

Use of Live Sensor Data in Transient Simulations of Mine Ventilation Models

The implementation of sensor systems to monitor mine ventilation atmospheres offers numerous safety and operational benefits to mines. Detection of various mine gases, changes to airflows and temperature, and detection of clearance of fumes or contaminants are some of the obvious benefits of using atmospheric sensors in mines. The prediction of atmospheric conditions between sensors, however, is potentially difficult, and to gain complete coverage a mine will require either many sensors or a method of extrapolating and predicting atmospheric conditions between and downstream from a sparser array of sensors. A transient simulation computer model technique is demon-

strated to predict the time based changes to atmosphere downstream from sensors. The transient model predicts the time based changes to conditions throughout a mine model, displaying current conditions in a three-dimensional model by simulating the mixing, addition and dilution of gases and airflow changes in incremental time steps. The advantage of this method is that a real time overview of full mine atmospheric conditions can be viewed at all locations, even areas without sensors. In addition, with careful planning and consideration of potential contaminant sources, the number of required sensors can be minimized.

Verwendung von Echtzeit-Messdaten zur Simulation dynamischer wettertechnischer Modelle

Die Überwachung der Wetter eines Bergwerks durch geeignete Sensortechnik bietet zahlreiche Vorteile hinsichtlich der Planung von Betriebsabläufen und der Sicherheit im Allgemeinen. So können beispielsweise gefährliche Grubengase sowie Veränderungen der Wettergeschwindigkeit oder der Temperatur erfasst, aber auch der Abzug von Schwaden oder anderen Gasansammlungen verfolgt werden. Über das einfache Messen der Zusammensetzung der Wetter hinaus stellt jedoch die Vorhersage für Bereiche ohne sensorische Überwachung eine potentiell große Herausforderung dar. Für eine flächendeckende Übersicht sind daher entweder besonders viele Sensoren oder eine Möglichkeit der Extrapolation von gemessenen Werten weniger vorhandener Sensoren notwendig. Über das in diesem Artikel vorgestellte Simulationsmodell wird gezeigt, wie die zeitabhängigen Veränderungen der Wetter für

Bereiche einer Grube hochgerechnet werden können, die nicht sensorisch erfasst, aber einem überwachten Teil der Grube wettertechnisch nachgeschaltet sind. Über dieses dynamisch ausgelegte Modell kann die aktuelle Zusammensetzung der Wetter für ein Grubengebäude vollständig, dreidimensional und zeitabhängig dargestellt werden. Die Simulation selbst erfolgt dabei durch die zeitlich schrittweise Anpassung der wettertechnischen Kenndaten unter Berücksichtigung von Gaszutritten, deren Vermischung oder Verdünnung. Durch die Extrapolation verfügbarer Daten auf das gesamte Grubengebäude und unter Berücksichtigung möglicher Gefahrenherde, kann zudem die Positionierung von Messgeräten optimiert und hierdurch möglicherweise die Anzahl benötigter Geräte reduziert werden.

1 Introduction

1.1 Mine Ventilation Sensors

The importance of continuously monitoring mine atmospheres has been recognised since mining underground began and the effects of harmful gases on human health were discovered. Through the 19th and early 20th centuries, coal miners would take canaries underground with them as an early detection system against life threatening gases such as CO₂, CO and CH₄ (Figure 1). The canary, normally a very songful bird, would become agitated, stop singing and eventually die if not removed from these gases, signalling the miners to quickly exit the mine (1).

1 Einleitung

1.1 Sensorik in der Wettertechnik

Die Bedeutung einer ständigen Überwachung der Grubenwetter wurde den Menschen bereits mit den ersten untertägigen Aktivitäten und der Erkenntnis über die Wirkung schädlicher Gase auf den menschlichen Körper bewusst. Kanarienvögel beispielsweise wurden während des 19. und 20. Jahrhunderts von Bergleuten mit in die Gruben genommen und als eine Art erstes Warnsystem für schädliche Gase, wie etwa CO₂, CO und CH₄, genutzt (Bild 1). Der Kanarienvogel, der für seinen normalerweise fröhlichen Gesang bekannt ist, zeigte diese Gase durch unruhiges Verhalten und Verstummen des Gesangs an und starb, wenn er nicht rechtzeitig



Fig. 1. Canary gas detector.
Bild 1. Kanarienvögel als Warngerät für schädliche Gase.
Photo/Foto: Stewart

In the early to middle 20th century, methods of gas detection advanced. CO could be detected with chemically infused paper that changed colour on exposure to gas. CH₄ or oxygen deficiency could be detected through a change of flame colour and size in mesh screened safety lamps (Figure 2) (2, 3).

By the late 20th century, most sensors had been developed into electro-chemical devices that could show instant readings on an analogue or digital display, or transmit information through radio, wires or fibre-optic cable to remote locations. Sensors used in underground mines can be classified to handheld and non-handheld. The handheld devices include chemical indicator tubes, catalytic combustion, thermal conductivity sensors, electrochemical sensors and infrared detectors. The current non-handheld devices used in underground mines (remote monitoring) include the tube-bundle and chromatography system as well as telemetric sensing system (4, 5).

Many mines worldwide are now moving towards standard remote monitoring of mine atmospheres to measure a wide range of gases, air velocities and pressures, as well as detecting the operating state of ventilation control devices such as fans, regulators and doors. In most cases sensors are connected through mine communication systems to allow real time monitoring of conditions at different locations underground, and sensor data is sent to control systems which are designed to display information and alert when conditions fall outside of defined safe levels (Figure 3).

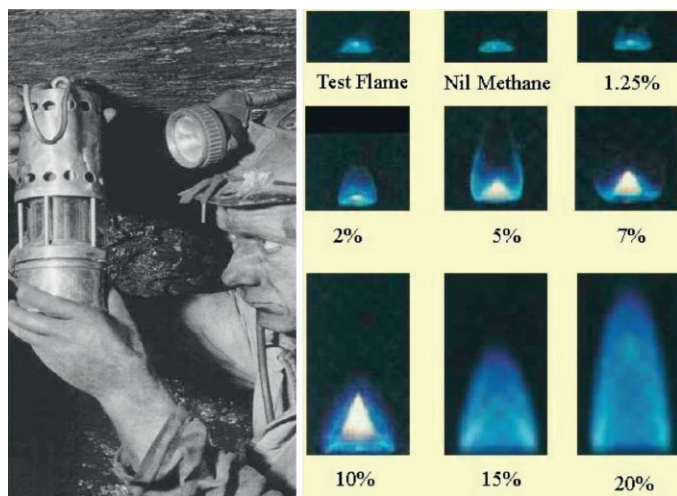


Fig. 2. Safety lamp for gas detection in underground coal mine.
Bild 2. Sicherheitslampe zum Nachweis von Gasen in einer untertägigen Kohlemine. Photo/Foto: Stewart

aus den schlechten Wettern befreit wurde. Auf diese Weise wurden Bergleute vor schädlichen Gasansammlungen gewarnt und konnten die Gruben rechtzeitig verlassen (1).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts machte die Gaswarntechnik entscheidende Fortschritte. Jetzt konnte CO über die Farbänderung von speziellem Indikatorpapier nachgewiesen werden. Auch CH₄ und Sauerstoffmangel konnten schließlich mit einer speziellen Lampe, deren Flamme von einem feinen Drahtgewebe umgeben war, über die Größen- und Farbänderung der Flamme auch quantitativ nachgewiesen werden (Bild 2) (2,3).

Gegen Ende des 20. Jahrhunderts hatte sich die Messtechnik bereits soweit fortentwickelt, dass fast alle Sensoren über elektrochemische Verfahren die Messergebnisse kurzfristig ermitteln konnten. Die Ergebnisse wurden entweder digital oder analog angezeigt und konnten am Gerät selbst abgelesen werden oder wurden über eine entsprechende Infrastruktur oder Funk an zentrale Datenbanken übermittelt.

Die Geräte, die im Untertagebereich zum Einsatz kommen, können allgemein nach ihrer Handhabung eingeteilt werden. Zum einen kommen tragbare Geräte zum Einsatz, deren Messprinzipien auf chemischen (Prüfröhrchen) oder elektrochemischen Reaktionen oder katalytischer Verbrennung beruhen, oder deren Sensoren über die Wärmeleiteigenschaften oder Infrarot die gefragten Messdaten ermitteln. Zum anderen stehen stationäre Geräte zur Verfügung. Rohrbündel, Chromatographen und Telemetrie-Systeme sind hier geläufig (4,5).

Inzwischen sind immer mehr Bergwerke mit modernen Sensoren ausgestattet, die eine ständige Überwachung der Grubenwetter gewährleisten. Über derartige Monitoringsysteme werden nicht nur die Konzentrationen verschiedener Gase, Wettergeschwindigkeiten und Drücke gemessen, sondern auch die Betriebszustände verschiedener wettertechnischer Einbauten wie Lüfter, Wetterblenden oder -türen ermittelt. Üblicherweise sind die Sensoren Teil eines gesamtheitlichen Netzwerks, das eine Leitstelle zur zentralen Verwaltung der gesammelten Daten beinhaltet. In der Leitstelle werden die Daten gesammelt und ausgewertet und im Bedarfsfall Warnungen ausgegeben, wenn die Daten eine zulässige Toleranz nicht mehr einhalten (Bild 3).

Die meisten Kohle- und auch Nichtkohlebergwerke halten bereits ein weitreichendes Überwachungssystem vor, um Gefahren im Sinne einer ungünstigen Zusammensetzung der Wetter frühzeitig zu erkennen. Hier sind Ansammlungen von giftigen oder explosiblen Gasen typische Beispiele, aus denen Folgen wie Explosionen hervorgehen können. Andererseits dienen Sensoren aber



Fig. 3. North Parkes Mine (Australia) control room.
Bild 3. Leitstelle der North Parkes Mine in Australien.
Photo/Foto: Stewart

In most modern coal mines and many types of metalliferous mines, real time sensing systems are used for early detection of potentially dangerous or undesirable conditions, such as high gas build up which may result in an explosive atmosphere, or the presence of noxious gases. In other circumstances, sensors can detect incidents that have already occurred such as an explosion behind seals, an outburst of gas, ignition at the face or a belt fire. Where conditions cannot be immediately corrected, sensor information may trigger other actions such as mine evacuation or shutting down machinery to ensure the health and safety of underground personnel.

1.2 Limitations of Real Time Sensors

While most sensors have a wide range of physical limitations including delayed reaction times, cross sensitivities with other gases, and reliance on a robust communication system, one of the main practical limitation is the display and application of the received data.

Real time mine sensor information is usually displayed on computer monitor showing one or a number of sensor values in

auch der Erkennung bereits eingetretener Ereignisse, wie etwa Explosionen in abgedämmten Bereichen, Gaseinbrüchen oder der Entzündung eines Flözes oder Fördergurts. Auch wenn eine Gefahr nicht immer durch einzelne Maßnahmen beseitigt werden kann, so bietet sich dank der Messdaten dennoch die Möglichkeit, eine Empfehlung für beispielsweise die Räumung eines Grubenbereichs oder das Abschalten einzelner Maschinen zu erarbeiten, um die Sicherheit des Personals garantieren zu können.

1.2 Technische Grenzen der Echtzeitmessung

Während die Messung mit Sensoren stets mit Problemen wie Trägheit oder Querempfindlichkeit behaftet und eine funktionierende Netzwerkkommunikation Voraussetzung für die sich anschließende Analyse der Messergebnisse ist, liegt die eigentliche Herausforderung in Bezug auf die Korrektheit der Auswertung immer noch bei der Auswertung selbst.

Die Präsentation der Messergebnisse erfolgt für gewöhnlich in Echtzeit auf Bildschirmen, über die sowohl einzelne als auch mehrere Sensordaten gleichzeitig numerisch oder graphisch dargestellt werden können (Bild 4). Über entsprechende Programme können auch vergangene Messdaten und deren Entwicklung über die Zeit angezeigt werden.

Dennoch ist es für ganzheitliche Aussagen zum Grubenklima kaum ausreichend, lediglich Messdaten der Sensoren selbst heranzuziehen. Gründe hierfür sind:

- Die Anzeige ist zumeist auf die reine Darstellung der Messergebnisse begrenzt oder bietet die Möglichkeit, diese in skizzenhaften und vereinfachten Darstellungen (Schaltpläne) des Grubengebäudes anzeigen zu lassen. Ist jedoch der Nutzer nicht im Detail mit dem Grubengebäude und der Lage der Sensoren und Maschinen vertraut, so kann dies zu Problemen bei der Beurteilung der Daten führen.
- Einzelne Sensorgruppen können nicht vollständig angezeigt werden und müssen daher zur detaillierten Darstellung separat betrachtet oder als Gruppe zusammengefasst werden, um die Anzeige im Gesamtkontext zu ermöglichen.
- Es ist stets nur eine begrenzte Anzahl an Sensoren verfügbar. Diese sind zudem meist an Punkten aufgestellt, die über die dafür notwendige Infrastruktur bereits verfügbaren. Dies kann dazu führen, dass weite Teile des Grubengebäudes nicht messtechnisch erfasst werden. Wo sich Wetterströme aufteilen oder zusammentreffen, und sich damit entsprechend auch die enthaltenen Gase vermischen, konzentrieren oder verdünnen, kann die Zusammensetzung der Wetter für Bereiche zwischen oder hinter Sensoren nicht einfach aus den tatsächlichen Messdaten abgeleitet oder berechnet werden.
- Ereignisse, die sensorisch erfasst werden, können nicht durch berechnete Werte in nicht überwachten Bereichen der Grube repräsentiert werden. Bei einem Gaseinbruch beispielsweise können Sensordaten spontan steigen, aber auch ebenso kurzfristig auf ihr ursprüngliches Level zurückfallen, während die Gaswolke in Wetterrichtung durch das Grubengebäude getragen wird, bis sie hinreichend verdünnt oder aus der Grube getragen wurde. Stehen in dem nachgeschalteten Teil des Bergwerks keine Sensoren zur Messung bereit, kann die Gaswolke nicht weiter erfasst werden.

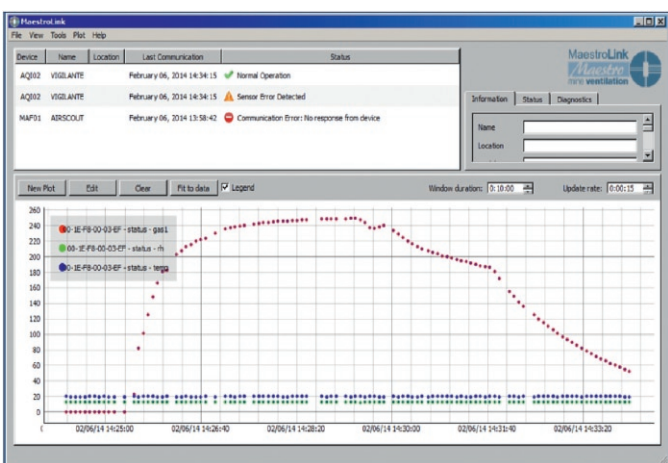


Fig. 4. MaestroLink real time sensor display.
Bild 4. Darstellung von Messergebnissen in Echtzeit in MaestroLink.
Source/Quelle: Stewart

tables or on a schematic screen (Figure 4). History and trends for each sensor can also usually be displayed and analysed.

However, utilising only sensor data to interpret mine conditions has significant limitations.

- Display is normally limited to static text, or overlaid on a schematic display. This can be difficult to interpret and visualize if the viewer is not familiar with the sensor locations.
- Excessive numbers of sensors can be difficult to display together and may need to be displayed in groups or only made available in selectable screens.
- The number of sensors installed is often limited. Cost and limitations in distribution of power and communication systems mean that sensors are usually only installed in key location. This potentially leaves large areas of the mine unmonitored. Where multiple airstreams may converge or diverge, the actual gas concentrations are split or merged, and areas downstream or between sensors cannot be easily inferred or calculated from the original sensor information.
- Changes in sensor data are not reflected in areas not covered by sensors. A spike in gas levels from a gas outburst, e. g., may show local sensor information rapidly rising then falling to normal levels, however, the dangerous spike in gas levels actually continues to travel through the mine downstream from the sensor until diluted or exhausted from the mine.

To maximise the effectiveness of real time sensor data and address the above limitation, additional systems are required to help visualize and predict atmospheric conditions between sensors, and show the time based spread of gases throughout the mine.

2 Simulation Methods

2.1 Introduction

The use of mine ventilation simulation software has become common place since the later 20th century, and has been traditionally used to mainly estimate flows and pressures in mine ventilation networks. However ventilation models can also be used to infer and calculate downstream mixed concentration of detected gases (6). Providing a mine ventilation system has been accurately modelled with correct airflows, the real time sensor readings can be defined in the atmosphere streams and combined and mixed in the various airflow paths through the model. If sufficient sensors are installed to detect conditions in the major pathways (7), in theory, all other areas of the mine not covered by sensors can be inferred with good accuracy (providing additional significant gas sources are not added to the stream).

The following sections focus on the use of gas concentration sensors in simulation models, although other sensors such as fan speed, air velocity or regulator settings can also be used to drive a simulation model.

2.2 Simulation of Gas Distribution

The movement of gas throughout a mine can be a complex predictive process. The physical processes of gas diffusion, layering, imperfect mixing at junctions, and boundary drag can all have an impact on accurate prediction of gas movement. However, for large mine wide network models considering all such factors add

Um die von Sensoren ermittelten Daten effektiver nutzen zu können, sind daher zusätzliche Methoden nötig, mit denen die oben genannten Einschränkungen kompensiert und Wetterdaten gesamtzeitlich und zeitlich unabhängig vorhergesagt und angezeigt werden können – auch für Bereiche ohne sensorische Überwachung und nach spontanen und lokalen Ereignissen.

2 Methoden zur Simulation

2.1 Allgemeines

Seit Ende des letzten Jahrhunderts kommt im Bergbau vermehrt Software zur Simulation der Wetterbewegungen unter Tage zum Einsatz. Ursprünglich sollten damit hauptsächlich Volumenströme und Druckunterschiede eingeschätzt werden können. Darüber hinaus kann eine solche Software aber auch dazu dienen, die Konzentration von Gasen aus Messwerten aus anderen Bereichen des Bergwerks abzuleiten (6). Voraussetzungen hierfür sind eine exakte Kenntnis über die Geometrie des wettertechnischen Systems und die detailgerechte Übertragung in ein Modell. Sind schließlich ausreichend viele Sensoren im Einsatz, um die Wetter an strategisch sinnvollen Punkten zu überwachen (7), so ist eine Extrapolation der Eigenschaften der Wetter für alle anderen Bereiche des Systems mit ausreichender Genauigkeit prinzipiell möglich – sofern keine relevanten Gasquellen in nicht sensorisch erfassten Bereichen auftreten.

In den nachfolgenden Abschnitten wird genauer auf die Simulation der Verbreitung von Gasen und ihre Konzentrationen aufgrund von Daten aus Gasmessungen eingegangen. Die Simulation über strömungstechnische Daten oder Eigenschaften von Lüftern und anderen Wetterbauwerken soll hier nicht weiter berücksichtigt werden.

2.2 Simulation der Verbreitung von Gasen

Die präzise Berechnung der Ausbreitung von Gasen ist ein äußerst komplexes Vorhaben. Hier müssen sämtliche physikalischen Eigenschaften und Prozesse einbezogen werden, wie etwa Diffusion, die dichteabhängige Trennung von Gasen, inhomogene Vermischung bei zuströmenden Wettern oder das Verhalten an Grenzflächen.

Für die Betrachtung eines großen Systems, wie das eines Wetternetzes, ist die Berücksichtigung der genannten Einflüsse aber zu vernachlässigen, da kein nennenswerter Vorteil hinsichtlich der Genauigkeit bei der schnellen Ermittlung von Gaskonzentrationen zu erwarten ist. Um die Simulation in einem angemessenen Umfang durchführen zu können, werden daher alle Eigenschaften vergleichmäßig. Es wird von gleichmäßigen Strömungen und homogenen Mischungen von Gasen ausgegangen sowie Diffusion vernachlässigt.

2.3 Statische Simulation

Die einfachste Art der Simulation von Strömungsverhältnissen jenseits messtechnischer Erfassung gestaltet sich statisch. Für das gesamte System werden unveränderliche Strömungseigenschaften angenommen und erst dann Gase in den Prozess einbezogen. Treffen zwei Volumina mit bekannten Gasgehalten an einem Wetterkreuz (Knoten) aufeinander, so kann die Konzentration der Gase für die abströmenden Luftmassen über die Formel

significant complexity to a simulation, and may not necessarily add significant value in terms of providing a tool to immediately estimate gas levels. Therefore, the large scale mine wide prediction of gas transport can be simplified by assuming linear gas movement at average flow velocities, no further diffusion of gas once it has left the sensor location, and complete homogenous mixing of gases at junctions of airflow.

2.3 Steady State Simulation

The simplest method of simulation involves a steady-state analysis of the mine airflow distribution system downstream from sensors. Once an airflow simulation has balanced flows throughout a model, consideration can be given to the distribution of gas from sensors. Where airflows meet at a junction or “node”, the gas compositions of the two airflows can be mixed homogeneously as a weighted average and – assuming perfect mixing – the newly calculated mixture can be predicted downstream from the junction as follows:

$$Gm = \frac{\sum(G_{1..n} \times Q_{1..n})}{\sum Q_{1..n}} \quad (1)$$

where Gm is the mixed airflow gas concentration, $Q_{1..n}$ is the flow into junction from connecting airways [m^3/s] and $G_{1..n}$ is the concentration of gas into junction from connecting airways.

A complete overview on atmospheric conditions can be demonstrated not only at the sensor locations, but in all areas in between sensors and out to the exhaust route(s) of the mine. A limitation of the steady state method is that it does not consider the time based changes of sensor values through various parts of the ventilation network. Therefore, any change in sensor data is instantly reflected in all downstream areas, and as such this method is only of practical use where sensor information is not expected to rapidly change, or where there is extensive sensor coverage with limited flow time and distance between sensor locations.

2.4 Transient Simulation

An increase or decrease in gas concentrations travelling past a sensor will continue to travel through the mine long after the sensor changes values again. To predict the spread of mine gases from sensors in real time to all parts of the mine, it is necessary to use a dynamic or transient method of simulation.

Transient simulation incorporates time based movements and changes to the ventilation model based on changes to various sensor inputs. The time to travel along any airway in the mine assuming constant cross sectional area is:

$$t = \frac{L}{v} \quad \text{or} \quad t = \frac{L \times A}{Q} \quad (2)$$

where t is the time to travel the length of airway [s], L is the length of airway [m], v is the velocity of airflow [m/s], A is the cross-sectional area of airway [m^2] and Q is the airflow quantity of air [m^3/s].

Gas movements can be calculated assuming the network simulator has first correctly balanced the ventilation network such that:

$$Gm = \frac{\sum(G_{1..n} \times Q_{1..n})}{\sum Q_{1..n}} \quad (1)$$

berechnet werden, wenn die Mischbarkeit aller Gase als homogen vorausgesetzt ist. Hierbei bezeichnet Gm die Konzentration der Gase nach der Mischung, $Q_{1..n}$ stellt die Volumina der einzelnen zuströmenden Luftmassen pro Zeit (m^3/s) und $G_{1..n}$ die Gaskonzentrationen in den entsprechenden Luftpaketen dar.

Durch die Extrapolation der Messdaten können damit auch bei der statischen Analyse Eigenschaften der Wetter für das gesamte Grubengebäude abgeleitet werden. Als problematisch stellt sich diese Methode erst dann dar, wenn kurzzeitig wechselnde Eigenschaften auftreten, da nur die aktuellen Daten für die Extrapolation herangezogen werden. Änderungen von Messwerten gelten somit unmittelbar als Basis für den Rest des von der Simulation erfassten Teils des Systems, ohne die Trägheit des Systems zu berücksichtigen.

Die statische Simulation ist daher eher für Systeme geeignet, in denen entweder keine relevanten Veränderungen innerhalb kurzer Zeit auftreten, oder das Netzwerk entsprechend gut mit Sensoren abgedeckt ist, sodass Sensoren kaum nennenswert sowohl zeitlich als auch räumlich voneinander entfernt sind.

2.4 Dynamische Simulation

Misst ein Sensor beispielsweise eine erhöhte Gaskonzentration, so wird dieses Gas mit den Wetter weiter transportiert und ist weiterhin im Abwetterstrom zu finden, auch wenn es dort sensorisch nicht mehr erfasst werden kann. Ist der Messwert des entsprechenden Sensors bereits auf seinen ursprünglichen Wert gefallen, so wird diese Gaswolke nach dem statischen Modell nicht mehr berücksichtigt. Um diese aber weiterhin in die Simulation einbeziehen zu können, müssen entsprechend dynamische Berechnungsmodelle zum Einsatz kommen.

Mittels dynamischer Modelle können schließlich auch zeitabhängige Entwicklungen auf Grundlage zeitbedingt auftretender Messdaten einbezogen werden. Die Zeit, die ein Volumenpaket für einen Wetterweg konstanten Querschnitts benötigt, kann über

$$t = \frac{L}{v} \quad \text{or} \quad t = \frac{L \times A}{Q} \quad (2)$$

berechnet werden. Dabei steht t für die Zeit [s], welche die Wetter durch eine Strecke benötigen, L für die Länge des Wetterwegs [m], v für die Wettergeschwindigkeit [m/s], A für die Querschnittsfläche der Strecke [m^2] und Q für den Volumenstrom [m^3/s].

Für die korrekte Berechnung der Ausbreitung von Gasen, muss über die Simulation zunächst das grundlegende strömungstechnische Modell erzeugt werden. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

- Das Strömungsnetz muss konsistent simuliert sein, sodass beispielsweise die Summe aller einem Knotenpunkt zuströmenden Volumina der Summe aller abströmenden Volumina entspricht.
- Die durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten sind für jeden Wetterweg bekannt oder können aus Volumenstrom und Querschnittsfläche entsprechend berechnet werden.

- All airflows are calculated and balanced so that the airflows entering each junction are equal to the airflows exiting the junction.
- Average airflow velocities are available or can be derived from simulated or measured airflow and airway size.
- In the absence of historical gas sensor readings, the initial distribution of gases is calculated using steady state simulation, and then gradually resolved over time with transient simulation.

A method (used by Ventsim Visual™) is discrete cell transport. This method divides each airway into multiple cells containing individual information about the gas concentrations at that point in the airway. As cells are transported past locations containing sensors, the information from the sensors is fed into the cells, setting the contained information to the measured gas concentration (Figure 5).

The method works as follows:

- The cells are shuffled in position along the airway at a time based on the average airflow velocity described in Equation (1).
- As cells exit the airway, the junction node collects the cell concentration and flow rate information from all entering airways, and mixes the cell concentration based on the volume weighted average concentration entering the junction from other airway cells (as per Equation 1).
- New cells at the derived concentration are discharged from the junction node and enter each connecting airway.
- Cells which travel past sensors are “charged” with the sensor gas concentrations. Any upstream cells that may have differing concentration are reset to the measured sensor concentration.
- The simulation speed is constrained to real time progress to ensure gases movements are restrained to identical speeds as underground flows.

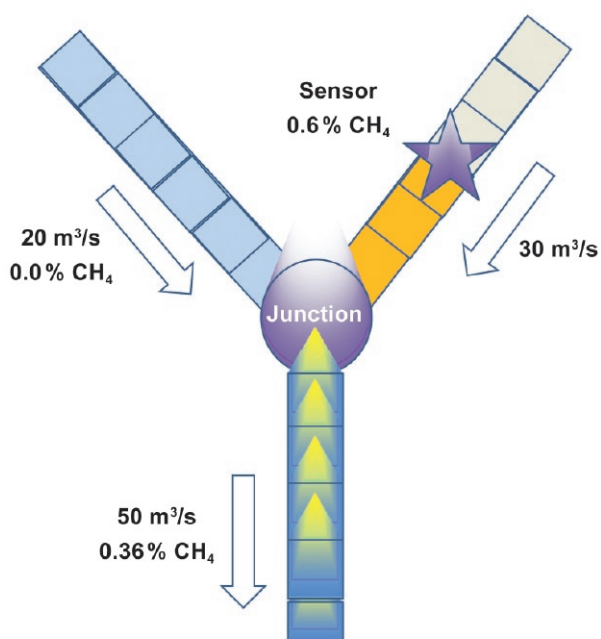


Fig. 5. An example of discrete cell method of flow transport and mixing.
Bild 5. Beispiel einer Betrachtung in diskreten Zellen.
Source/Quelle: Stewart

- Für den Fall, dass keine Daten zu früheren Konzentrationen von Gasen vorliegen, wird die Gaskonzentration mittels statischer Simulation für einzelne Punkte der Grube berechnet, und davon ausgehend eine dynamische Simulation durchgeführt.

Ventsim Visual™ nutzt zur Simulation der Gaskonzentrationen eine Methode, in der die Wetterwege in einzelne Bereiche eingeteilt werden. Diese „diskreten Zellen“ enthalten jeweils eine individuelle Information zur vorherrschenden Gaskonzentration. Wird durch die Wetterbewegung das Luftpaket einer Zelle an eine Stelle transportiert, an der ein Sensor Messungen vornimmt, so werden die dort gemessenen Werte als Information auf das Luftpaket übertragen und die ursprünglichen Informationen überschrieben (Bild 5).

Diese Methode funktioniert folgendermaßen:

- Die Luftpakete werden entsprechend der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Formel 1) in Strömungsrichtung versetzt.
- Treffen Luftpakete schließlich auf einen Knoten, werden die Informationen aus den Luftpaketen gelesen und die neuen Gaskonzentrationen gewichtet berechnet (vgl. Formel 1).
- Neue Luftpakete verlassen nun den Knoten. Die neu berechnete Gaskonzentration ist dabei für alle abziehenden Wetterwege gleich.
- Erreicht ein Luftpaket nun einen Sensor, übernimmt es die dort gemessenen Informationen. Alle Luftpakete auf der Frischwetterseite des Sensors übernehmen ebenfalls die gemessenen Werte.
- Um sicherzustellen, dass die Geschwindigkeit der Ausbreitung der Gase nicht die tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten übersteigt, ist die Simulation zeitlich an die Geschwindigkeit der Echtzeitprozesse gekoppelt.

2.5 Ausgabe der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen werden kombiniert als Zahlenwerte (Sensormesswerte) und graphische Darstellung (Verlauf von Konzentrationen zwischen Messgeräten durch farbliche Abstufung) in 3D ausgegeben. Durch Zoomen können zum einen einzelne Bereiche im Detail einschließlich der Messergebnisse betrachtet, aber auch das gesamte Netzwerk im Überblick angezeigt werden. Über eine Alarmfunktion kann auf Messwerte außerhalb zulässiger Toleranzen hingewiesen werden.

Neue verfügbare Messwerte werden kontinuierlich in die Simulation eingebunden, um die Aktualität und Dynamik des Modells zu gewährleisten und die Ausbreitung von Gasen in Echtzeit darstellen zu können. Wird neben der Messung von Gasen auch die Aktivität von Lüftern und anderen Wetterbauwerken erfasst, so können auch diese Informationen einbezogen werden, um beispielsweise Strömungsgeschwindigkeiten in der Simulation zu korrigieren.

3 Darstellung einer dynamischen Simulation

Die oben genannten Methoden wurden auf ein entsprechend bearbeitetes Modell einer Kohlemine (Kammer-Pfeiler-Bau) mit rd. 1.500 Wetterwegen beispielhaft angewandt (Bild 6).

2.5 Information Display

Information display is a combination of data display from sensors, and 3D coloured graphics representing various gas levels between sensor locations. An entire mine overview can be viewed by zooming out the required distance, or individual areas can be examined in more detail by zooming in to the locations to view the sensor text. Alarms can be set if sensor value fall outside of allowable levels.

Sensor information is fed continuously (when available) into the simulation package, using the most recent sensor data to distribute gases into the transient simulation. The transient simulation continuously updates and animates the flows in real time to show the downstream spread of gases from sensors. Other sensors can be used to monitor fan speeds or regulator settings which can then modify other parameters in the mine ventilation simulation model and update flow speeds where required.

3 Demonstration of transient sensor simulation

A modified ventilation model of a coal “bord and pillar” mine consisting of 1,500 airways was used to demonstrate the technique (Figure 6).

Real mine sensor data is difficult to obtain and release into the public domain, and is usually non-eventful in the range of detected gas levels. Therefore, a simulation of rapidly changing gas events was performed by injecting randomly moving gas concentration data into sensors within a mine ventilation model. The sensor data was adjusted by a small amount ($\pm 10\%$) every 5 s and allowed to slowly vary between defined limits. The transient simulation recalculated and displayed results in real time every 1 s. Because the spread of gases through the mine is relatively slow, the scenario was monitored over a period of 6 h to examine the time based spread of changes in sensor information on the remainder of the model (Figures 7, 8).

High speed playback of a video of the simulated results clearly shows the value of calculating downstream effects of variations in sensor readings and highlights the importance of considering time based conditions between sensors. Even though sensors may show relatively low gas readings at a particular time, locations downstream or between sensors may still have high levels of gases resulting from previous high sensor readings.

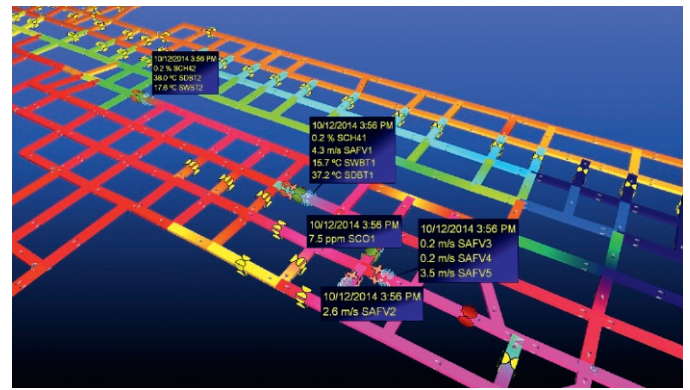


Fig. 6. Ventilation model showing sensor data locations.
Bild 6. Wettertechnisches Modell mit Anzeige von Sensoren und Messwerten. Source/Quelle: Stewart

Tatsächlich in Bergwerken gemessene Gaskonzentrationen, sofern diese überhaupt öffentlich gemacht wurden, sind im Regelfall nicht derart brisant, dass sie deutliche Effekte in einer Simulation erkennen lassen würden. Daher wurden für die beispielhafte Modellierung willkürlich Messwerte angenommen, die sich alle 5 s um 10 % innerhalb definierter Grenzen verändern konnten. Das Simulationsmodell errechnete daraus jede Sekunde den neuen Zustand des Systems. Um die Ausbreitung der Gase bis in entlegenste Bereiche des Systems verfolgen zu können, wurde die Entwicklung über einen Zeitraum von 6 h beobachtet (Bilder 7, 8).

Mithilfe eines Zeitraffervideos konnte schließlich sehr gut die Bedeutung einer dynamischen Betrachtung von Sensordaten gezeigt werden. Die zeitabhängige Berechnung von Konzentrationen zwischen Messpunkten führte dazu, dass innerhalb einer Strecke vergleichsweise hohe Konzentrationen berechnet wurden, obwohl der Messwert eines vorgeschalteten Sensors bereits geringere Werte angenommen hatte. Dies war auf erhöhte Messwerte in der Zeit davor zurückzuführen.

Ohne die dynamische Betrachtung solcher Zusammenhänge würden Bereiche mit gefährlichen Konzentrationen schädlicher Gase möglicherweise nicht erkannt werden können. Über diese Art der Modellierung und Darstellung ist es daher deutlich sicherer, Gefahren zu erkennen und durch entsprechende Maßnahmen

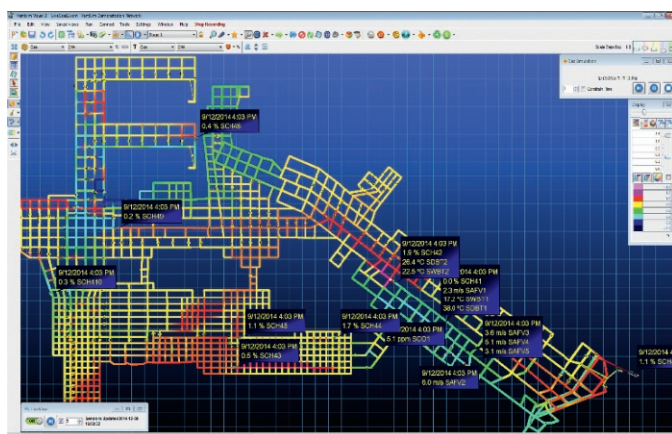


Fig. 7. Mine ventilation modelled from sensor data.
Bild 7. Simulation des Wettermodells aus Messdaten. Zeitpunkt $t = 0$. Source/Quelle: Stewart

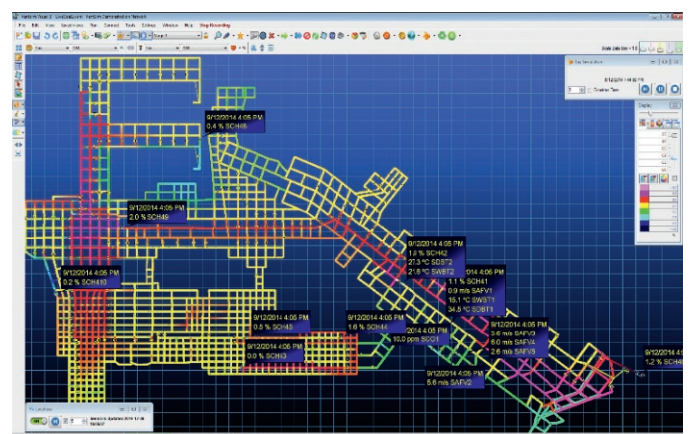


Fig. 8. Subsequent ventilation model + 1 h.
Bild 8. Simulation des Wettermodells aus Messdaten. Zeitpunkt $t = 1h$. Source/Quelle: Stewart

Without transient simulation, these regions would remain invisible to detection systems and the presence of dangerous gas levels in some parts of the mine may not be realized. This modelling and visual display technique may assist in optimizing the placement of sensors, and also in making important decisions regarding ventilation changes, switching of machinery or evacuating the mine.

4 Conclusions

The use of atmospheric sensor monitoring in underground mines offers an essential means of detecting dangerous atmospheric conditions, however without prediction of gas levels downstream and between sensors, it offers only a snapshot in time at the specific location of the sensors. The display of both sensor information and simulation data within a mine wide 3D model, colour coded to show gas levels provides an excellent visual reference to condition throughout a mine model.

Simulation of atmospheric conditions between and downstream from sensors provides a much more comprehensive picture of the distribution of gases in all parts of a mine at a particular time. By applying time based transient simulation methods, the data measured by sensors is distributed and remains visible throughout the mine ventilation model in real time until the air is exhausted to the surface.

This method will closely predict the real time behaviour and movement of gases and allows decisions to be made not only by the immediate sensor gas readings, but also by the predicted movement of those readings into other parts of the mine. By considering the careful placement of sensors, the number of sensors can also be potentially reduced and replaced by simulated data in areas there is limited risk of additional gases to the ventilation stream.

wie Veränderung der Bewetterung, Abschalten von Maschinen oder Evakuierung betroffener Bereiche zu reagieren. Außerdem kann so eine Auswahl strategisch günstiger Punkte für das Einrichten von Sensorstationen getroffen werden.

4 Zusammenfassung

Der Einsatz von moderner Messtechnik trägt wesentlich zur Lokalisierung von potentiellen Gefahren durch schädliche Gase in untertägigen Bergwerken bei. Ohne eine zuverlässige Methode zur Berechnung der Konzentration dieser Gase in Bereichen, die nicht sensorisch erfasst werden, stellen die Messwerte dennoch lediglich eine Information für einen bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort dar. Die Darstellung beider Aspekte – konkreter Messwerte und deren Extrapolation auf andere Grubenbereiche – in einem 3D-Modell mit farblicher Kennzeichnung verschiedener Gaskonzentrationen, bietet einen hervorragenden Überblick über die Gesamtsituation im betreffenden System.

Dank der Extrapolation gemessener Werte auf andere Bereiche der Grube erhält der Betrachter Informationen über die wittertechnischen Zustände in allen relevanten Bereichen. Unter Einbeziehung zeitlicher Abläufe durch eine dynamische, zeitlich abhängige Simulation können auch Gase berücksichtigt werden, die zeitlich nach der messtechnischen Erfassung noch in den Abwetterstrecken strömen, ehe sie das Wetternetz nach Übertage verlassen.

Mit der in diesem Artikel beschriebenen Methode zur Vorhersage der Verbreitung von Grubengasen in Echtzeit können Entscheidungen nicht nur auf Basis konkreter Messwerte, sondern auch in Bezug auf hochgerechnete Werte auf Grundlage dieser Messwerte für andere Bereiche einer Grube getroffen werden. Zudem kann die Platzierung von Messgeräten optimiert und damit die notwendige Anzahl an Sensoren minimiert werden. Gemessene Werte werden dann zwar durch berechnete Werte ersetzt, was für Bereiche geringer Sensibilität und ohne weitere Gasquellen aber keine Einbußen an Sicherheit bedeuten würde.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Davalle, J.: Gas Detection Through the Ages. 2011, available: http://ehstoday.com/industrial_hygiene/instrumentation/gas-detection-ages-0501.
- (2) Adams, M.: Humphry Davy and the murder lamp (Miner's safety lamp), HISTORY TODAY, vol. 55, 2005, pp. 4 – 5.
- (3) Edwards, E.: The miners' safety lamp (July 2009 ed.). 2009, available: <http://england.prm.ox.ac.uk/englishness-miners-lamp.html>.
- (4) Mason, P.: Challenges of gas monitoring and interpretation in underground coal mines following an emergency. Coal Operators Conference, Wollongong, Australia, 2012, pp. 340 – 344.
- (5) Brady, D.: The role of gas monitoring in the prevention and treatment of mine fires. In Coal 2008: Coal Operators' Conference, University of Wollongong and the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008, pp. 202 – 208.
- (6) Griffin, K. R.; Luxbacher, K. D.; Schafrik, S. J.; Karmis, M. E.: Comprehensive ventilation simulation of atmospheric monitoring sensors in underground coal mines, 2012, available: http://www.energy.vt.edu/Publications/GriffinKenneth_AMS_FINALPaper.pdf.
- (7) Gillies, A. D. S.; Wu, H. W.; Tuffs, N.; Sartor, T.: Real Time Integrated Mine Ventilation Monitoring, 2003, available: http://www.qrc.org.au/conference/_dbase_upl/o3_spko29_Gillies.pdf.

Authors / Autoren

Craig M Stewart, School of Mechanical and Mining Engineering at the University of Queensland and Managing Director, CHASM Consulting, Brisbane/Australia, Saïed M. Aminossadati and Mehmet S. Kizil, School of Mechanical and Mining Engineering at the University of Queensland, Brisbane/Australia