

Using a Hierarchical Approach for the Dilution of Gases

In order to ensure safe underground working conditions, especially in case of gas outbursts, it is essential to develop ventilation concepts for the necessary dilution of harmful gases with respect to the occurring gases, gas concentrations and general operational conditions as to cross-sectional areas and existing ventilation systems. Therefore, a concept for a hierarchical approach for the dilution of gases was developed, combining Computational Fluid Dynamics (CFD) and Ventilation Network modeling. For the two-phase gas/air flow that occurs during a gas burst, a CFD simulation was performed and the behavior of the gas burst and its

impact on the existing ventilation were analysed. Based on the simulation, various measures for the dilution of air dependent upon the severity of the gas burst as well as the geometrical conditions were tested and evaluated according to their efficiency. An integration of the simulation results into the existing superior ventilation network calculations was then performed with the Mine Ventilation Simulation Software Ventsim™, a tool that provides compressible ventilation system calculations and is capable of delivering the requirements for the development of quick, effective and safe ventilation concepts.

Anwendung eines hierarchischen Ansatzes für die gezielte Verdünnung von unter Tage auftretenden schädlichen Gasen

Um die Sicherheit der Belegschaft unter Tage auch beim Auftreten von Gasen und Gasausbrüchen gewährleisten zu können, ist eine zielgerichtete Entwicklung von Bewetterungskonzepten in Hinblick auf eine notwendige Verdünnung schädlicher Gase in Abhängigkeit der auftretenden Gase, Gaskonzentrationen sowie betrieblichen Rahmenbedingungen unerlässlich. Aus diesem Grund wurde ein hierarchischer Ansatz für eine gezielte Verdünnung von auftretenden schädlichen Gasen entwickelt, der die klassische Wetternetzrechnung mit einer numerischen Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics – CFD) kombiniert. Das während eines Gasausbruchs aus Luft und Gas bestehende freierwerdende Zwei-Phasen-Gemisch wurde mithilfe einer CFD-

Simulation für einen räumlich begrenzten Bereich nachgebildet und dessen Auswirkungen auf das existierende Wetternetz werden analysiert. Auf Grundlage der Simulation können verschiedene Maßnahmen für eine gezielte Verdünnung in Abhängigkeit der Schwere des Gasausbruchs, der geometrischen Randbedingungen, der spezifischen Eigenschaften der auftretenden Gase sowie deren Wechselwirkungen getestet und hinsichtlich ihrer Effektivität bewertet werden. Eine Integration der Ergebnisse aus der Strömungssimulation in das übergeordnete Wetternetzmodell erfolgte mit Hilfe des Wetternetzrechnungsprogramms Ventsim™, das die Entwicklung und Erstellung von schnellen, effektiven und sicheren Bewetterungskonzepten unterstützt.

1 Problem Definition

In order to provide safe working conditions underground it is essential to develop and evaluate suitable ventilation concepts and strategies for the necessary dilution of harmful gases. The reasons and sources for gases in underground could be diverse, e.g. gas emissions due to blasting, the usage of combustion engines or sudden release of gas during an outburst. Though most outbursts in the world are associated with methane, gas outbursts associated with carbon dioxide “are more violent, more difficult to control and more dangerous because of the greater sorption capacity for carbon dioxide” (1). In Germany carbon dioxide could occur in salt deposits due to volcanic activities resulting in an inclusion of carbon dioxide within the crystal lattice, leading to potentially sudden releases (2). Based on the amount of gas released the re-

1 Motivation

Ein auf die jeweiligen Betriebsbedingungen abgestimmtes Bewetterungskonzept stellt für einen untertägigen Bergbaubetrieb eine zwingende Voraussetzung für die Gewährleistung eines sicheren Betriebsablaufs dar. Um die Sicherheit der Belegschaft unter Tage auch beim Auftreten von schädlichen Gasen und Gasausbrüchen gewährleisten zu können, ist darüber hinaus eine Entwicklung von Bewetterungskonzepten in Hinblick auf eine notwendige Verdünnung der schädlichen Gase in Abhängigkeit der auftretenden Gase, Gaskonzentrationen sowie betrieblichen Randbedingungen, Querschnittsdimensionierungen und vorhandener Wetterführung unerlässlich. Gase entstehen bzw. werden auf unterschiedliche Art und Weise freigesetzt, sei es z.B. durch die Umsetzung von Sprengstoffen, den Einsatz von

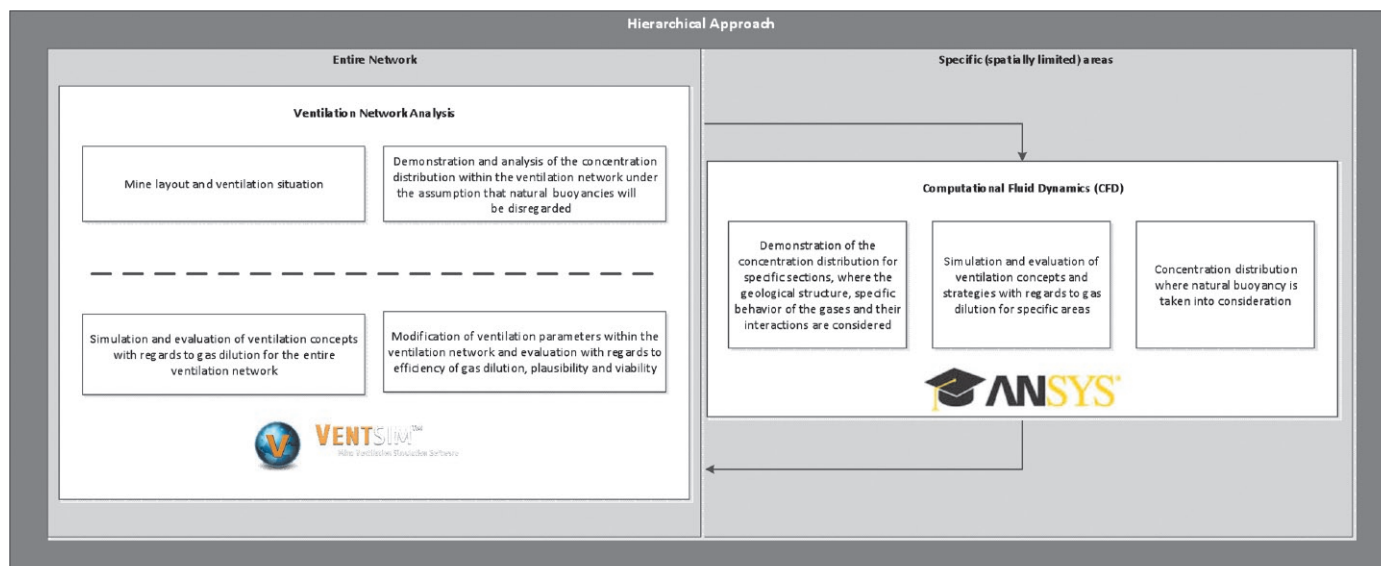


Fig. 1. Hierarchical approach for the dilution of gases. // Bild 1. Hierarchischer Ansatz für die Verdünnung von auftretenden schädlichen Gasen.

quired airflow for a proper dilution can be determined. This will be more complicated in case of specific areas with complex geometry, which, depending on gas characteristics, could lead to an accumulation of gases in floor depressions or underneath the roof and needs to be integrated in ventilation network calculation. As ventilation network calculations need to make several assumptions, such as perfect mixing of gases or one dimensional flow pattern in the airways a combination with CFD modeling, taking into consideration i.a. geometrical structures as well as gas characteristics, though only possible for spatially limited areas, may be beneficial.

This paper will present a hierarchical approach for the development of ventilation strategies in case of the occurrence of gases and after gas outburst by generating and evaluating dilution strategies for specific, spatially limited areas whilst integrating the results into the overall ventilation network model. The methodology, models and its interaction will be explained and applied to an exemplary case study. In the conclusion, the suitability of the approach will be assessed and an outlook into current advancements and future work be given.

2 Methodology

The methodology proposed is based on a hierarchical and iterative approach taking into consideration the mine layout and overall ventilation situation on the one hand, and individual requirements in the network related to complex geometrical structures and specific gas characteristics on the other hand.

The primary stage using Ventilation Network Analysis is applied for simulating the airflow through the entire mine network, allowing for ventilation design through airflow as well as pollutant dispersion and comprising following elements and aspects (Figure 1, left):

- mine layout and ventilation situation;
- demonstration and analysis of the concentration distribution within the ventilation network under the assumption that natural buoyancies remain unmodified.

Verbrennungsmotoren oder auf Grund von Gasausbrüchen. Auch wenn die meisten Gasausbrüche weltweit auf Grund von auftretendem Methan entstehen, gelten CO₂-Ausbrüche als „heftiger, schwieriger kontrollierbar sowie gefährlicher“ (1). Auf Grund von vulkanischen Aktivitäten kann Kohlendioxid, wie am Beispiel der Kalisalzlagerstätten an der Werra, im Kristallgitter der Salze eingeschlossen sein und schlagartig freigesetzt werden (2). Auf Grundlage der angenommenen Ausbruchsmenge kann der Wettermengenbedarf grundsätzlich für eine gezielte Verdünnung der auftretenden Gase bestimmt werden. Für bestimmte kritische Bereiche und Ausbruchsmengen kann darüber hinaus die Notwendigkeit bestehen, weitere Eigenschaften des strömenden Mediums und deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen, um eine Ansammlung von Gasen in Senken oder unterhalb der Firste zu verhindern. In Wetternetzberechnungen werden unterschiedliche Annahmen getroffen, wie z.B. eine vollständige Vermischung der Gase. Um ebenfalls die kritischen Bereiche innerhalb des Wetternetzprogramms berücksichtigen zu können, wurde der Ansatz gewählt, die bei einem Gasausbruch auftretende aus einem Luft- sowie Gasanteil bestehende Zwei-Phasen-Strömung für die betrachtete Betriebssituation mit Hilfe einer numerischen Strömungssimulation nachzubilden und das Verhalten sowie die Auswirkungen eines Gasausbruchs auf die bestehende Bewetterungssituation zu analysieren. Auf Grundlage dieser Simulation können in Abhängigkeit der Lagerstättenstruktur sowie Schwere des Gasausbruchs unterschiedliche Maßnahmen für eine Verdünnung der Wetter getestet, in Bezug auf ihre Effektivität bewertet sowie diese daraufhin in das übergeordnete Wetternetzrechnungsprogramm integriert werden.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird der entwickelte hierarchische Ansatz mit seinen Teilmodellen vorgestellt sowie auf eine exemplarische Betriebssituation angewendet. In der abschließenden Zusammenfassung wird die Eignung des Konzepts bewertet sowie ein Ausblick auf aktuelle und zukünftige Forschungstätigkeiten gegeben.

Such a simulation, however, makes various simplifications such as perfect mixing of gases and flow pattern in the airways as being one dimensional, among others.

Therefore, at the secondary stage a CFD model is applied, which is capable of simulating multiphase dynamic flows for complex geometries with respect to the specific gas characteristics and their respective interactions. Nevertheless, such a simulation is based on geometry discretization and the quality of the results depends on the convergence and boundary condition specifications. Furthermore, due to computation capacity and costs, CFD modelling is not feasible for complete mine network. In the hierarchical approach, following elements and aspects will be considered and evaluated for individual mine areas using CFD modeling (Figure 1, right):

- concentration distribution where natural buoyancy is taken into consideration;
- demonstration of the concentration distribution for specific sections, where the geometrical structure, specific behavior of the gases and their interactions are considered and
- simulation and evaluation of ventilation concepts and strategies with regards to gas dilution for specific areas.

Coupling the individual solutions through the hierarchical and iterative approach proposed assures that the independent results are coherent with each other, so that

- ventilation concepts developed at the secondary stage could be simulated and evaluated with regards to gas dilution for the entire network in the primary stage as well as
- ventilation parameters could be modified within the overall ventilation and evaluated with regards to the efficiency of gas dilution, plausibility and viability.

3 Model Explanation

The Ventilation Network Analysis was conducted using the software Ventsim™ from the Australian company Chasm Consulting. Ventsim™ is an underground mine ventilation simulation software package designed to model and simulate ventilation, airflows, pressures, heat, gases, radon, fire and many other types of ventilation data from a model of tunnels and shafts (3). Applying an iterative estimation method referred to as Hardy Cross Method, this software allows the calculation of airflows in a model by progressively adjusting the airflow values until estimation errors lie within acceptable limits (4). Simulation in Ventsim™ can perform airflow distribution and contaminant dispersion studies within a ventilation network, which is described as a definite structure of branches and nodes, defined with specific properties and connectivity. The purpose of using this tool for the hierarchical approach proposed is to be able to identify the distribution of gas after an outburst as well as to identify further dispersion resulting from targeted dilution from complex geometrical structures (Figure 2).

The gas dispersion analysis at this primary stage with Ventsim™ is performed using Contaminant Simulation tool of the software. This steady state simulation tool allows the user to trace different types of contaminants, such as gases, dust, and smoke among others, through a mine network. By distributing the contaminants linearly in airways and considering perfect

2 Methodik

Der entwickelte hierarchische Ansatz besteht aus zwei Ebenen, die entsprechend ihrer Eignung sowohl die übergeordnete wettertechnische Situation als auch für räumlich begrenzte Bereiche komplexe geometrische Strukturen sowie spezifische Eigenschaften der auftretenden Gase berücksichtigen und sich gegenseitig bedingen.

Die übergeordnete Ebene beinhaltet die Wetternetzrechnung und -analyse mit einer Bestimmung der Volumenstrom- sowie Schadstoffverteilung für das gesamte Wetternetz und berücksichtigt u.a. folgende Aspekte (Bild 1, links):

- Layout des Grubengebäudes und übergeordnete Bewetterungssituation,
- Darstellung und Analyse der Schadstoffverteilung innerhalb des Wetternetzes.

Die Wetternetzrechnung berücksichtigt dabei in der Regel zum einen einen durchschnittlichen Verlauf der jeweiligen Strecken, so dass lokal auftretende Senken nur bedingt berücksichtigt werden, sowie zum anderen eine Konzentrationsverteilung der auftretenden Gase unter der Annahme einer vollständigen und gleichmäßigen Vermischung.

Aus diesem Grund wird auf der untergeordneten Ebene eine numerische Strömungssimulation angewendet, mit der dynamische Mehrphasenströmungen bei komplexen geometrischen Strukturen unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Gase sowie deren Wechselwirkungen nachgebildet werden können. Die Simulation beruht dabei auf der Diskretisierung der geometrischen Struktur; die Qualität der Ergebnisse wird maßgeblich durch die Spezifikation und Definition der Konvergenz und Rahmenbedingungen beeinflusst. Darüber hinaus eignet sich die Anwendung einer numerischen Strömungssimulation auf Grund der notwendigen Rechenleistung nur für räumlich begrenzte Bereiche und nicht für das gesamte Wetternetz. Folgende Aspekte werden innerhalb der untergeordneten Ebene berücksichtigt (Bild 1, rechts):

- Schadstoffverteilung unter Berücksichtigung des natürlichen Auftriebs,
- Nachbildung der Schadstoffverteilung für bestimmte Bereiche unter Berücksichtigung der geometrischen Struktur, des spezifischen Verhaltens der Gase sowie deren gegenseitige Wechselwirkungen und
- Simulation und Bewertung von Bewetterungskonzepten und -strategien in Hinblick auf eine effiziente Verdünnung der auftretenden Gase für bestimmte Bereiche.

Die iterative Verknüpfung der individuellen Wirkungsweisen der beiden Ebenen innerhalb des hierarchischen Ansatzes gewährleistet eine Kohärenz zwischen den unabhängigen Ergebnissen, so dass

- die auf der untergeordneten Ebene entwickelten Bewetterungsstrategien innerhalb der übergeordneten Ebene für das gesamte Wetternetz nachgebildet, bewertet und validiert werden können sowie
- die Auswirkungen von Anpassungen innerhalb des gesamten Wetternetzes nachgebildet sowie in Hinblick auf die Effektivität

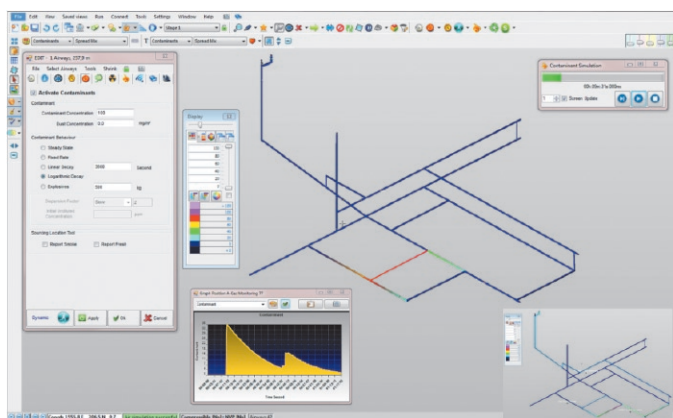


Fig. 2. Airflow and contaminant simulation in Ventsim™.
Bild 2. Nachbildung der Volumenstromverteilung und Schadstoffausbreitung in Ventsim™.

mixing at nodes, the software solves an otherwise much more difficult problem of multiphase flows with relative ease (4). However, it is important to note that this kind of assumption is only valid for high abstraction level studies, with consideration of large networks. A study requiring diffusion of one gas relative to the other in a 3 dimensional airway cannot be sufficiently addressed by this method.

Ventsim™ provides users with two different tools for simulating contaminant spread in a network: Steady State Simulation and Dynamic Simulation. The former method allows for mode-

tät der Verdünnung, Plausibilität und Realisierbarkeit bewertet werden können.

3 Beschreibung der Teilmodelle

Die Wernetzrechnung innerhalb der übergeordneten Ebene wurde mit Hilfe der Software Ventsim™ der australischen Firma Chasm Consulting durchgeführt. Bei Ventsim™ handelt es sich um ein kompressibles Wernetzrechnungsprogramm für untertägige Bergbaubetriebe für die Modellierung von Wernetzen sowie Simulation von Strömungsverhältnissen auf Grundlage des iterativen Verfahrens von Hardy-Cross unter Berücksichtigung von Volumenströmen, Drücken, Wärme, Gasen, Finanzdaten, Radon, Grubenbränden sowie einer Vielzahl von weiteren wettertechnischen Daten (3,4). Für jedes Netz, dessen Struktur über Knoten und Zweige definiert wird und u.a. durch Widerstandswerte, Druckquellen und -senken, Höhen und Temperaturen beschrieben werden kann, ist die Berechnung der Strömungs- und Druckverteilung sowie eine Analyse der Schadstoffverteilung und -ausbreitung möglich. Das Berechnungsverfahren berücksichtigt dabei, entsprechend den gesetzten stoffspezifischen Konstanten, den natürlichen Auftrieb sowie den Einfluss von Temperatur und Druck auf die Dichte und das Volumen des strömenden Gases. Innerhalb des hierarchischen Ansatzes kann so die Ausbreitung der Schadstoffe innerhalb des gesamten Wernetzes analysiert werden (Bild 2).

Die Analyse der Schadstoffverteilung innerhalb der übergeordneten Ebene wird mit Hilfe des Schadstoffmoduls der Software Ventsim™ durchgeführt, mit dem die Verteilung von

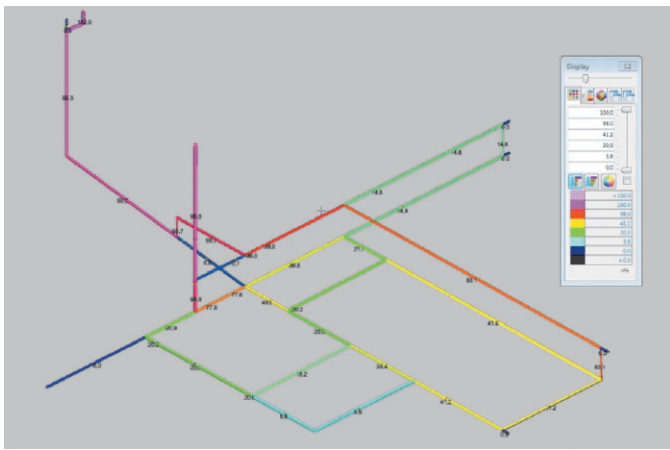


Fig. 3. Ventilation network for the example situation.
Bild 3. Wernetzmodell für die exemplarische Betriebsituation.

ling a spread of contaminant in the mine network based on the location of source and prevalent airflow. The simulation works until the distribution of contaminant in the network has reached an equilibrium concentration. In case of the latter method a time dependent spread of contaminant can be simulated and additionally allows the user to pause the calculations at any time and make changes in the network, which are taken into account for further calculations.

A gas source can be defined by changing the properties of an airway with contaminant concentration, either as percent initial concentration or in any other volumetric units. The simulated concentrations in the rest of the network pertain to the initial concentration at source diluted as a result of perfect mixing at junctions. In a dynamic contaminant simulation, the gas source can be defined with gas concentration for an airway as a function of time, for example fixed rate release, linear or logarithmic decay.

In addition, Ventsim™ provides simultaneous plausibility checks of important conditions within the ventilation network, e. g. plausibility check for the entire ventilation, dispersion of gases in the network and dilution as well as check for any resulting recirculation.

The modeling of the 3-Dimensional Gas Dispersion was conducted using the CFD software ANSYS. ANSYS CFD is a software package that uses numerical techniques and algorithms to solve and analyze fluid flow problems (5). ANSYS CFD codes basically solve the fluid flow problem, mathematically expressed by the Navier-Stokes equations, by additional simplifications and constraints put on by boundary conditions. The flow domain itself is divided into smaller volume elements and the fluid flow equations are solved iteratively for each of them. Another issue while simulating industrial flows is modeling of turbulence, which is solved in ANSYS by defining separate equations for turbulence related variables along with averaged Navier-Stokes equations.

A CFD simulation can incorporate multiple phases and components and solve for dispersion effects based on natural buoyancy and induced flows. A CFD code can be used to perform flow simulations in regular or irregular 3-dimensional geometrical domains as well as in a time-dependent manner. Two main methodologies exist for solving such multiphase problems, depending on

Schadstoffen allgemein, beispielsweise Gase, Staub und Rauch, innerhalb des Bergwerks nachgebildet werden kann. Da diese Simulationemethode eine vollständige Vermischung der Gase an Knotenpunkten sowie eine lineare Verteilung innerhalb der Strecken annimmt, eignet sich die Anwendung zumeist nur für eine durchschnittliche Betrachtung auf einem erhöhten Abstraktionsniveau.

Das Schadstoffmodul beinhaltet grundsätzlich zwei Möglichkeiten für die Simulation der Schadstoffverteilung innerhalb des Grubengebäudes: eine statische und eine dynamische Betrachtung, die sich in erster Linie in der Darstellung der Ergebnisse unterscheiden. Bei der statischen Betrachtung lässt sich nur eine gleichgewichtete Verteilung, bei der dynamischen Betrachtung hingegen der Verteilungsvorgang über die Zeit darstellen.

Die Berücksichtigung einer Gasquelle erfolgt über eine Änderung der Zweigeigenschaften, indem eine Ausgangskonzentration für das Auftreten eines bestimmten Gases vorgegeben wird. Neben einer Berücksichtigung der auftretenden Gase auf Grundlage der Ausgangskonzentration kann ebenfalls ein zeitabhängiger Zustrom definiert werden.

Die numerische Strömungssimulation für die dreidimensionale dynamische Mehrphasenströmung wurde mit Hilfe der CFD-Software ANSYS durchgeführt. Bei ANSYS CFD handelt es sich um eine Softwareanwendung für die Berechnung und Analyse von Strömungsproblemen auf Grundlage von numerischen Lösungsverfahren und Algorithmen (5). Innerhalb des ANSYS CFD codes werden Strömungsprobleme auf der Grundlage von Navier-Stokes-Gleichungen unter Anwendung zusätzlicher Vereinfachungen und Definition von Randbedingungen gelöst. Der Strömungsbereich als solcher wird hierfür in kleinere Volumeneinheiten unterteilt und die Strömungsgleichungen werden iterativ für jede einzelne Volumeneinheit gelöst. Durch die Definition von zusätzlichen Gleichungen können im Zusammenhang mit durchschnittlichen Navier-Stokes-Gleichungen turbulente Strömungsverhältnisse berücksichtigt werden. Innerhalb der CFD-Simulation können sowohl mehrere Phasen als auch Komponenten betrachtet werden; die Berechnung der Verteilung erfolgt unter Berücksichtigung des natürlichen Auftriebs sowie der induzierten Strömungen. Die Strömungssimulation kann zeitabhängig sowohl für gleichmäßige als auch ungleichmäßige geometrische Strukturen angewendet werden. Grundsätzlich können dabei in Abhängigkeit der Struktur der Phasen zwei Prinzipien für die Lösung von Mehrphasenströmungen angewendet werden: bei feinstverteilten Partikeln in einem gleichmäßigen Medium der Lagrange-Ansatz sowie bei kontinuierlichen Mehrphasenströmungen der Euler-Ansatz (6).

Innerhalb des hierarchischen Ansatzes wird die CFD-Simulation für die Nachbildung von komplexen geometrischen Strukturen und Strömungsverhältnissen verwendet. Hierfür wird eine transiente Mehrphasen Euler-Strömungssimulation auf Grundlage der Eingangsgrößen aus der übergeordneten Ebene, mit denen die Ausbruchsmenge und der Volumenstrom innerhalb des betrachteten Bereichs bestimmt werden können, durchgeführt. Mit Hilfe der Strömungssimulation lassen sich so unterschiedliche Bewetterungsstrategien in Hinblick auf die Effektivität testen und bewerten.

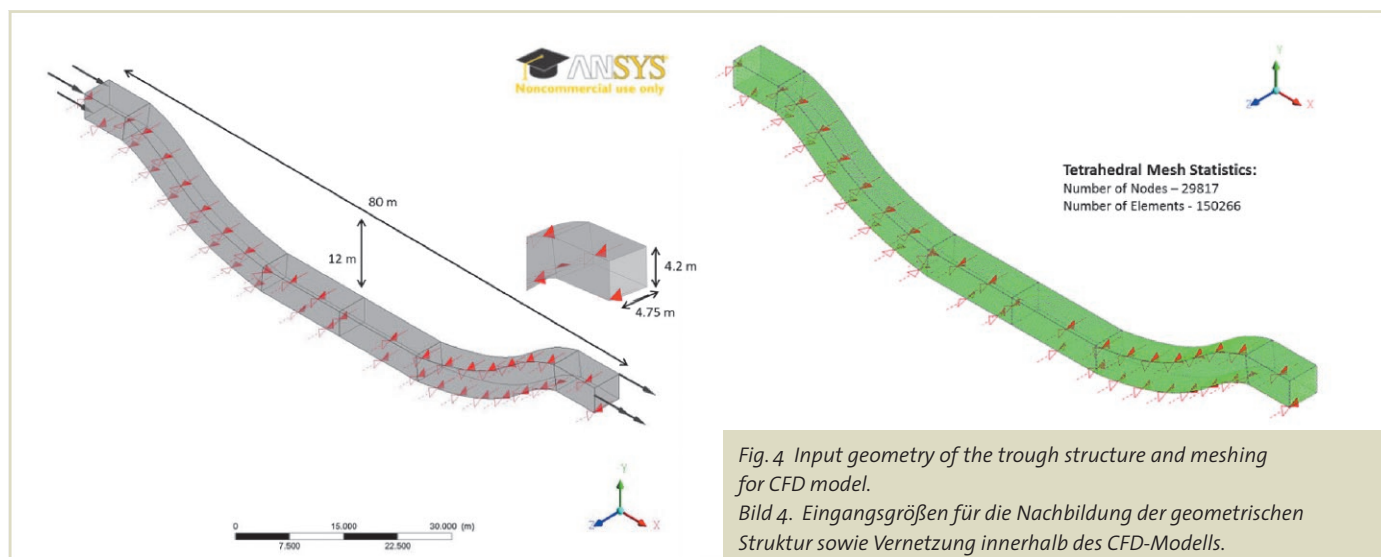


Fig. 4 Input geometry of the trough structure and meshing for CFD model.

Bild 4. Eingangsgrößen für die Nachbildung der geometrischen Struktur sowie Vernetzung innerhalb des CFD-Modells.

the phase configurations. In case of dispersed flows, with particulate components in continuous medium, the Lagrangian method is used, whereas for multiple continuous fluids simultaneously existing in a medium, Eulerian method is used (6).

In case of the hierarchical approach proposed for effective dilution of gas after outburst, CFD simulation is implemented to model complex geometrical flow domain. Transient and multiphase Eulerian flow simulations are performed based on the input conditions obtained from primary stage of solution approach, from where gas volume and airflow in the gallery can be determined. CFD simulations are used to test different ventilation strategies for dilution of gas related to complex geometrical structure.

4 Example Situation

An example situation is presented in order to demonstrate the process and effectiveness of the proposed hierarchical approach for the dilution of gas after an outburst. Figure 3 represents the ventilation network, with airflow distribution among different working regions. The example situation consists of two vertical shafts, intake and upcast, connecting different working areas of the mine between them. The mine network specifically consists of two major working districts at one level and additional areas where the development of headings for further working areas is

4 Exemplarische Betriebssituation

Die Darstellung der Anwendung und Wirkungsweise des hierarchischen Ansatzes erfolgt an Hand einer exemplarischen Betriebssituation (Bild 3). Die exemplarische Betriebssituation besteht aus zwei Schächten, einem ein- und einem ausziehenden Wetterschacht, sowie mehreren Abbau- und Vorrichtungsbetrieben auf zwei Sohlen. Die Haupttätigkeiten konzentrieren sich auf zwei Abbaubetriebe auf der unteren Sohle, die direkt mit den Frischwettern vom einziehenden Schacht versorgt werden; die weiteren Vorrichtungsbetriebe erhalten die Wetter aus den Abwettern der Abbaubetriebe. Es handelt sich um eine saugende Bewetterung mit einem installierten Lüfter am ausziehenden Schacht; die Anbindung des ausziehenden Schachts an das Grubengebäude erfolgt über einen Querschlag auf der unteren Sohle mit einer Verbindung zur oberen Sohle. Im Regelbetrieb ziehen die Abwetter über diesen Querschlag und die obere Sohle über den ausziehenden Wetterschacht aus.

Auf Grundlage der Analyse des Wetternetzes können so im Falle eines Gasausbruchs kritische Bereiche in Hinblick auf eine mögliche Ansammlung von Gasen identifiziert und innerhalb der CFD-Simulation nachgebildet werden (Bild 4). Die nachgebildete Geometrie repräsentiert dabei aus rechentechnischen Gründen eine symmetrische Hälfte der originären Verhältnisse. Die Ge-

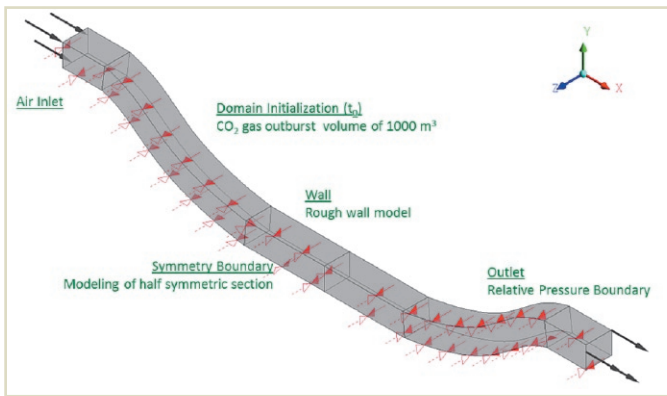


Fig. 5. Boundaries for the CFD model of the geometrical depression – flow domain.

Bild 5. Randbedingungen für die CFD-Modellierung der Senke – Strömungsbereich.

carried out. The two main districts are connected to the intake fresh air shaft directly and get supplied with the air in a parallel fashion. The remaining advancing workings are supplied with fresh air as splits from these districts. The ventilation in the network for a normal situation is provided by an exhaust fan located at the top of the upcast shaft's ventilation drive. The connection between the upcast shaft and rest of the mine network is through a cross cut drive at the bottom level which splits into the upper level. In a normal situation, all the exhaust air flows through the upper level split and out of the upcast shaft.

As a result of the above network analysis a critical location can be identified, where the gas gets accumulated after the occurrence of a gas outburst. Based on this information, the geometry and the airflow conditions at the location of concern, a basic CFD mesh is constructed as shown in Figure 4. The constructed geometry represents one symmetric half of the mine airway of concern, along its axis, in order to reduce the computational cost. The total length of airway with depression is 80 m and the depression depth is 12 m. The constructed geometry of the flow domain is discretized with unstructured tetrahedral mesh, which is then exported to the solver of ANSYS CFD code.

For the solution of the problem, a scenario with CFD a multiphase Euler-Euler mixture model is used to simulate air and carbon dioxide in the flow domain and to represent the fluid interactions and momentum transfer. A homogenous k-epsilon turbulence model is used for both of the fluids. Interphase mo-

samtlänge der betrachteten Strecke beträgt 80 m, die maximale Tiefe der Senke 12 m. Die Geometrie des Strömungsbereichs wird diskretisiert in unstrukturierte tetraedrische Maschen.

Für die Lösung des Strömungsproblems in Form einer Nachbildung von Luft und CO₂ innerhalb des Strömungsbereichs sowie die Darstellung der Interaktionen und Impulsübertragung wurde ein Mehrphasen-Euler-Euler-Modell verwendet. Für beide Fluide wurde ein homogenes k-epsilon Turbulenzmodell gewählt; die Berücksichtigung der Impulsübertragung zwischen den Phasen erfolgte mit Hilfe eines Widerstandsbeiwerts. Eine Verdünnung der Gase wird über eine Gasdifffusion realisiert, die innerhalb des CFD-Modells aus den Wechselwirkungen zwischen Körperkräften sowie Zugkräften des Wetterstroms resultiert. Bei einer Änderung der Bewetterungsszenarien können unterschiedliche Zugkräfte nachgebildet und demzufolge das Verdünnungspotential beeinflusst werden. Im vorliegenden Beispiel wurden zwei Szenarien getestet – zum einen eine reguläre Weiterführung der vorliegenden Wetterführung sowie zum anderen die Berücksichtigung eines Zusatzlüfters. Die definierten Randbedingungen sind in Bild 5 dargestellt. Der Strömungsbereich wird über einen Wetterzustrom, ausgedrückt über die Wettergeschwindigkeit, sowie Abstrom auf Grund von relativen Druckverhältnissen definiert. Der nachgebildete Stoß wird für eine Berücksichtigung der Druckverluste auf Grund von Reibung mit einem Rauigkeitsbeiwert beschrieben. Für die transiente Strömung wird der Strömungsbereich mit einem angenommenen Volumen von 1000 m³ auf der Streckensohle initialisiert.

Die nachgebildeten Szenarien erlauben ein tiefes Verständnis und den Vergleich der Strömungsverhältnisse innerhalb der Senke bei regulären Bedingungen sowie bei Anwendung eines Zusatzlüfters. In Bild 6 ist der Volumenanteil an CO₂ in der Ausgangssituation sowie bei regulären Strömungsverhältnissen und bei Anwendung eines Zusatzlüfters nach einer Verdünnungszeit von vier Minuten dargestellt. Die instationäre Simulation bei regulären Strömungsverhältnissen zeigt deutlich, dass die vorherrschende Wettergeschwindigkeit nicht ausreicht, um das Gas innerhalb der Senke zu verdünnen, wohingegen eine vollständige Verdünnung durch die Anwendung eines Zusatzlüfters nach vier Minuten realisiert werden kann. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse können so im Sinne des hierarchischen Ansatzes an die übergeordnete Ebene weitergegeben werden.

Um die Realisierbarkeit der Vorgaben der untergeordneten Ebene zu überprüfen, erfolgt eine modifizierte Wetternetzbe-

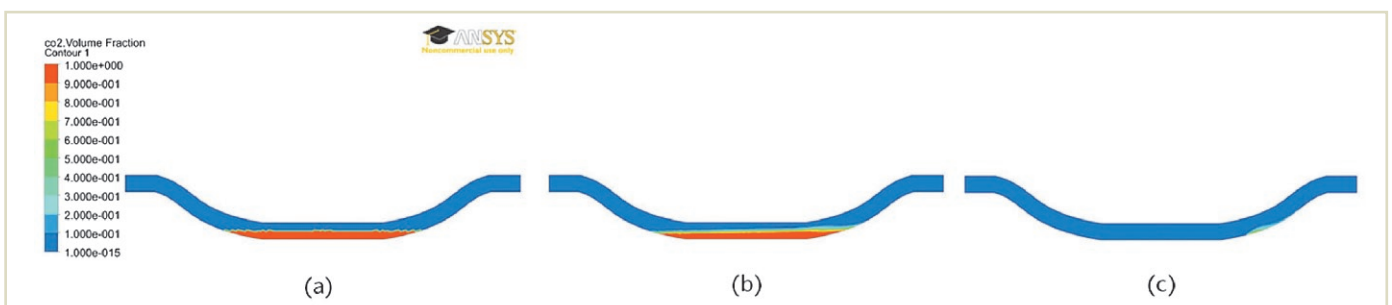
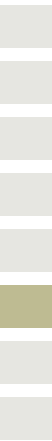
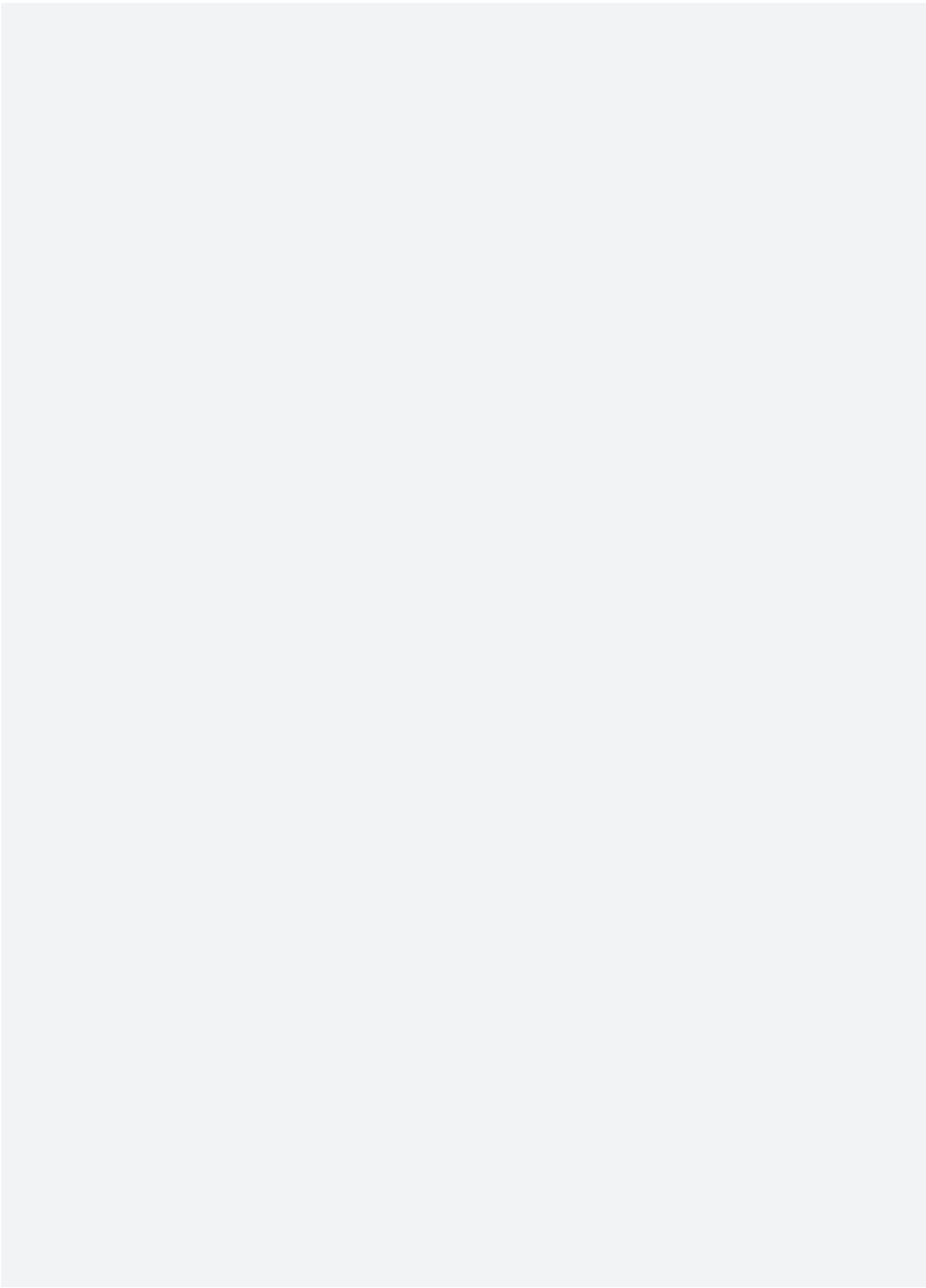


Fig. 6. Volume fraction contours for gas (a) initial condition; (b) normal flow after 4 minutes; (c) booster dilution after 4 minutes.

Bild 6. Volumenanteil CO₂ (a) Ausgangssituation, (b) reguläre Strömungsverhältnisse nach 4 Minuten, (c) Strömungsverhältnisse bei Verwendung eines Zusatzlüfters nach 4 Minuten.



mentum transfer is implemented with the help of drag coefficient. By enabling gravity for the flow domain body forces are accounted for, which act against the drag forces exerted by the momentum of air and thus resist motion of carbon dioxide. Only a strong enough drag between the two phases would be capable of causing diffusion and thus dilution of heavier carbon dioxide from the depression shaped airway.

To simulate drag forces, different ventilation scenarios were modeled in transient manner, representing normal operation and operation of a booster fan to dilute the gas out of the depression. The applied boundary types can be seen in Figure 5. The intake for the domain is velocity inlet boundary condition; different velocities represent distinct mass flow rates and thus simulate normal airflow situation and situation with booster fan application. The outlet boundary is defined with average pressure and thus, together with a rough wall boundary condition, defines a specific pressure drop in the domain resulting from flow of air. The transient simulation represents a time after the gas outburst has taken place and gas has accumulated at the bottom of the depression, on the basis of which the domain is initialized with a representative 1000 m³ of carbon dioxide gas.

The simulated scenarios provide an in-depth understanding of the flow in the depression region as a result of normal flow situation and a clear comparison is possible based on simulation of flow with booster fan installation. Figure 6 represents a volume fraction contour for CO₂ gas at initial condition and in case of normal as well as booster flow after four minutes of dilution. The transient simulation of the normal flow situation shows that the prevailing air velocities remain insufficient to disperse the gas out of the depression. On the other hand, a stronger air flow, resulting from installation of booster fan in the airway, causes the complete dispersion of gas within four minutes of ventilation. This is exported as a result from secondary CFD modeling stage of the hierarchical model back to the primary stage.

In order to check implementability of the solution proposed by CFD simulation, a modified network simulation is performed at the primary stage of the hierarchical approach as a back-coupling. Figure 7 and 9 present the modified ventilation situation in the network along with the critical depression zone location

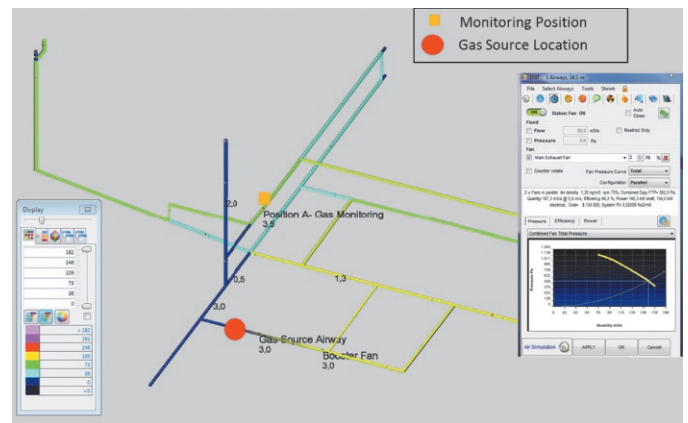


Fig. 7. Ventilation network modified by booster fan installation.
Bild 7. Modifiziertes Wetternetzmodell bei Verwendung eines Zusatzlüfters.

rechnung als Rückkopplung zu der übergeordneten Ebene. Die Bilder 7 und 9 zeigen die veränderte Situation innerhalb des Wetternetzmodells in Anlehnung an folgende Szenarien:

- Installation eines Zusatzlüfters für eine Verbesserung der Verdünnung der auftretenden Gase und
- Installation eines Zusatzlüfters in Kombination mit Wettertüren.

Wie in der CFD-Simulation gezeigt, führt die Installation eines Zusatzlüfters zwar zu einer effektiven Verdünnung der auftretenden Gase innerhalb des kritischen Bereichs, allerdings innerhalb des gesamten Wetternetzmodells zu einer Umkehr der Wetterführung und damit einhergehender größeren Verteilung und langsameren Verdünnung (Bild 8). Durch die zusätzliche Verwendung von Wettertüren (Bild 9) wird deutlich, dass für die vorliegende exemplarische Betriebsituation so eine schnellere und effektivere Verdünnung innerhalb des gesamten Wetternetzes realisiert werden kann.

Die Anwendung des hierarchischen Ansatzes zeigt für diesen Fall, dass die Installation eines Zusatzlüfters zu einer Verbesserung der Verdünnung innerhalb der Senke führt und bei gleichzeitiger Verwendung von Wettertüren eine direkte und schnellere Abführung der Gase aus dem Bergwerk realisiert werden kann.

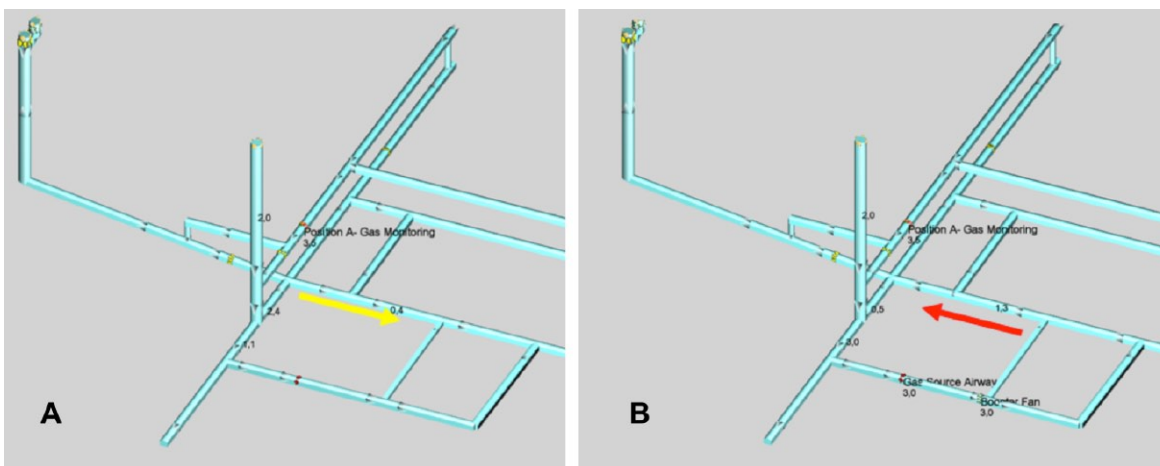


Fig. 8. Airflow in (a) original case and (b) booster fan scenario.
Bild 8. Volumenstromverteilung im (a) ursprünglichen Fall und bei (b) Verwendung eines Zusatzlüfters.

and gas monitoring locations subject to the following scenarios considered:

- installation of booster fan to improve gas dispersion and
- installation of booster fan in combination with mine door.

Booster fan switching results in effective dilution of gases from the source airway as proved by CFD simulation. However, booster fan operation results in airflow changes in the network, resulting in greater spread and slower overall dispersion out of the mine (Figure 8). The CFD solution is then modified in VN stage, by introducing mine doors along with booster fan operation as can be seen in Figure 9. The idea behind this modification is to provide the gas dispersed out of the critical airway a shorter path out of the mine network, and thus faster and effective dilution.

The modified solution shows that the booster fan operation results in improved dilution of gas out of the depression and activation of mine doors results in directed and faster removal of gases from the mine. By means of the activation of mine doors, the recirculation and thus slower dilution of gases is avoided.

The solution procedure for this example scenario with the application of hierarchical approach demonstrates a step by step addressal of the problem and utilization of the available modeling capabilities to the best of their abilities as follows:

- Primary stage ventilation network analysis: With the knowledge of mine and geometrical structures along with a gas dispersion simulation at the primary stage after the gas outburst, the critical location is identified where the carbon dioxide gas accumulates.
- Secondary stage CFD simulation: The results and information gained from the primary stage is feed into the CFD software. A representative geometry and boundary conditions are designed and solved for two-phase gas dilution. Different ventilation scenarios are modeled and a booster implementation is chosen on the basis of its effectiveness for gas dilution.
- Feedback to primary stage: The selected ventilation scenario is used to modify the original ventilation network to test the plausibility of its application and further implication on the entire network. A further adjustment to the solution is performed, in which the mine doors are activated along with booster application to induce faster and more effective gas dispersion out of the mine.

5 Conclusion and Outlook

This paper presented a hierarchical approach for the effective dilution of gases, esp. after gas outbursts. The methodology proposed comprises of two individual models – Ventilation Network Calculations and CFD Modeling – taking advantage of the strength of each individual simulation tool.

Summarized, the functions of the Ventilation Software Ventsim™ within the hierarchical approach are as follows:

- compressible ventilation network calculation program;
- demonstration, modification and analysis of ventilation situations;
- aid in the development of ventilation concepts through the internal analysis of plausibility of the ventilation network and objectives;

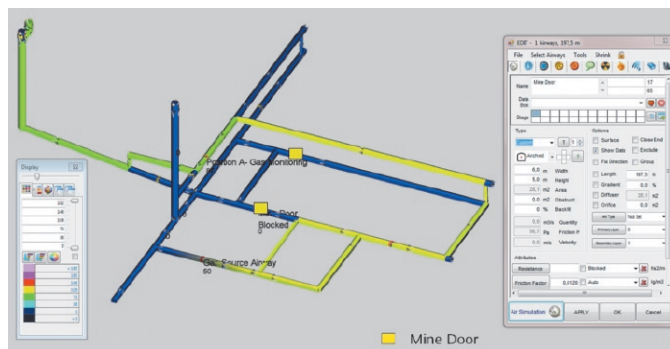


Fig. 9. Modified solution for gas dispersion in the mine network.

Bild 9. Modifizierte Gasverteilung innerhalb des Wetternetzmodells bei Verwendung eines Zusatzlüfters sowie von Wettertüren.

Durch die Verwendung der Wettertüren können darüber hinaus Kreisläufe und eine damit einhergehende Verlangsamung der Verdünnung vermieden werden.

Zusammenfassend lässt sich für die Verteilung der Aufgaben innerhalb des hierarchischen Ansatzes für die exemplarische Betriebsituation Folgendes festhalten:

- Übergeordnete Ebene – Wetternetzberechnung: Auf Grundlage der Kenntnis des Layouts der Ausgangssituation sowie der geometrischen Strukturen in Kombination mit einer aggregierten Simulation der Schadstoffverteilung für das gesamte Wetternetz lassen sich kritische Bereiche identifizieren.
- Untergeordnete Ebene - CFD Simulation: Die Ergebnisse und Informationen von der übergeordneten Ebene dienen als Eingangsgrößen für die CFD-Simulation. Design eines repräsentativen Modells, Definition der Randbedingungen sowie Durchführung einer Mehrphasen-Strömungssimulation. Modellierung und Bewertung unterschiedlicher Bewetterungsstrategien und Auswahl der geeignetsten Strategie.
- Rückkopplung zur übergeordneten Ebene: Auf Grundlage der ausgewählten Bewetterungsstrategie werden unterschiedliche Maßnahmen getestet und in Hinblick auf die Effektivität der Verdünnung, Plausibilität und Realisierbarkeit bewertet. Auswahl einer geeigneten Bewetterungsstrategie für einen spezifischen Anwendungsfall und spezifische Betriebsituation.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wurde ein hierarchischer Ansatz mit seinen Teilmodellen – Wetternetzberechnung und CFD-Simulation – vorgestellt, der sich grundsätzlich für die Entwicklung von Bewetterungsstrategien beim (unerwarteten) Auftreten von Gasen eignet.

Die Funktionen und Wirkungsweise der Wetternetzberechnung mit Hilfe der Software Ventsim™ innerhalb des hierarchischen Ansatzes lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Kompressibles Wetternetzrechnungsprogramm,
- Möglichkeiten zur Darstellung, Anpassung und Analyse von Wetternetzen,
- Unterstützung bei der Entwicklung von Bewetterungskonzepten, u.a. auf Grund einer integrierten Plausibilitätsprüfung,

- capable of simulating paths and concentrations of contaminants (e. g. gases) for planning or emergency situations;
- assumption: distribution of contaminants in linear velocity fashion and perfect mixing at the junctions;
- steady state and dynamic simulation resulting from the changing ventilation conditions during the contaminant spread can be performed;
- reference frame: entire ventilation network.

Summarized, the functions of the CFD modeling, using Ansys, within the hierarchical approach are as follows:

- two-phase flow simulation of the behavior of an air/gas mixture after a gas burst;
- analysis and evaluation of the required ventilation output through variations in air flow for the dilution;
- determination of parameter values to be integrated into Ventsim™;
- reference frame: specific (spatially limited) area.

It could be demonstrated that the hierarchical approach proposed is suitable for supporting the development of ventilation concepts in case of occurrence of gases and gas outbursts, respectively. However, the implementation and effectiveness of the approach depends significantly on the amount and quality of data provided. Current advancements deal with the enhancement of the approach and models for including various, partly dynamic, gas sources for the development of ventilation-on-demand concepts.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Lama, R., Saghafi, A.: Overview of Gas Outbursts and Unusual Emissions. Coal Operators Conference, 6 – 8th February 2002, pp. 74 – 88.
- (2) Marschall, V.: Schlechte Luft unter Tage? – IPA untersucht Kohlendioxidbelastung in Kalibergbau: IPA-Journal 03/2011, S. 26-29.
- (3) Chasm Consulting (a), www.ventsim.com, 2016.
- (4) Chasm Consulting (b), “Ventsim Visual™ User Guide”, Version 4.0, QLD Australia, 2016.
- (5) Ansys Inc. “ANSYS Academic Documentation”, Release 13.0, November 2010.
- (6) Höhne, T.: CFD simulations for single and multi-phase flows. FZD Theory Seminar Series, Institute of Safety Research, Dresden-Rossendorf/Deutschland, März 2010 (Präsentation).

Authors / Autoren

Dr.-Ing. Elisabeth Clausen und M.Tech. Amit Agasty, Institut für Bergbau, Technische Universität (TU) Clausthal, Clausthal-Zellerfeld

- Möglichkeit der Nachbildung und Simulation der Verteilung und Ausbreitung von Schadstoffen innerhalb des Wetternetzes,
- Annahme: Verteilung der Gase mit linearem Geschwindigkeitsverlauf und vollständiger Vermischung an Knotenpunkten,
- während der Berechnung der Schadstoffverteilung können Anpassungen innerhalb des Wetternetzes vorgenommen und statische sowie dynamische Simulationen durchgeführt werden,
- Betrachtungsrahmen: gesamtes Wetternetzmodell.

Die Funktionen und Wirkungsweise der numerischen Strömungssimulation mit Hilfe der Software Ansys innerhalb des hierarchischen Ansatzes lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Nachbildung des Strömungsverhaltens eines Luft/Gas-Gemisches nach einem Gasausbruch mit Hilfe einer Zwei-Phasen-Strömungssimulation,
- Analyse und Bewertung der für eine Verdünnung notwendigen Bewetterungsstrategien,
- Bestimmung von wettertechnischen Kennwerten, die in die Wetternetzrechnung integriert werden,
- Betrachtungsrahmen: spezifische, räumlich begrenzte Bereiche.

Es konnte gezeigt werden, dass der hierarchische Ansatz sich grundsätzlich für eine Unterstützung der Entwicklung von Bewetterungskonzepten für die effektive Verdünnung von Gasen nach einem Gasausbruch eignet. Dennoch wird eine erfolgreiche Implementierung und Qualität der Ergebnisse maßgeblich durch die Menge und Qualität der vorhandenen Messdaten und Informationen beeinflusst. Aktuelle Forschungstätigkeiten beschäftigen sich mit einer Erweiterung des Ansatzes in Hinblick auf eine Integration verschiedener, teils dynamisch auftretender Gase für die Entwicklung von bedarfsgerechten Bewetterungskonzepten (Ventilation-on-demand).