angesetzt und zur Mitte der Bauhöhe gebohrt (Bild 1).

Um dem Ziel gerecht zu werden, die komplexe Lagerstätte des Flözes Zollverein 1/2 in ein Modell zu übertragen und die Vorentgasung zu simulieren, muss zunächst eine präzise Betrachtung der gebirgsmechanischen sowie geologischen Situation innerhalb der Bauhöhe erfolgen.

2 Beschreibung der Bauhöhe 123, Flöz Zollverein 1/2

Die Bauhöhe 123 liegt im Baufeld Prosper Nord auf der 7. Sohle des Bergwerks in einer mittleren Teufe von 1.145 m unter Normalhöhennull (Bild 2). Die Kohlenmächtigkeit der Flöze Zollverein 1 und 2 betrug im Mittel 2,27 m. Der Bergeanteil in den Flözen war mit durchschnittlich 1,21 m angegeben, die Mächtigkeit der Zwischenmittel – Kohle mit Bergen – mit 0,6 bis 2,35 m und die gebaute Mächtigkeit mit 3 bis 4 m. Das Flöz Zollverein 1/2 wies in der Bauhöhe 123 einen desorbierbaren Gasinhalt von 9 bis 11 m³/t auf.

2.1 Geologischer Aufbau des Liegenden und Hangenden

Der geologische Aufbau der Liegend- und Hangendschichten nimmt Einfluss auf das Ergebnis der Vorentgasung. Gesteinsschichten wie Sandstein, die fest genug sind und wachsendem mechanischem Druck standhalten ohne zu Bruch zu gehen, nehmen bei Vorhandensein geometrischer, mechanisch druckerhöhender Situationen durch Abbaukanten und Restpfeiler aus Flözen oberhalb oder unterhalb des zu betrachtenden Bauflözes elastische Energie auf und übertragen den Druck auf das Flöz (4).

Neben der erhöhten Gebirgsschlaggefahr führt eine Übertragung des mechanischen Drucks zu einer Verringerung der Permeabilität des Flözes in den entsprechenden Bereichen einer Bauhöhe. Aus den Merkmalen einer möglichen Gebirgsschlaggefahr lässt sich für diesen Zusammenhang ableiten, dass die Übertragung eines Zusatzdrucks stattfinden kann, wenn innerhalb der ersten 10 m oberhalb des Flözes eine Sandsteinbank mit einer Mächtigkeit von mindestens 5 m ansteht (5). Eine feste Gesteinsschicht kann im Liegenden als Widerlager fungieren, wenn sie eine Mächtigkeit von 2 m aufweist und innerhalb der ersten 5 m unterhalb des Flözes vorliegt. In Bild 3 ist exemplarisch die Mächtigkeit der festen Gesteinsschicht innerhalb der ersten 10 m oberhalb des Flözes Zollverein 1/2 dargestellt.

Beide genannten Bedingungen für eine mechanische Druckübertragung respektive Einspannung des Flözes durch eine als Widerlager fungierende feste Gesteinsschicht im Liegenden waren in der Bauhöhe 123 in Bereichen erfüllt, in denen wirksame Abbaukanten in einer Entfernung von mindestens 200 m oberhalb des Hangenden vorhanden waren.

geometric mechanical pressure-increasing situations, which occur if edges of mined panels lie above or below the current working panel, as well as transfer the pressure to the seam (4).

A transfer of mechanical pressure leads to a reduction of the seam permeability in the relevant areas of the panel, besides a higher risk of rock bursts. A transfer of an additional mechanical pressure can occur if a sandstone layer having a minimum thickness of 5 m is located within the first 10 m above the seam, which is derived from the features of a possible risk of rock bursts (5). A solid formation can serve as an abutment in the underlying bed if a thickness of 2 m is preexisting as well as the rock layer is located within the first 5 m below the seam. Figure 3 shows exemplarily the thickness of the solid rock layer within the first 10 m above Zollverein 1/2 seam.

Both mentioned conditions of a transfer of mechanical pressure as well as fixation of the seam by a solid rock layer functioning as an abutment in the underlying bed were given in areas within panel 123, where effective edges of mined panels were situated at a distance of at least 200 m above the hanging roof of the seam.

2.2 Rock-mechanical situation

As a consequence of mined panels above, panel 123 was influenced rock-mechanically as well as thereby in its gas emission behaviour. Only the effective edges of mined panels influencing panel 123 rock-mechanically are considered hereinafter.

The edges of the mined panels from the H (+150 m) and I (+160 m) seams are situated parallel to the coal face in the western part of the panel whereas the edge of the G1 seam (+123 to 133 m) is located from North to South within panel 123. The impact of the edges of the panels from seams H, I and G1 are illustrated in figure 4. The distribution of the mechanical pressure was determined by GEDRU, a software used by the DMT GmbH & Co. KG, Essen/Germany, to calculate rock pressure on a large scale. The diagram shows the rock pressure from stone drift D350 in drift 123.0. A reduction of the permeability was expected in areas of increased mechanical pressure whereas in areas of reduced mechanical pressure an increased permeability was expected.

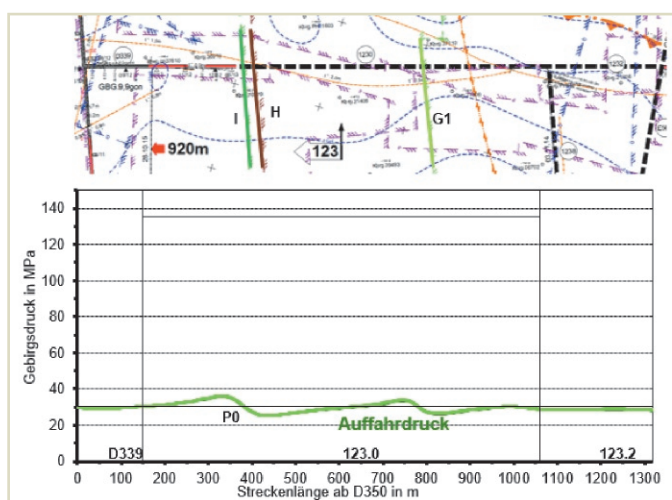


Fig. 4. Impact of the edges of the panels from seams H, I and G1 (7).
Bild 4. Einfluss der Abbaukanten der Flöze H, I und G1 (7).

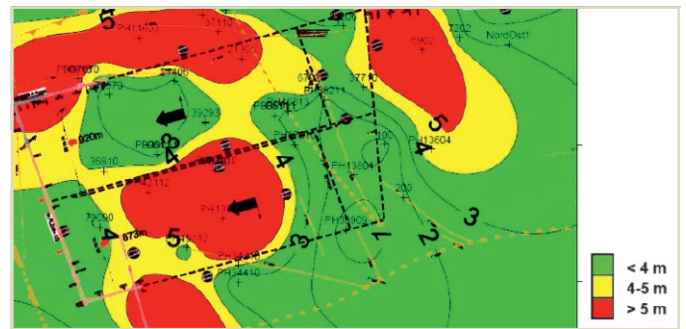


Fig. 3. Thickness of the solid rock layer within the first 10 m (6).
Bild 3. Mächtigkeit der festen Gesteinsschicht innerhalb der ersten 10 m (6)

2.2 Gebirgsmechanische Situation

Die Bauhöhe 123 wurde infolge von Überbauung durch Abbaukanten und Restpfeiler gebirgsmechanisch und damit in ihrem Ausgasungsverhalten beeinflusst. Nachfolgend werden nur die wirksamen, gebirgsmechanisch auf die Bauhöhe 123 Einfluss nehmenden Abbaukanten berücksichtigt.

Im westlichen Teil der Bauhöhe verlaufen die Abbaukanten der Flöze H (+150 m) und I (+160 m) parallel zur Abbaufont, während die Abbaukante des Flözes G1 (+123 bis 133 m) von Norden nach Süden verläuft. Der Einfluss der Abbaukanten der Flöze H, I und G1 wird in dem mit GEDRU ermittelten Verlauf des mechanischen Drucks in Bild 4 verdeutlicht. GEDRU ist ein Gebirgsdruckrechenmodell, das bei der DMT GmbH & Co. KG, Essen, zur Berechnung großräumiger Gebirgsdruckverteilungen verwendet wird. In dem vorliegenden Diagramm ist der Gebirgsdruck über der Länge ab dem Gesteinsberg D350 von der Abbaubegleitstrecke 123.0 aus aufgetragen. In den Bereichen erhöhten mechanischen Drucks war entsprechend eine Reduktion der Permeabilität und in den Bereichen geringeren mechanischen Drucks eine erhöhte Durchlässigkeit zu erwarten.

Bei Unterfahrung der Abbaukanten der Flöze H, I und G1 konnte mit dem wetterausziehseitigen Strebendgerät ein leichter Anstieg der CH_4 -Gehalte verzeichnet werden, was als Beleg für eine gebirgsmechanische Beanspruchung betrachtet werden kann.

Die Einflussnahme der genannten Restpfeiler und Abbaukanten konnte durch eine umfassende Analyse der Bohrkleinmengen aus den Erkundungsbohrungen im Zuge der Auffahrung der Strecken 123.0, 123.1 und 123.8 ebenfalls bestätigt werden.

3 Bestimmung der Permeabilität für das Flöz Zollverein 1/2

Eine ausreichend hohe Permeabilität gilt als Voraussetzung von hoher Relevanz für die Durchführung einer erfolgreichen Vorentgasung. Aufgrund der herausragenden Bedeutung dieses Parameters für die Software empfahl sich im Sinne einer realitätsnahen Simulation die Verwendung eines konkreten Werts für die Permeabilität im Flöz Zollverein. Hierfür wurden eine Kernprobe aus der Strebendstellung der Bauhöhe 123 und einige Handproben vom Kohlenstoß aus der Bauhöhe 124 entnommen und im petrophysikalischen Labor des Lehrstuhls für Geologie, Geochemie und Lagerstätten des Erdöls und der Kohle der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen untersucht.

It was possible to measure a moderate increase of the methane concentration by the sensor placed at the end of the longwall face in the return air, which can be seen as indicator for rock-mechanical stress.

The impact of the mentioned remnants and edges of panels was also confirmed by a precise analysis of cuttings from exploration boreholes drilled during the roadway drivage of drifts 123.0, 123.1 and 123.8.

3 Determination of permeability for Zollverein 1/2 seam

A permeability being high enough is highly relevant for a successful pre-drainage. It was recommended to use a concrete value for the permeability of Zollverein seam on account of the outstanding importance of this parameter in the software to guarantee a realistic simulation. One core sample was taken out of the dismantling roadway of panel 123 and in addition to that a small number of coal lumps were collected from the coal face of panel 124 for this purpose. These samples were sent to the petrophysical laboratory of the chair for Geology, Geochemistry and Oil Reservoirs at RWTH Aachen University.

The preparation of the coal samples was complicated due to the heterogeneity of the coal – dull coal as well as glance coal – in combination with a low uniaxial compressive strength. The core sample of Zollverein 1 seam which was taken out of the dismantling roadway of panel 123 on the 21th of January 2016 was clamped successfully into the experimental set-up. The experiments should have been conducted with helium, nitrogen and finally methane. The use of helium resulted in an average permeability of 0.084 mD under an ambient pressure (= axial pressure) of 200 bar. This value was used in the simulation due to lack of time.

The mathematical relationship between viscous gas permeability and mechanical pressure in the form of a power function as explained according to Meiners was used to transfer this value to the different situations of pressure within panel 123 (8). Air was passed axially through different coal samples from variable collieries during this work. The following mathematical relation was the result of a regression analysis:

$$B_0 = B_0 \times p_{M,eff}^{-m}$$

B_0 viscous gas permeability under stress [mD]

$B_{0/0}$ viscous gas permeability without stress [mD]

$p_{M,eff}$ effective, mechanical pressure $\left[\frac{\text{bar}}{\text{bar}}\right]$

m compaction rate [-]

4 Installation of a simulation for pre-drainage by application of SimedWin

It is not possible to transfer panel 123 into one single model due to its geological and rock-mechanical complexity, so that several representative sections among various categories are defined, for which specified models are constructed. Four categories based on the mentioned geological and rock-mechanical aspects as well as the drilling result are predestinated for this purpose.

Aufgrund der Heterogenität der Gaskohle aus dem Flöz Zollverein 1/2 – im Wechsel Matt- und Glanzkohle – sowie der geringen einaxialen Druckfestigkeit, stellte sich die Probenvorbereitung als schwierig dar. Eine am 21.01.2016 aus der Strebendstellung der Bauhöhe 123 erbohrte Probe aus Flöz Zollverein 1 konnte erfolgreich im Versuchsaufbau eingespannt werden. Die Versuche sollten zunächst mit Helium, Stickstoff und schließlich mit Methan durchgeführt werden. Aus zeitlichen Gründen wurde in den Simulationen bereits die für Helium ermittelte Permeabilität von durchschnittlich 0,084 mD bei einem mechanischen Umgebungsdruck (= Axialdruck) von 200 bar verwendet.

Zur Übertragung des Werts auf die verschiedenen Drucksituationen innerhalb der Bauhöhe 123 wird der mathematische Zusammenhang nach Meiners zwischen der viskosen Gasdurchlässigkeit und dem mechanischen Außendruck in Form einer Potenzfunktion verwendet (8). Im Zuge dieser Arbeit sind verschiedene Kohleproben aus unterschiedlichen Bergwerken axial mit Luft durchströmt worden. Die Regressionsanalyse ergab folgende mathematische Beziehung:

$$B_0 = B_0 \times p_{M,eff}^{-m}$$

B_0 viskose Gasdurchlässigkeit unter Belastung [mD]

$B_{0/0}$ viskose Gasdurchlässigkeit ohne Belastung [mD]

$p_{M,eff}$ effektiver, mechanischer Außendruck $\left[\frac{\text{bar}}{\text{bar}}\right]$

m Kompaktionszahl [-]

4 Aufbau eines Modells zur Simulation der Vorentgasung mit SimedWin

Die Bauhöhe lässt sich in ihrer geologischen und gebirgsmechanischen Komplexität nicht in einem einzigen Modell darstellen, so dass mehrere repräsentative Abschnitte unter verschiedenen Kategorien definiert werden, für die entsprechend zugeschnittene Modelle konstruiert werden. Hierfür stellen sich vier Kategorien als geeignet dar, die auf den genannten geologischen und gebirgsmechanischen Aspekten sowie dem Bohrergebnis basieren.

4.1 Einteilung der Bauhöhe 123 in vier Kategorien

Die erste Kategorie kann als ungestörter Bereich verstanden werden. Waren keinerlei tektonische Störungen oder mögliche Abbaukanteneinflüsse vorhanden, konnte im Vorfeld angenommen werden, dass keine Beeinflussung der Permeabilität in Bezug auf die Vorentgasung erfolgen wird. Daneben ist auf einen unter dem Durchschnitt liegenden Bohrkleinanfall bei den Erkundungsbohrungen geachtet worden.

Die zweite Kategorie wird allgemein als Bereich der Muldenstruktur ausgewählt. Im Zuge des Abbaus zeigte sich ab 750 m nach Strebendurchgang eine Muldenstruktur, weshalb bei der Erstellung der Vorentgasungsbohrungen in der Strecke 123.0 häufig ins Nebengestein gebohrt wurde.

Die dritte Kategorie umfasst den Bereich des Abbaukanteneinflusses der Flöze G1, H und I. Der druckentlastete Bereich sowie

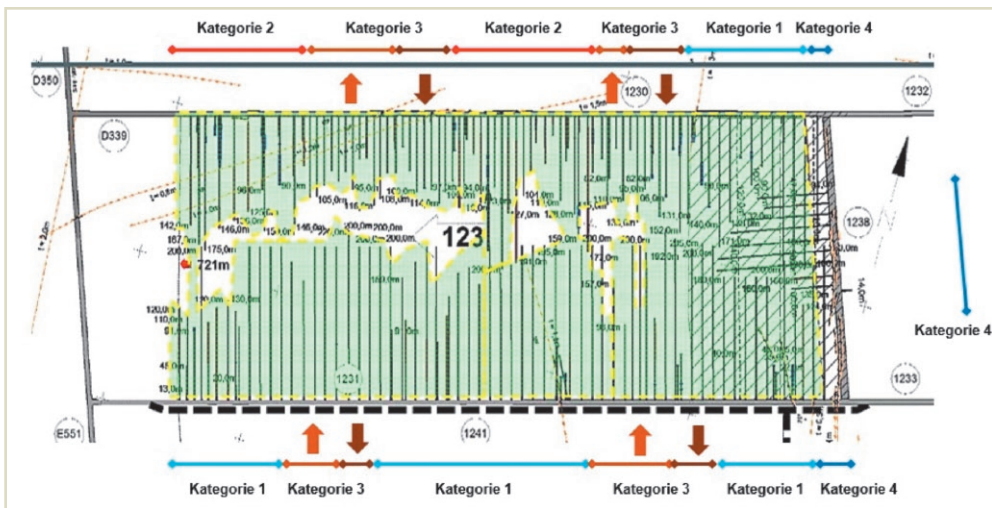


Fig. 5. Representative sections within panel 123 (g).
Bild 5. Repräsentative Abschnitte in der BH 123 (g).

4.1 Classification of panel 123 to four categories

The first category can be understood as the undisturbed area. If no tectonically faults or possible impacts of edges of mined panels above the seam existed, it could be assumed beforehand that permeability was not influenced regarding pre-drainage. Furthermore, an amount of drill cuttings from the exploration boreholes being less than the average rate was also taken into account.

The second category is referred to as the area of trough structure. A trough structure was encountered after 750 m during the winning process. Thus, the wells for pre-drainage in drift 123.0 were often drilled into the adjacent rock.

The third category comprises the area being influenced by the edges of mined panels of G₁, H and I seams. The pressure-compensated area as well as the area of increased mechanical pressure are modelled and simulated separately from each other.

The fourth category includes the edge between longwall face and gate road. This considered part of panel 123 is characterized by gas emissions out of the faces of drifts 123.0, 123.1 and 123.8. Furthermore, gas drainage boreholes were also drilled into the working face, so that these boreholes cross those being drilled from drifts 123.0 and 123.1.

The arrows shown in figure 5 characterize the area of increased mechanical pressure (↑) due to the edges of the mined panels of H, I and G₁ seams as well as the pressure-compensated area (↓).

4.2 The software SimedWin

SimedWin is the version of Simed-II with an integrated user interface that provides pre-and post-processing. Simed-II was developed at the School of Petroleum Engineering, University of New South Wales. The development of the user interface along with some further modification was carried out by CSIRO Petroleum (10).

Simed-II is a three dimensional, two phase (gas and water) multi-component simulator designed to model coalbed gas reservoirs. Carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrogen (N₂) and ethane (C₂H₆) are the gases with preset properties, e. g. the viscosity, within SimedWin and Simed-II, by which the gas composition is defined. The software is suitable to simulate pre-drainage of coal seams in underground collieries and the production of coal bed methane from boreholes drilled from the surface as well as

der Bereich erhöhten mechanischen Drucks werden separat voneinander modelliert und simuliert.

Die vierte Kategorie beinhaltet den Übergang vom Streb zur Strecke. Dieser betrachtete Ausschnitt der Bauhöhe 123 ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Ausgasung aus den Stößen über die Strecken 123.0, 123.1 und die 123.8 stattfindet. Darüber hinaus wurden auch strebseitige Vorentgasungsbohrungen parallel zu den Abbaubegleitstrecken erstellt, so dass sich diese Bohrlöcher mit denen aus der Strecke 123.0 und der Strecke 123.1 überschneiden.

Die Pfeile in Bild 5 kennzeichnen den Bereich erhöhten mechanischen Drucks (↑) im Anstehenden der Abbaukanten der Flöze H, I und G₁ beziehungsweise den druckentlasteten Bereich (↓).

4.2 Die Software SimedWin

Die Software SimedWin ist eine Version von Simed-II, die über eine Benutzeroberfläche verfügt, mit der eine Vor- und Nachbehandlung von Daten ermöglicht wird.

Simed-II wurde an der School of Petroleum Engineering, University of New South Wales entwickelt. Die Ausführung der Benutzeroberfläche sowie weitere Modifizierungen wurden von CSIRO Petroleum durchgeführt (10).

Bei der Software Simed-II handelt es sich um einen dreidimensionalen, zweiphasigen (Gas und Wasser) Mehrkomponenten-Simulator zur Modellierung von Gas- und Wasserströmungen in Kohleflözen. Zu den Gasen mit voreingestellten Eigenschaften – beispielsweise die Viskosität – mit denen die Gaszusammensetzung innerhalb von SimedWin und Simed-II definiert werden kann, gehören Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Stickstoff (N₂) und Ethan (C₂H₆). Die Software eignet sich dazu, die Vorentgasung von Kohleflözen in untertägigen Bergwerken und die Förderung von Flözgas aus von der Tagesoberfläche erstellten Bohrungen zu simulieren sowie die förderbaren Gasvolumina vorzuberechnen. Hierbei ist eine Modellierung von mehreren individuell definierbaren Bohrungen möglich. Über eine Profilanzeige besteht die Möglichkeit, sich den Verlauf der Gasinhalte im Zuge der Datennachbehandlung über eine ausgewählte Distanz ausgeben zu lassen. Konventionelle Erdgaslagerstätten, bei denen freies Gas in porösem Gestein gespeichert ist, können ebenso modelliert werden. Die Software SimedWin erlaubt es, ein breites Spektrum an Parametern festzulegen, beispielsweise zur Defini-

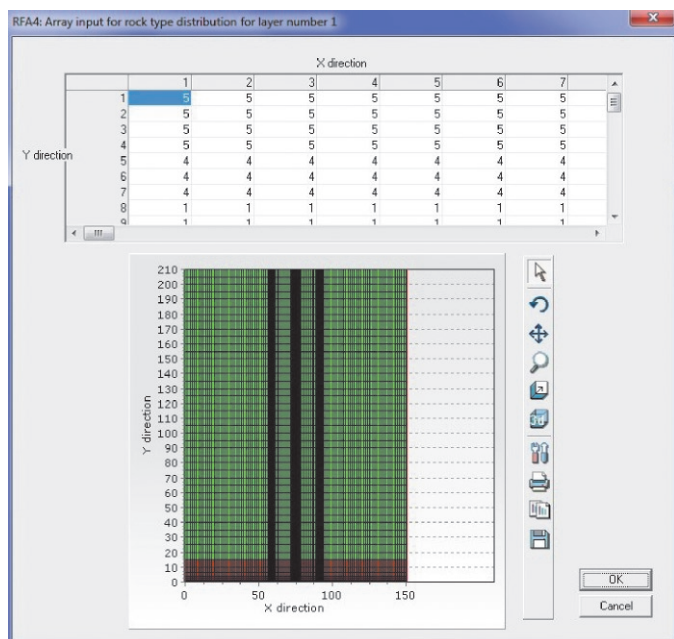


Fig. 6. Definition of rock types in the coordinate system.
Bild 6. Festlegung der Gesteinstypen im Koordinatensystem.

to pre-calculate the recoverable gas volumes. It is possible to model several individual defined wells for this purpose. It is also possible to show the distribution of the gas contents in a profile view over a certain distance during the post-processing. Conventional gas reservoirs, in which free gas is stored within porous rock, can be modelled. The software SimedWin allows to define a wide range of parameters, e.g. to define the wells and its operating parameters as well as to characterize rock layers precisely. Figure 6 offers an example for the definition of different rock types within a certain rock layer. The grid system was chosen regular Cartesian. The exponential structure of the coordinate system in y-direction emphasizes the intensified gas migration adjacent to the borehole. The certain rock type defined by specific properties such as viscosity, density, different physical approaches and permeability is related to each grid within the model. Seven layers are chosen within the models to describe the complex geology.

A comprehensive sensitivity analysis was carried out in order to examine the influence of several parameters on the result of the simulation. It could be revealed, that a large number of parameters exerts a minor influence on the result of the simulation at a permeability being lower than 1 mD whereas even small variations of permeability show a significant impact.

5 Analysis of the data and results

Only the categories “undisturbed area” and “area being influenced by the edges of mined panels” are considered in the analysis using two approaches, as these two categories need less assumptions to be made. Thus, the verification of the results out of SimedWin with the operational data from Prosper-Haniel colliery is of greater significance in these two categories.

5.1 Approach 1

The profile view of the total gas contents in SimedWin are compared to selected distributions of gas contents being measured

tion der Bohrungen, der Betriebsparameter sowie zur präzisen Charakterisierung von Gesteinsschichten. Bild 6 zeigt ein Beispiel für die Festlegung von verschiedenen Gesteinstypen innerhalb einer Schicht. Die Darstellung erfolgt in einem kartesischen Koordinatensystem, wobei der exponentielle Aufbau in y-Richtung die verstärkte Gasabgabe in unmittelbarer Bohrlochnähe verdeutlicht. Jedem Block wird im Modell der jeweilige Gesteinstyp mit spezifischen Eigenschaften, wie beispielsweise Viskosität, Dichte, verschiedene physikalische Ansätze und Permeabilität zugeordnet. Zur Darstellung der komplexen Geologie sind in den Modellen sieben Schichten gewählt worden.

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf den Verlauf der Simulation zu untersuchen, ist eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse durchgeführt worden. Hierbei zeigte sich, dass eine Vielzahl von Parametern bei einer Permeabilität von kleiner als 1 mD einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Simulationen hat, während selbst bei kleinen Variationen der Permeabilität bereits ein signifikanter Einfluss zu beobachten war.

5 Analyse der Daten und Ergebnisse

In der Auswertung nach zwei Ansätzen werden lediglich die Kategorien „ungestörter Bereich“ und „Bereich des Abbaukanteninflusses“ berücksichtigt, da hier weniger Annahmen getroffen werden müssen. Die Verifikation der Ergebnisse aus SimedWin mit den betrieblichen Daten des Bergwerks Prosper-Haniel besitzt in diesen beiden Kategorien somit eine größere Aussagekraft.

5.1 Auswertung nach Ansatz 1

In diesem Ansatz werden Gesamtgasinhaltsprofile, die mit SimedWin ausgegeben werden, mit ausgewählten Verläufen der im Zuge des Abbaus nachträglich durchgeführten Gasinhaltsbestimmungen verglichen. Die restlichen Gasinhaltsbestimmungen eines Abschnitts werden hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit untersucht („Ausreißer“ oder nicht repräsentative Kurvenverläufe) und der Durchschnittswert dieser weiteren Gasinhaltsbestimmungen mit dem Ergebnis aus SimedWin verglichen. Hierbei wird immer der maximale Gesamtgasinhalt, der in der Mitte zweier paralleler Bohrungen auftritt und den entsprechenden Kurven entnommen werden kann, verwendet. Bei den mit SimedWin ausgegebenen Werten handelt es sich grundsätzlich um die reduzierten Gesamtgasinhalte. Um auf den desorbierbaren Gasinhalt umzurechnen, wird die Differenz mit dem q_{1bar} -Wert gebildet, der in der Regel bei $1,5 \text{ m}^3/\text{t}$ liegt.

Bild 7 zeigt den Kurvenverlauf der nachträglichen Gasinhaltsbestimmung für Proben aus einer Bohrung im Flöz Zollverein 1. Der maximale Gesamtgasinhalt der Kurve von $8,3 \text{ m}^3/\text{t}$ wird in der Regel zwischen zwei Bohrungen erreicht. In diesem Fall wurden die Gasinhalte für Proben aus der Strebendstellung bestimmt, also hinter Bohrloch 1 (Zollverein 1).

Bild 8 zeigt exemplarisch die typische Darstellung der durch die Vorentgasung reduzierten Gesamtgasinhalte in SimedWin für die sechste Schicht im Modell (Flöz Zollverein 1). Zwischen den Bohrungen konnte eine Reduktion der Gesamtgasinhalte von $12,5 \text{ m}^3/\text{t}$ auf rund $6,5 \text{ m}^3/\text{t}$ erreicht werden. Die im Labor der DMT durchgeführten nachträglichen Gasinhaltsbestimmungen wurden in diesem Abschnitt ausschließlich für das Flöz Zollverein 1 durchgeführt.

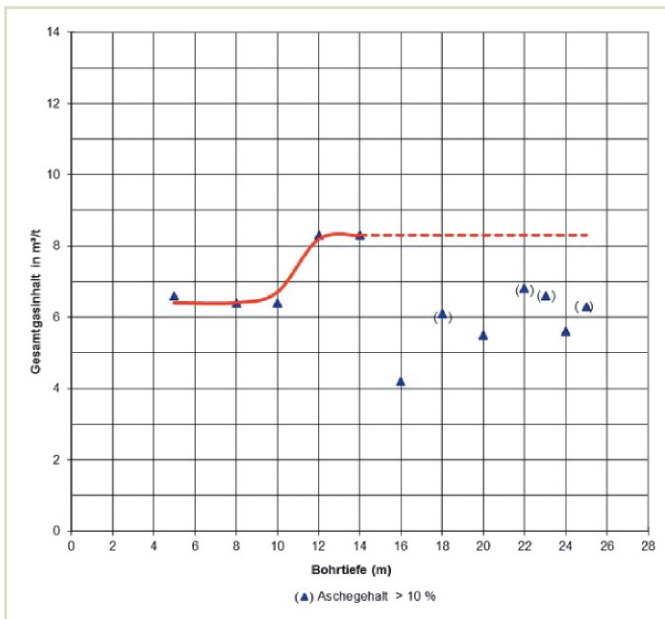


Fig. 7. Gas content analysis during the winning process, shield 130, station 228 m, Zollverein 1 seam.
Bild 7. Nachträgliche Gasinhaltsbestimmung, Schild 130, Station 228 m, Flöz Zollverein 1.

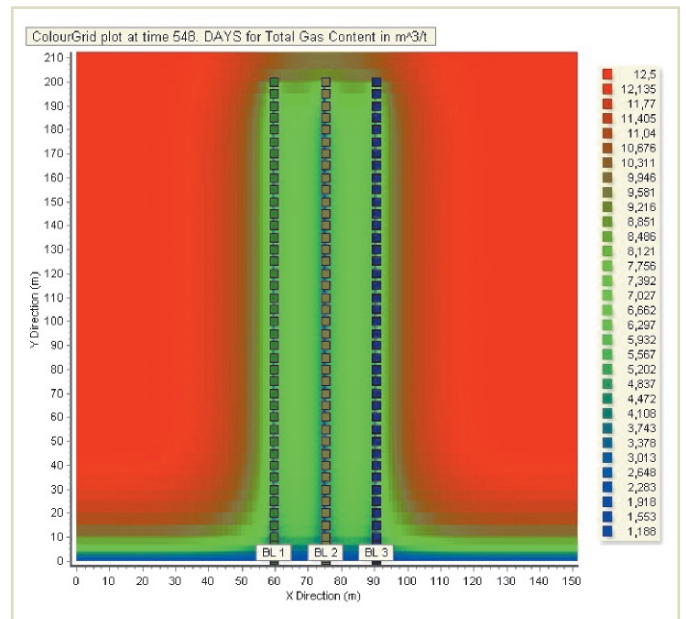


Fig. 8. Presentation of total gas contents in SimedWin, drift 123.1, section 1.
Bild 8. Darstellung der Gesamtgasinhalte in SimedWin, Strecke 123.1, Abschnitt 1.

during the winning process in this approach. The residual gas content analyses of a section are examined in consideration of their significance (“outliers” or distributions being not representative) and the average values of these further gas content analyses are compared to the results out of SimedWin. The maximum total gas content is used hereby, which occurs in the middle between two parallel boreholes. In principle, the values simulated by SimedWin are the reduced gas contents. These values need to be converted to receive the desorbable gas content from the difference with q_{1bar} -value, which is usually $1.5 \text{ m}^3/\text{t}$.

Figure 7 shows the distributions of the gas content for samples from a drilling into Zollverein 1 seam over the drilling depth. The maximum total gas content occurs generally between two boreholes. The gas contents were analyzed for samples taken out of the dismantling roadway of panel 123 behind the first borehole (Zollverein 1) in this case.

Beim Vergleich mit der Profilsicht wird deutlich, dass der reduzierte Gesamtgasinhalt zwischen den Bohrungen rd. $6,5 \text{ m}^3/\text{t}$ beträgt (Bild 9). Der Gesamtgasinhalt liegt demnach unter dem Wert, der mit den nachträglich durchgeführten Bestimmungen ermittelt wurde. Ein Grund hierfür kann sein, dass die betrachtete nachträgliche Gasinhaltsbestimmung in der Strebendstellung durchgeführt wurde, also nicht zwischen zwei Bohrlöchern liegt, aus deren gegenseitiger Beeinflussung ein niedrigerer Gesamtgasinhalt resultieren würde.

Bei Betrachtung der weiteren für diesen Abschnitt durchgeführten Gasinhaltsbestimmungen fällt auf, dass sich die erhöhten Gesamtgasinhalte eher im Bereich der Strebendstellung befinden. Werden diese Gesamtgasinhalte bei der Ermittlung des Durchschnittswerts nicht berücksichtigt, ergibt sich ein Mittelwert von $6 \text{ m}^3/\text{t}$. Dieser liegt somit noch unter dem mit SimedWin ermittelten Gesamtgasinhalt.

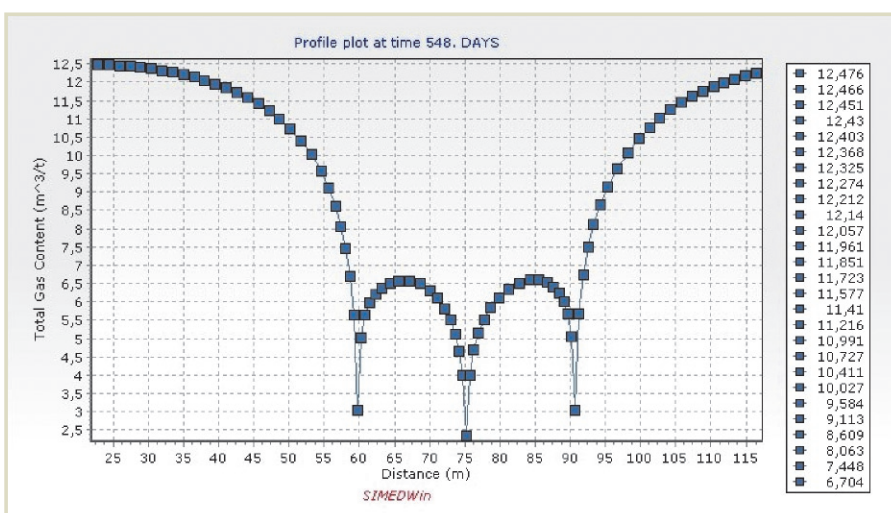


Fig. 9. Profile view of total gas contents, drift 123.1, section 1.
Bild 9. Profilsicht der Gesamtgasinhalte, Strecke 123.1, Abschnitt 1.

	Gasvolumen Betriebsdaten [m³]	Gas beim Bohren [m³]	Gasvolumen Betriebsdaten Gesamt [m³]	Gasvolumen mittleres BL SimedWin [m³]	mittleres BL SimedWin x Anzahl BL [m³]	Korrekturfaktor BL-Länge	Korrektur BL-Länge [m³]	Prozentualer Anteil Ergebnis SimedWin an Betriebsdaten
123.0 Abschnitt 2	64.053	149.217	213.270	79.880	399.401	0,482	192.512	90%
123.0 Abschnitt 5	20.691	73.924	94.615	208.454	-	0,773	161.135	170%
123.0 Abschnitt 6	68.459	141.003	209.462	81.138	649.102	0,537	348.568	166%
123.0 Abschnitt 7	84.005	250.520	334.525	46.718	467.182	0,617	288.251	86%
123.1 Abschnitt 1	97.108	339.704	436.812	77.607	853.678	0,714	609.526	140%

Table 1. Results of approach 2. // Tabelle 1. Ergebnisse nach Ansatz 2.

Figure 8 shows exemplarily the total gas contents in SimedWin being reduced by pre-drainage for the sixth layer within the model (Zollverein 1 seam). The total gas contents could be reduced from 12.5 m³/t to 6.5 m³/t between the boreholes. The gas content analyses in the laboratory of the DMT were only carried out for Zollverein 1 seam in this section.

In comparison with the profile view it appears, that the reduced total gas content between the boreholes is 6.5 m³/t (Figure 9). Hence the total gas content is below the value being determined within the analyses in the laboratory. One reason for this could be, that the considered gas content analysis was carried out for samples being taken out of the dismantling roadway of panel 123. Thus, the gas content analysis does not cover the mutual influence of two adjacent boreholes resulting in a less total gas content.

The further gas content analyses in this section which were carried out in the laboratory reveal, that increased total gas contents rather occur near the dismantling roadway of panel 123. If these total gas contents are not taken into consideration, the average value is 6 m³/t, thus below the total gas content being determined by SimedWin.

5.2 Approach 2

In this approach the entire extracted volume of methane at Prosper-Haniel Colliery for selected sections, for which a consistent data situation existed, is compared to the results of SimedWin (Table 1). To begin with, the share of each borehole in the entire drained volume of methane within one group of wells in relation to the borehole length is determined in order to calculate the extracted volume of methane within the sections. The values of each wells are summarized for the sections subsequently. The gas volume which entered the central borehole in the model within a defined period is multiplied by the actual number of drilled wells for pre-drainage to determine the entire extracted volume of methane being calculated with SimedWin. In principle, the ideal borehole length being created within the models is 200 m, so that a correction factor is needed in relation to the actual borehole length:

Correction factor = actual drilling meters/ideal drilling meters

The gas volume based on the operational data of Prosper-Haniel colliery is compared to the corrected result of SimedWin. The corresponding cells in table 1 are colored. The yellow cells show that the corrected values are below the data being measured in practice, the red cells mean that the simulated values ex-

5.2 Auswertung nach Ansatz 2

Im zweiten Ansatz wird das insgesamt abgesaugte Methanvolumen im Bergwerk Prosper-Haniel für ausgewählte Abschnitte, für die eine konsistente Datenlage vorhanden war, mit den Ergebnissen aus SimedWin verglichen (Tabelle 1). Um das abgesaugte Methanvolumen in den Abschnitten bestimmen zu können, wird zunächst der Anteil jedes Bohrlochs an dem insgesamt abgesaugten Methanvolumen einer Absaugegruppe in Abhängigkeit der Bohrlochlängen ermittelt. Die Werte der einzelnen Bohrlöcher werden dann für die Abschnitte entsprechend addiert. Um das mit SimedWin ermittelte insgesamt abgesaugte Methanvolumen für einen Abschnitt zu bestimmen, wird das dem mittleren Bohrloch in dem entsprechenden Zeitraum zugeströmte Volumen an CH₄ mit der Anzahl der tatsächlich in diesem Abschnitt erstellten Vorentgasungsbohrlöcher multipliziert. Da die Bohrlöcher in den Modellen im Allgemeinen mit der Ideallänge von 200 m konstruiert sind, bedarf es eines Korrekturfaktors in Abhängigkeit von den Bohrlochlängen:

Korrekturfaktor = Bohrmeter tatsächlich/Bohrmeter ideal

Verglichen wird hierbei das aus den Betriebsdaten berechnete Gasvolumen mit dem korrigierten Endergebnis aus SimedWin. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Zellen farbig markiert. Die gelb markierten Zellen stellen dar, dass die korrigierten Werte unter dem betrieblich bestimmten Gasvolumen liegen, die rot markierten Zellen zeigen entsprechend, dass die simulierten Werte nach der Korrektur höher als die betrieblichen Werte sind. Aus den Ergebnissen der betrachteten Abschnitte wird ersichtlich, dass die abgesaugten Gasvolumina aus der Simulation nach der Korrektur tendenziell über den betrieblichen Gasvolumina liegen. Die Abweichungen sind grundsätzlich sehr deutlich. In der äußersten Spalte ist zur Verdeutlichung des Unterschieds der prozentuale Anteil des korrigierten Werts mit SimedWin an dem betrieblich abgesaugten Gesamtgasvolumen dargestellt. Wird beispielsweise das Gasvolumen aus den Betriebsdaten im Abschnitt 2 in der Strecke 123.0 als 100 % betrachtet, ist das korrigierte Ergebnis mit SimedWin um 10 % niedriger. Im Abschnitt 5 in der Strecke 123.0 hingegen ist das Ergebnis aus SimedWin gegenüber dem betrieblichen Wert um 70 % erhöht.

5.3 Fehleranalyse und Einflüsse

Gründe für die Abweichung der mit SimedWin ermittelten abgesaugten Gasvolumina und Gesamtgasinhalte vom Ist-Zustand finden sich grundsätzlich in den Möglichkeiten der Darstellung mit der Software, in den Betriebsdaten an sich, in der Komplexi-

ceed the operational data from Prosper-Haniel colliery after being corrected. Thus, the drained gas volumes being determined in the software tend to exceed the gas volumes in practice. In principle, the deviations are significant. The corrected value's percentage in the data of the colliery is shown in the outmost column of the table to emphasize the difference. If the gas volume based on the data of Prosper-Haniel is considered as 100 %, the corrected result of SimedWin is 10 % lower, whereas the result of SimedWin exceeds the data of the colliery by e.g. 70 % in section 5 in drift 123.o.

5.3 Failure analysis and impacts

In principle, the reasons for the deviations of the drained gas volumes as determined by SimedWin from the current status are the options of representation with the software, the operational data of Prosper-Haniel colliery, the complexity of the deposit and the general assumptions which had to be made to simplify as well as to transfer the reality into a model. In the following, the most essential impacts on the result are presented:

- A large number of parameters being defined in SimedWin: A sensitivity analysis was carried out to examine the influence of some of these parameters for a permeability less than 1 mD. In practice, the permeability within a deposit is varying, so that the value could be higher resulting in an increased importance of some of these parameters.
- Comparison of the operational data of Prosper-Haniel colliery to the results of SimedWin: Monitoring of pre-drainage was not carried out under empirical aspects, as it was not known at the time of drilling of the wells that a diploma thesis with the objective of transferring a panel of Prosper-Haniel colliery into a model as well as the verification of the results with the current status was planned.
- Transfer of a complex deposit into a model.
- Theoretical assumptions to create a correlation between mechanical pressures acting on panel 123 and permeability of the coal, the rock layers and the partings (coal and rock).

6 Summary

In the presented paper models were created by appliance of the software SimedWin, which is used at DMT in order to compare the software results to the current status of the operational data of Prosper-Haniel colliery concerning reduced gas contents and drained volumes of methane. Two approaches and an extensive failure analysis were applied for the analysis.

Considering approach 1 the simulated total gas contents tend to exceed the values being determined in the laboratory, so that it is possible to make reliable predictions with the results of the software regarding safety. Approach 2 shows that the software results differ from the practical data in both directions despite the appliance of a correction factor.

The software is already internationally applied under simpler conditions – one seam mining in Australia and coal bed methane production from undisturbed coal seams. In this paper SimedWin was used for the first time in combination of great depth and multiple seam mining.

In principle, a simulation of pre-drainage is possible but currently afflicted with inaccuracies. Further correction factors can

tät der Lagerstätte und in den allgemeinen Annahmen, die zur Vereinfachung sowie Übertragung der Realität auf ein Modell getroffen werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Fehlereinflüsse exemplarisch aufgeführt:

- Eine Vielzahl von mit SimedWin definierbaren Parametern: Über eine Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss einiger davon bei einer Permeabilität von weniger als 1 mD durchgeführt. Innerhalb der Lagerstätte sind Schwankungen der Permeabilität möglich, so dass der Wert größer sein kann, wodurch manche Parameter dennoch wirksam werden können.
- Vergleich der betrieblichen Daten mit den Ergebnissen aus SimedWin: Keine Durchführung der Vorentgasung unter empirischen Gesichtspunkten, da zum Zeitpunkt der Herstellung der Vorentgasungsbohrlöcher die Anfertigung einer Diplomarbeit mit dem Ziel der Übertragung einer Bauhöhe des Bergwerks Prosper-Haniel in ein Modell sowie der Verifikation der Ergebnisse mit dem Ist-Zustand noch nicht bekannt war.
- Übertragung der komplexen Lagerstätte in ein Modell
- Theoretische Annahmen zur Herstellung eines Zusammenhangs zwischen den auf die Bauhöhe 123 wirkenden mechanischen Drücken und der Permeabilität der Kohle, der Berge und des Zwischenmittels.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden mit der bei der DMT neu eingesetzten Software SimedWin Modelle zur Simulation konstruiert, mit deren Ergebnissen der Ist-Zustand in der Bauhöhe 123 auf dem Bergwerk Prosper-Haniel hinsichtlich reduzierter Gasinhalte und abgesaugter Methanvolumina verglichen wurde. Für die Auswertung kamen zwei Ansätze sowie eine umfangreiche Fehlerbetrachtung zur Anwendung.

Nach Ansatz 1 liegen die simulierten Gesamtgasinhalte tendenziell über den tatsächlich nach Betrieb der Vorentgasung im Labor bestimmten Werte, so dass man mit den Ergebnissen aus der Simulation bezüglich Sicherheit gute Aussagen treffen kann. Nach Ansatz 2 weichen die Ergebnisse aus SimedWin gegenüber der Realität trotz des Korrekturfaktors in beide Richtungen ab.

International kommt die Software bereits erfolgreich unter einfacheren Bedingungen – Einflözabbau in Australien und Flözgasgewinnung im unverritzten, bergmännisch unbeeinflussten Gebirge – zum Einsatz. In den Versuchen ist SimedWin erstmalig in Kombination aus großer Teufe und Mehrflözabbau angewendet worden.

Eine Simulation der Vorentgasung ist somit grundsätzlich möglich, zur Zeit aber noch mit größeren Ungenauigkeiten. Für einige Einflüsse, wie die Erfahrung der Bohrmannschaft, lokale Veränderungen des geologischen Aufbaus in der Bauhöhe oder die Ablenkung von Bohrungen, können auf Basis empirischer Versuche weitere Korrekturfaktoren ermittelt werden. Zur Vergleichbarkeit der betrieblichen Daten mit den Ergebnissen aus SimedWin empfiehlt sich eine systematische Datenerfassung im Hinblick auf möglichst identische Bohrlochabstände und -anzahl pro Gruppe, ein Ablesen der Volumenströme in regelmäßigen Intervallen, eine flächendeckende nachträgliche Bestimmung der Gasinhalte, eine Definition der Abschnitte einer Bauhöhe im Vorfeld, eine Probenahme zur Bestimmung der Permeabilität für die Gesteinstypen in repräsentativer Anzahl sowie eine präzise Kenntnis lagerstättenspezifischer Parameter.

be determined based on empirical studies for some impacts, such as the experience of the drilling crew, local changes concerning the geological structure within the panel as well as deviations in the direction of the well. In the interest of comparability with the data of Prosper-Haniel colliery and the results of the software a systematic data collection is recommended regarding as identical distances between wells as possible, an identical number of wells within one monitoring group, regular intervals in which volume flow rates are being read off, a comprehensive determination of gas contents after pre-drainage, a classification of a panel to categories, sampling for determination of permeability for different rock types as well as a precise knowledge of the parameters of a deposit.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Brandt, J.: Schlussbericht über das Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben „Bekämpfung von Gasausbrüchen und Gebirgsschlägen – Teil 1: Steigerung der Effizienz bei der Bekämpfung gasdynamischer Ereignisse“. DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, 1998.
- (2) Baltz, R.: Beschreibung der Präsentationen „Ergebnisse zur Gasbeherrschung im Flöz Zollverein 1/2, Bergwerk Prosper-Haniel“. Anlagen zum Untersuchungsbericht, DMT GmbH & Co. KG, 2012.
- (3) Appel, S.; Baltz, R.: Präsentation zur Nachschulung „Gasausbruchsverhütung Bergwerk Prosper-Haniel – Erfahrungen aus der ersten Bauhöhe 123, Flöz Zollverein 1/2. RAG AG, DMT GmbH & Co. KG, 2015.
- (4) DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH (Hrsg.): Empfehlung zu Nebengesteinsuntersuchungen unter besonderer Berücksichtigung der Gebirgsschlaggefahr. Betriebsempfehlungen für den Steinkohlenbergbau. Verlag Glückauf GmbH Essen, 1992.
- (5) Bräuner, G.: Gebirgsschläge und ihre Verhütung. Verlag Glückauf GmbH Essen, 1992.
- (6) Baltz, R.: Präsentation „Beurteilung der Annäherung des Abbaubetriebes 123 an die vorgeplante Ausfahrgasse“. DMT GmbH & Co. KG, 2014.
- (7) Baltz, R.; Gwizdz, R.: Präsentation „Gasausbruchsverhütung – Auswertung der bisher ermittelten Daten – Flöz Zollverein 1/2, Bergwerk Prosper-Haniel“. DMT GmbH & Co. KG, 2013.
- (8) Meiners, H.: Gasströmungsvorgänge in Kohlenflözen unter Abbaueinfluss. Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, RWTH Aachen, 1987.
- (9) Appel, S.: Präsentation „Anlauf der BH 123 ZV 1/2 ab November 2014“. Wetterabteilung, Bergwerk Prosper-Haniel, RAG AG.
- (10) Stevenson, M.; Pinczewski, V.: Simed-II – Multicomponent coalbed methane gas simulator, procedures manual. 1998.

Author / Autor

Dipl.-Ing. Stephan Sziget, Nachwuchingenieur Mining,
K+S Aktiengesellschaft, Kassel