Felix Dicks
Elisabeth Clausen

Ventilation on Demand

As mining activities advanced throughout the centuries, mines increased in depth and complexity, resulting in the development of new technologies and processes. Ventilation was not only affected in terms of increased air quantities to be supplied, but controlling the airflow also gained attention. Until today, these trends are ongoing, meaning mines are still increasing in complexity, depth and machinery used, thus ventilation is facing new challenges. This paper introduces past mine development as a motor for progress and describes historic challenges in ventilation with corresponding solutions. Further on, today's and possible future challenges are being discussed. Under the conceptual name "ventilation on demand" (VOD), research institutes and mining companies are designing new concepts for coping with these challenges regarding air quality, system optimisation and energy efficiency. This article describes and explains different attempts in terms of VOD, including their specific requirements.

Ventilation on Demand – Bedarfsgerechte Wetterführung

Die Entwicklung des untertägigen Abbaus von Rohstoffen war stets gekennzeichnet durch größere Abbauteufen, Grubengebäude größerer flächenhafter Ausdehnung sowie die dadurch motivierte Entwicklung und Einführung neuer Verfahren und Technologien. Hieraus ergab sich nicht nur die steigende Notwendigkeit zur Bewetterung der untertägigen Grubenräume im Allgemeinen, sondern auch eine immer besser kontrollierte Wetterführung bei wachsendem Wettermengenbedarf. Auch heute setzt sich der Trend zu einer steigenden Komplexität der Bergwerke bei größeren Teufen und einem vermehrten Einsatz von Maschinen fort. Für die Wettertechnik ergeben sich damit weiter steigende Anforderungen und neue Herausforderungen. Dieser Artikel beschreibt einführend die über die Entwicklungsgeschichte des historischen untertägigen Bergbaus aufgekommenen Problemstellungen mit ihren Lösungen. Im weiteren Verlauf werden die heutigen Anforderungen an die Wettertechnik und deren erwartete zukünftige Entwicklung aufgezeigt sowie Lösungsansätze diskutiert. Unter dem Begriff „Ventilation on Demand" (VOD – bedarfsgerechte Wetterführung) entwickeln Forschungseinrichtungen und Betreiber von Bergwerken derzeit vielseitige Ansätze zur Lösung heutiger und möglicher zukünftiger Anforderungen an die Wettertechnik hinsichtlich Luftqualität, Wetternetzoptimierung und Energieeffizienz. In diesem Artikel werden weiterhin verschiedene Ansätze gegenübergestellt und notwendige Maßnahmen erörtert, derer es bei der Auslegung eines Wetternetzes nach den Maßstäben von VOD bedarf.

1 Introduction

Underground mining activities can be dated back to before 3000 B.C. (1). First subsurface systems were only of shallow depth and were built with basic tools such as hammer and pick. Over the time, new technologies allowed deeper and more complex mines and ventilation was recognised as a requirement for a safe mine environment (2). In the book "De Re Metallica" (3), Georgius Agricola (1494 – 1555) stated: "[...] if a drift is too long and there is no connections to other shafts, air can't be diluted and thickens, making it difficult for miners to breathe. Sometimes they actually strangle and their lights go off. Hence machines are needed to ensure miners can breathe and fulfil their work." Agricola also sketched first automated machinery, e.g. Airscoops, that was used for supplying fresh air in underground mines. By around 1700, depths of 300 m and more were documented (2).

The need for ventilation increased further with the introduction of blasting operations and the ongoing industrialisation

1 Einführung

Der untertägige Abbau von mineralischen Rohstoffen begann nachweislich bereits vor 3.000 v. Chr. (1). Während die Gruben in dieser Zeit nur wenige Meter Teufe erreichten und der Abbau mit einfachsten Mitteln durchgeführt wurde, boten sich über die Jahrhunderte dank neuer Technologien auch Möglichkeiten, größere Teufen zu erschließen. Um das Jahr 1700 sind bereits Gruben über 300 m Teufe dokumentiert. Die immer komplexer werdenden Grubengebäude und die erhöhte Anzahl an Arbeitern hatten aber bereits weit davor dazu geführt, dass Wetter zur Versorgung der Bergleute mit Frischluft gezielt in die Gruben hineingeleitet werden mussten (2). Der Zusammenhang zwischen Atemluft und der Arbeitsfähigkeit der Bergleute wurde bereits von Georgius Agricola (1494 – 1555) in seinem Werk „De Re Metallica" (3) beschrieben. Darin wurden auch Maschinen vorgestellt, beispielsweise Windfänge, die für diese ersten Formen der mechanisierten Bewetterung eingesetzt wurden.

from the 17th century. Using the stack-effect, fires were used in surface ovens to increase the airflow from the 18th century. Animals, like the canary and rodents, as well as safety lamps were used as first gas detection systems. After around 1800, control devices were used to better direct airflow inside the mines. Scientific awareness on fluid mechanics and thermodynamics increased the understanding of interdependencies (2).

Today, depths of more than 1,000 m are common and diesel equipment is accounting as one of the main pollutants since its introduction in the 1970s. New technologies - pneumatic and electric motors – have yet allowed to install large mine fans that would provide huge amounts of air. Also, smaller fans are in use since around 1900 to allow better flow control in the underground systems. The development of ventilation software (from about 1950) has made it comparably simple to plan a mine ventilation system even before starting the mining projects (2).

Mining has been the driving motor for new technologies in a various number of cases. Though, optimisation in the ventilation systems is not commonly conducted, leading to a "set-and-forget-mentality" (4). Existing systems are remaining untouched and only topped up with additional volumes as new sections are developed, resulting in a loss of overall efficiency.

With rising energy prices and consequently stricter occupational exposure limits regarding gases and dust, mining companies are recently facing the question of how to face these changing demands in the future. Among economic reasons, social acceptance is also a factor motivating companies to optimise their systems, as today's society is conscious of environmental concerns.

A possible solution can be the adequate introduction of ventilation on demand (VOD) systems. Ventilation on demand means supplying required amounts of fresh air to individual mining areas only at times they are needed. This leads from a static to a dynamic and intelligent air supply which will lead to a reduction of the total required airflow within a mine. By reducing the total airflow, energy can be saved in disproportionately high amounts due to the cubic relationship between volume flow and fan power as shown with the following formulas:

$P = \Delta p \cdot V'$ and $\Delta p = R \cdot V'^2$ result in $P = R \cdot V'^3$

E. g.: A mine requires an increase of airflow (V') by 20 %. This will lead to an increase of pressure drop (Δp) by 44 % which then leads to a power (P) increase of 73 %. By using VOD with intelligent air management, it is possible that no additional volumes will be required. On average, ventilation accounts for up to 50 % of a mine's energy costs, and up to 15 % of a mine's total costs. Thus, VOD can hold immense saving potentials (5, 6).

With intelligent air supply, quality demands will also be easier to meet. By this, VOD can also lead to a generally cleaner and safer mine environment. Also, other improvements such as new motors can lead to cleaner mine air and air flow demands may decrease, but such do not rely on controlling the airflow itself and, therefore, are not involved with VOD. In this case, the general concept of "Mine Ventilation Optimization" applies, of which VOD is a part of, too (7).

Der Wettermengenbedarf stieg nach Etablierung der regelmäßigen Sprengarbeit im 17. Jahrhundert und im Zuge der fortschreitenden Industrialisierung rasant an. Wetteröfen dienten ab dem 18. Jahrhundert der Erzeugung eines Kamineffekts, um die Wetter in Bewegung zu halten. Kanarienvögel, Nagetiere und Sicherheitslampen kamen als erste Gasdetektoren nach Untertage. In England wurden um 1800 erstmals Wetterbauwerke gezielt zur Führung der Luftmassen eingesetzt und neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik führten zu einem stetig wachsenden Verständnis für die strömungstechnischen Zusammenhänge (2).

Heute sind Teufen über 1.000 m nicht mehr ungewöhnlich. Seit den 1970er Jahren haben Dieselmaschinen weltweit Einzug in die Bergwerke gehalten und sind dort heute einer der Hauptverursacher von schädlichen Gasen und Feinstaub, die es durch die Bewetterung zu verdünnen und abzuführen gilt. Neue Antriebstechniken (Dampfkraft, Elektrizität) haben es bereits weit zuvor möglich gemacht, immer größere Ventilatoren anzutreiben, mit denen die steigenden Wettermengenbedarfe realisiert werden konnten. Neben passiv arbeitenden Wetterbauwerken wurden etwa ab dem Jahr 1900 zusätzlich kleinere Lüfter untertägig installiert, um den Hauptgrubenlüfter zu ergänzen und die Wetter gezielt in Arbeitsbereiche leiten zu können, die andernfalls nicht oder nur unzureichend durchströmt würden. Die Entwicklung und Einführung von Software machte es schließlich – ab Mitte des 20. Jahrhunderts – möglich, eine geeignete Wetternetzplanung bereits vor Errichtung eines Bergwerks durchführen zu können (2).

Trotz der zahlreichen Veränderungen, welche die Wettertechnik in den Jahrhunderten erlebt hat, hat sich in den vergangenen Jahrzehnten ein gewisser Stillstand – die „set-and-forget-Mentalität" – eingestellt (4). Wetternetze wurden zwar nach Bedarf erweitert, wenn beispielsweise neue Felder erschlossen wurden, aber zumeist nicht optimiert. So konnte zwar die Versorgung der Betriebspunkte mit Frischwettern sichergestellt werden, was aber häufig zu einer Verringerung der Effizienz des gesamten Systems geführt hat.

Seit einigen Jahren stellt sich zahlreichen Bergwerksbetreibern daher die Frage, wie den steigenden Ansprüchen an Sicherheit und den immer komplexer werdenden Gruben bei steigenden Energiekosten begegnet werden kann. Neben ökonomischen Faktoren spielen dabei zunehmend ökologische und soziale Aspekte in Hinblick auf eine gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber Rohstoffaktivitäten eine Rolle.

Eine mögliche Lösung für die vorliegenden Problemstellungen ist die unter dem konzeptuellen Namen „Ventilation on Demand" (VOD – bedarfsgerechte Wetterführung) bekannt gewordene Idee, einen jeden Betriebspunkt in einem Bergwerk genau mit der Menge an Frischwettern zu versorgen, derer es tatsächlich in diesem Moment bedarf. Diese Idee führt damit weg von der pauschalen Bewetterung hin zu gezielt und intelligent verteilten Volumenströmen, wobei der Gesamtvolumenstrom deutlich reduziert werden kann. Diese Reduzierung des Volumenstroms kann schließlich zu den gewünschten Einsparungen führen, da der hierfür zugrundeliegende mathematische Zusammenhang den Volumenstrom der aufzubringenden Energiemenge in der dritten Potenz zufließen lässt.

$P = \Delta p \cdot V'$ und $\Delta p = R \cdot V'^2$ ergeben $P = R \cdot V'^3$

2 Today's solutions and future challenges in mine ventilation

Mining companies have a range of available options to ventilate their mines. Depending on the individual requirements, ventilation can be arranged accordingly, such as with a pull or push, U-tube or flow-through, or split, perimeter or unit ventilation system. Necessary infrastructure can be installed easily as power and material supply is no more a subject to various uncertainties. Also, separate ventilation shafts and roads can be used to improve ventilation networks, e.g. Kirunavaara Mine, Sweden (8). Roads used for ventilation only are usually designed with smooth walls and do not hold any mining equipment in order to keep the overall resistance low.

The trend to deeper and more complex mines is still ongoing. Both results in longer airways, meaning higher heat transfer from strata and higher shock and friction losses, and deeper mines mean higher rates of auto-compression. Therefore, cooling is also in the centre of attention.

Assuming increasing numbers of diesel equipment, demanded air volumes will also increase to dilute diesel emissions and heat (Figure 1). In the case of diesel changing to electricity as an energy source for motors, heat will still be of relevance.

With rising electricity, investment and maintenance costs, optimisation is more and more a requirement for economic underground resource extraction. Without optimisation, additional volumes would lead to a significantly high increase in energy costs in mines. Automation, as it is often named in this context, is an available solution for reducing the risk that miners are exposed to. Oxygen levels down to 17 % (minimum for diesel equipment) are acceptable and air can be recirculated within a mine, meaning lesser amounts of input air. However, ventilation will still be required, and it is assumed that required volumes might even increase depending on the depth of the mine, as heat must be exhausted. Therefore, automation cannot stand as a solution alone (9).

3 Ventilation on demand: diversity of possible solutions

3.1 Overview

The overall goals of ventilation on demand (Figure 2) and the involved optimisation of the ventilation network are increasing production and saving energy by effectively controlling the flow of air within regulatory demands Production can be increased, e.g., by controlled ventilation after blasting to shorten re-entry times (10).

The new ventilation system will be beyond the 'set-and-forget-mentality' and operate dynamically. The following questions are of major concern (11):

- Do all areas need to be ventilated?
- Do these areas require a constant volume?
- Are all auxiliary systems required at the same time?
- Have the original system design criteria been exceeded?
- Is ventilation needed in non-active periods?

By optimising the schedules of single processes (blasting, extraction, haulage), efficiency can be further increased. Smart

Fig. 1. Loader as a trigger for increased ventilation needs (15).
Bild 1. Ladearbeit als Grund für Sonderbewetterung (15). Photo/Foto: ABB

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht diesen Zusammenhang: Eine Erhöhung des Volumenstroms (V') um 20 % bewirkt bereits eine Erhöhung des notwendigen Druckunterschieds (Δp) um 44 %, was zu einer Erhöhung der am Lüfter notwendigen Leistung (P) um 73 % führt. Werden durch VOD derartige Erhöhungen des Bedarfs vermieden, kann dies für ein Bergwerk demnach enorme Einsparungen bedeuten. Allgemein wird angenommen, dass die Wettertechnik bis zu 50 % der Energiekosten und bis zu 15 % der Gesamtkosten eines Bergwerks ausmachen können und damit eine Beachtung dieses Kostenpunkts durchaus gerechtfertigt ist (5, 6).

Das gezielte Zuführen von benötigten Volumenströmen bedeutet schließlich ebenso, dass die Einhaltung von Vorgaben garantiert wird und damit die Qualität der Wetter verbessert werden kann. Auch ist denkbar, dass andere Verbesserungen, z. B. die Weiterentwicklung von Motoren, wesentlich zu einer Steigerung der Wetterqualität beitragen werden. Derartige Methoden fallen dann jedoch nicht unter Ansätze von VOD im engeren Sinne, da sie nicht auf der gezielten Umverteilung der Volumenströme beruhen, sondern allgemeiner als „Mine Ventilation Optimisation" gelten, wovon wiederum VOD als ein wesentlicher Unterpunkt angesehen werden kann (7).

2 Heutige Lösungen und zukünftige Herausforderungen für die Wettertechnik

Dank der zuverlässigen Verfügbarkeit von Energiequellen und Ressourcen für den Ausbau der Infrastruktur ist es möglich, neue Betriebspunkte in Bergwerken beispielsweise mit Elektrizität zu versorgen. Es stellt demnach grundsätzlich kein technisches Problem mehr dar, zusätzliche wettertechnische Anlagen zu installieren und diese mit Energie zu versorgen. Einem Bergwerksbetreiber stehen damit zahlreiche Optionen zur Verfügung.

Je nach Aufbau eines Grubennetzes und in Abhängigkeit von spezifischen Gefahren können verschiedene Formen der Wetterführung realisiert werden. Hier sind beispielsweise saugende oder blasende, aufwärts oder abwärts geführte oder auch Y- und W-Bewetterung typische grundlegende Optionen. Mit zusätzlichen Lüftern – Booster Fans, Sonderbewetterung – oder verschiedenen Wetterbauwerken – z. B. Schleusen, Blenden – können die Wetter gezielt gelenkt werden.

load management can lead to lower costs, e.g. by scheduling processes of high energy demands into times of low tariffs (12).

3.2 Elements of VOD-systems

Answering the questions above is of organisational nature. Applying a VOD system requests complete and detailed knowledge of the mine ventilation network, the ongoing processes, and regulatory demands.

To precisely define local air demands, all machinery with their properties and positions must be known. Furthermore, personnel should be localised. With no personnel in any area, flow rates can be decreased to allowed minima. For both, localising personnel and machinery, a tracking and identifying system will be required.

Information on machinery and personnel then must be analysed to define needed volume flows and adequate reactions. Analysing data and triggering commands can either be conducted by a central control system or decentral. In both cases, adequate infrastructure is required to transmit information.

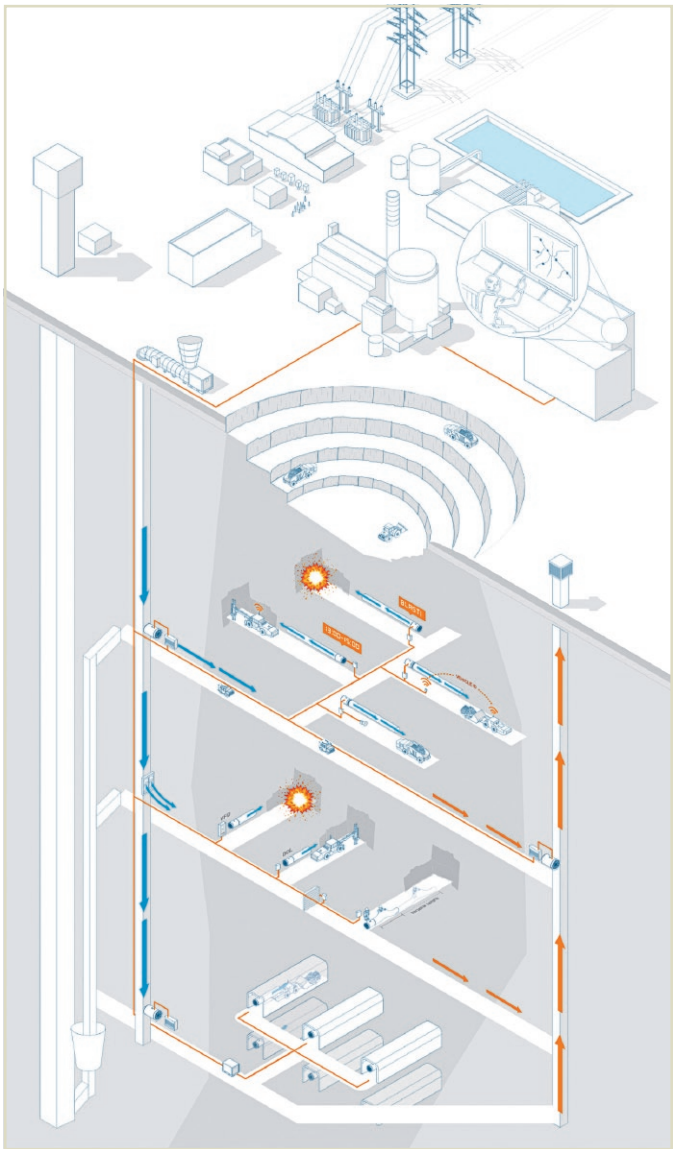

Fig. 2. Scematic View on a VOD system (15).
Bild 2. Schematische Darstellung einer bedarfsgerechten Bewetterung (15).
Source/Quelle: ABB

Die heute sehr hohen Bedarfe werden vermehrt über eigens angelegte Wetterwege in das Bergwerk geleitet, z. B. Eisenerzgrube Kiruna/Schweden (8), um Verluste durch Reibung beispielsweise an Fördereinrichtungen im Schacht zu vermeiden. Eine Steigerung der Effizienz des Bewetterungssystems kann hierdurch bereits erreicht werden.

Dennoch steht die Effizienz weiter im Fokus, da zum einen Anschaffungskosten, Energiekosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten tendenziell steigen und zum anderen die Bergwerke sich in immer größere Teufen entwickeln. Größere Teufen bedeuten nicht nur einen längeren Weg für die Wetter und damit erhöhte Druckverluste, sondern auch eine verstärkte Wärmeaufnahme durch Selbstverdichtung und durch die längere Kontaktzeit mit dem Gebirge. Die Einhaltung von Temperaturgrenzwerten durch Kühlung wird damit ebenso zu einem Aspekt, der steigender Aufmerksamkeit bedarf. Wird von weiter steigenden Zahlen an eingesetzten Dieselmaschinen und strengeren Grenzwerten für auftretende Gase ausgegangen, werden die notwendigen Wettermengen ebenso weiter steigen, nicht zuletzt auch, um die Abwärme der Motoren abzuführen (Bild 1). Letzteres bleibt auch beim zunehmenden Einsatz von Elektromotoren relevant. Ohne eine Optimierung der Wetternetze und gezielte Wetterführung käme es durch den wachsenden Bedarf zu überproportional steigenden Kosten.

Der häufig genannte Trend der Automatisierung wird zwar das Gefahrenpotential für den Menschen selbst erheblich verringern, allerdings wird weiterhin eine Bewetterung vonnöten sein, um die Maschinen ausreichend kühlen und die Bildung explosibler Atmosphären verhindern zu können. In diesen Grenzen bietet sich die Option, das Sauerstoffniveau auf 17 % (Machbarkeitsgrenze für Verbrennungsmotoren) fallen zu lassen, sodass durch gezielte Rückführung bereits geringere Gesamtvolumenströme ausreichen werden, doch wird die Automatisierung nicht als alleinige Lösung stehen können (9).

3 Ventilation on Demand: Lösungsansätze

3.1 Überblick

Die übergeordneten Ziele einer bedarfsgerechten Bewetterung (Bild 2) sind die Reduzierung der Energiekosten bei Einhaltung rechtlicher Rahmenbedingungen hinsichtlich der Luftqualität und die Steigerung der Produktivität, die beispielsweise durch gezieltes Auswettern erreicht werden kann (10). Die set-and-forget-Mentalität wird im Sinn der Optimierung mit VOD daher durch ein dynamisch reagierendes System abgelöst. Folgende Fragestellungen stehen im Vordergrund (11):

- Müssen alle Felder bewettert werden?
- Benötigen alle Felder einen konstanten Volumenstrom?
- Müssen alle sonderbewetterten Bereiche zu jeder Zeit versorgt werden?
- Wurde das ursprüngliche System, auf dem die Auslegung des Wetternetzes beruhte, erweitert oder anderweitig verändert?
- Muss die Bewetterung auch in Zeiten von betrieblichen Stillständen aufrechterhalten werden?

Gerade die Frage nach der Zeit spielt eine entscheidende Rolle. Welche Prozesse bedürfen einer speziellen (intensiven) Bewetterung und wann finden diese statt? Als weiteres Ziel einer Optimie-

rung könnten daher diese energieintensiven Prozesse schließlich in Zeiten mit geringeren Energiekosten verlegt werden, z. B. in die Nacht, sofern dies organisatorisch möglich ist (12).

3.2 Elemente eines VOD-Systems

Die Beantwortung der obigen Fragen ist eine rein organisatorische Angelegenheit. Eine Voraussetzung für die Anwendung geeigneter VOD-Ansätze ist die detaillierte Kenntnis über die betrieblichen Abläufe und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Um die Bedarfe einzelner Betriebspunkte im Detail ermitteln zu können, sollten Maschinen in ihren Eigenschaften, ihrem Status und ihren Aufenthaltsorten bekannt sein. Ebenso sollte bekannt sein, ob in einem Bereich Personal im Einsatz ist.

In beiden Fällen ist also ein Tracking- und Identifizierungssystem notwendig. Die Informationen über den Aufenthalt von Menschen und Maschinen müssen ausgewertet werden, um eine angemessene Reaktion zu erzeugen. Die Auswertung kann zentral oder dezentral stattfinden, wobei in allen Fällen eine Infrastruktur zur Kommunikation notwendig ist.

Darüber hinaus sollten alle wettertechnischen Elemente automatisiert verstellbar sein. Die Möglichkeit der Einstellbarkeit von Lüftern wird im ebenfalls in dieser Ausgabe erscheinenden Beitrag „Bedarfsgerechte Bewetterung – steuerbare Lüftertechnik, Einsatzbeispiele, Grenzen“ (S. 342 bis 355) thematisiert.

Um die geforderten Luftqualitäten und Volumenströme einhalten zu können, reicht die Ermittlung von Bedarfen, z. B. Frischwettermenge je Diesel-kW, allein jedoch nicht aus. Besonders bei sehr komplexen Netzwerken kann die Zahl an unerwarteten Einflüssen unübersichtlich sein. Die Kontrolle der tatsächlich erreichten Luftqualitäten und der Vergleich gegenüber den erwarteten Eigenschaften sind daher sinnvoll.

Hierfür gilt es, das Grubengebäude mit einem geeigneten Netz aus Sensoren zu überwachen. Dadurch kann die starre Berechnung der Bedarfe (quantitativer Ansatz) durch ein gesteigert dynamisches System mit Reaktion auf tatsächliche Schadstoffkonzentrationen oder sich einstellende Volumenströme (qualitativer Ansatz) abgelöst werden. Ein qualitativ arbeitendes VOD-System kann so beispielsweise auch auf unerwartet auftretende Schadstoffe reagieren.

3.3 Hierarchie in VOD-Systemen

Die oben aufgeführten Elemente eines VOD-Systems müssen nicht zwangsläufig alle enthalten sein, um eine bedarfsgerechte Wetterführung zu realisieren. Es ist schließlich eine Frage des Grads der Umsetzung, welchen Einfluss auf den Wirkungsgrad das zu installierende System hat. Der Grad der Umsetzung kann über folgende Hierarchie definiert werden, wobei die zu erwartenden Einsparpotentiale mit dem Grad der Umsetzung steigen (13):

- Stufe 1: Manuelle Steuerung. Als erster Schritt gilt die Einrichtung (irgend)einer Möglichkeit der Steuerung. Lüfter können manuell über Schalter eingeschaltet, ausgeschaltet oder verstellt und andere Komponenten in ihrer Aktivität eingestellt werden, wenn die Situation Anlass hierfür gibt.
- Stufe 2: Zeitabhängige Steuerung. Die Betriebsplanung gibt Zeiten für gewisse Aktivitäten vor. Über diese können die Bedarfe berechnet werden, die zu einer Zeit zu realisieren sind.

Furthermore, ventilation infrastructure is to be installed to change the airflows to the calculated needs. It should be remote controlled to guarantee short reaction times. Among regulators and doors, especially fans can be subject to variable settings. More details can be found in the corresponding paper about controllable fans, also found in this publication (pp. 342 to 355).

To meet regulatory demands, only calculating static demands based on e. g. diesel-powered equipment will not be sufficient. Especially large mines hold an enormous hazard regarding unexpected events, such as gas outbursts. Monitoring the network with gas detection sensors and measuring devices can be used to analyse air qualities and react e.g. with higher flow rates if certain regulatory demands are not yet met.

Using a monitoring system instead of applying calculated quantities will finally make the system a quality-based VOD rather than a quantity-based system, which is unable to react on spontaneous events.

3.3 Hierarchy of different VOD systems

Not all the named elements have to be installed to make a system a VOD based system. It is recognised though, that with a higher grade of implementation, higher savings can be achieved.

Five levels of implementation can be differentiated (13):

- Level 1: Manual Control. The first step towards an efficient VOD is any control after all. Ventilation officials can manually turn on and off fans and vary regulators and doors. Fans may also be fitted with variable frequency drives (VFD) and adjusted in speed.
- Level 2: Time of Day Scheduling. Planned changes in the network are no longer enforced manually, but on a pre-set daily on/off pattern.
- Level 3: Event-based. Ventilation is changed depending on certain activities within the mine. E.g.: an auxiliary fan is turned on after blasting to shorten clearance time. In an event-based system, adequate reaction can also be given in case of fires and other unexpected events.
- Level 4: Tagging. As described under the aspect of quantity-control, tagging implies the knowledge of position and type of vehicles and other pollutants to define ventilation needs.
- Level 5: Environmental. Environmentally controlled networks respond automatically to any changes of the in-time underground condition. This is considered as quality-control.

3.4 VOD-software

Other than VOD systems of level 1, the execution of any control is based on software. The following are currently available on the market:

- SmartVentilation (ABB, new.abb.com). ABB, the Swiss developer of SmartVentilation , developed this software for mines from its initial version designed for buildings. It is available in three options that are of different complexity. SmartBasic only provides tools for manual control, SmartMid holds options to automatically control ventilation equipment, and SmartPerfect provides full quality-controlled ventilation optimisation.

Über ein Steuerungssystem können die Komponenten des Wetternetzes entsprechend der Zeiten programmiert werden. Die Anpassung erfolgt dann automatisch.

- Stufe 3: Steuerung aufgrund konkreter Ereignisse. Unabhängig von vorab definierten Zeitplänen können einzelne Ereignisse in dieser Stufe berücksichtigt werden. Insbesondere bei Sprengarbeit oder im Brandfall, kann so auf einzelne Situationen reagiert werden, die aber manuell vorzugeben sind.
- Stufe 4: Quantitativer Ansatz. Verbraucher werden anhand von Sensoren im Grubengebäude lokalisiert und die sich daraus ergebenden Bedarfe durch das VOD-System realisiert.
- Stufe 5: Qualitativer Ansatz. Neben den über den quantitativen Ansatz festgelegten Bedarfen erfolgt die Kontrolle der untertägigen Zustände durch ein umfassendes Netzwerk von Sensoren. Durch entsprechende intelligente Software kann auf einzelne Ereignisse, die sich durch Veränderung der Eigenschaften der Wetter definieren lassen, automatisch reagiert werden.

3.4 VOD-Software

Abgesehen von Stufe 1 der Implementierung bedarf die Umsetzung eines VOD-Systems einer geeigneten Software. Aktuell sind folgende drei VOD-Softwarelösungen kommerziell verfügbar:

- SmartVentilation (ABB, new.abb.com). Die ursprünglich für Gebäude entwickelte Software SmartVentilation des Schweizer Entwicklers ABB ist in drei Ausführungen verfügbar, die sich im Grad ihrer Komplexität unterscheiden. So bietet SmartBasic lediglich überwachende Funktionen zur manuellen Umsetzung von Änderungen, SmartMid verfügt bereits über Tools zur automatisierten Regelung von wettertechnischen Elementen und SmartPerfect bietet die vollautomatische und qualitative Kontrolle über das Wetternetz.
- NRG1-ECO® (BESTECH, www.bestech.com). Das Programm NRG1-ECO® wurde von einer Expertenkommission des Herstellers BESTECH entworfen. Dadurch ist das Programm speziell auf die Bedürfnisse von Bergwerken zugeschnitten. Dieses Programm zeichnet sich dadurch aus, dass es dezentral reagiert. Eine Übermittlung von Daten nach Übertage ist für eine Entscheidungsfindung somit nicht mehr nötig. Hierdurch sind Reaktionszeiten verkürzt, und möglichen Gefahren durch Systemausfälle kann besser begegnet werden.
- SmartExec™ (Howden Simsmart, www.howden.com). Die kanadische Firma Simsmart entwickelte ihre Software für VOD aus Vorläufern, die zur Belüftung von U-Booten eingesetzt wurden. Das Programm arbeitet dabei recht ähnlich dem von ABB, was auf einer früheren Zusammenarbeit der beiden Unternehmen beruht. Es verfügt über ein ausgeprägtes Tracking-System für Fahrzeuge und Personen und steuert die wettertechnischen Elemente von Übertage aus.

3.5 Beispiele

Als allgemeiner Ansatz gilt es, mittels VOD die Effizienz der Bewetterung zu steigern und Kosten zu sparen. Ein beeindruckendes Beispiel stellt die Bousquet Mine von Barrick Gold in Kanada dar. Hier wurde das Bewetterungssystem für eine im Jahr 1990 realisierte Leistung von 1.800 t/d Erz in maximal zwölf aktiven Örtern dimensioniert. Tatsächlich befanden sich nicht mehr als zehn Örter gleichzeitig im Angriff. Bis zum Jahr 1999 erweiter-

- NRG1-ECO® (BESTECH, www.bestech.com). NRG1-ECO® was developed by a committee of experts in the field of mine ventilation which makes this programme ideal for mine environments. It works decentral, meaning communication with a surface control centre is not required to trigger certain actions. Reaction times are shortened and hazards from communication losses are minimised.
- SmartExec™ (Howden Simsmart, www.howden.com). The Canadian company Simsmart developed SmartExec™ from software used in submarine ventilation. Its structures are similar to ABB's SmartVentilation which derives from the companies' partnership in the past. It holds tools for full tracking of vehicles and personnel and takes control from a central control room.

3.5 Examples

As a general concern, VOD is introduced to mines to save energy and/or increase productivity. A good example is Barrick Gold's Bousquet Mine in Canada. The ventilation system was designed for 188 m^3/s in 1990 with an expected extraction of 1,800 t/d at a maximum of twelve faces. In fact, it was only ten in advance at one time. However, by 1999, production had increased to some 2,100 t/d and an additional 110 m^3/s were required. With the implementation of VOD, the system could remain with its infrastructure and providing 188 m^3/s (5).

Using VOD simulation software for a complex room and pillar mine with 110 auxiliary fans, a saving potential of 20,000 MWh/a was calculated (14). Both examples show the tremendous potential using intelligent directing of air volumes.

Other examples are given in the following report on adjustable fans (Engler, Kegenhoff, Papesch).

4 Open questions

With the above descriptions, VOD has been defined as the supply of air at certain places in the amount and time needed. With the elements of ventilation systems and VOD software, it is possible to provide the required amounts and with monitoring systems, qualities can be validated. However, some open questions remain and higher saving potentials can be achieved with further implementation.

If loaders are not running at full load, e.g. diesel emissions are reduced. By transmitting not only location and vehicle characteristics, but also actual status, air volume supply can be further adjusted.

With any adjustment of ventilation equipment, it is clear that changes will not affect the target locations immediately due to inertia. This means, that diesel fumes of a loader entering a section will not be diluted immediately, although the local ventilation system is adjusted in that very moment. This can lead to a supply shortfall. To avoid such shortages, routing should be available, meaning that the system will recognise the intended routes of machinery to adjust its elements just in time before the requirements actually apply.

The same principle applies to sensors that can be out of range, affected by cross-sensitivity and a subject to inertia.

Finally, emergency situations can lead to fatal system downtimes. Attempts of increasing ventilation to a maximum seems

te sich der Abbau bereits auf 18 Örter und die Förderung belief sich auf 2.100 t/d. Die ursprünglich zugeführten 188 m^3/s hätten ohne die Implementierung eines VOD-Systems um weitere 110 m^3/s ergänzt werden müssen. Durch gezieltes Umstrukturieren des Systems konnte der Betrieb mit den bereits vorhandenen wettertechnischen Elementen ohne Ergänzungen weitergeführt werden (5).

In einem anderen Fall konnte über entsprechende Software ein Einsparpotential um 20.000 MWh pro Jahr für einen komplexen Örterbau mit 110 Zusatzlüftern simuliert werden (14).

Weitere Beispiele mit detaillierten Beschreibungen zur Umsetzung von VOD sind ebenfalls von Engler, Kegenhoff und Papesch im genannten Artikel zu bedarfsgerechter Bewetterung in diesem Heft beschrieben.

4 Grenzen und Ausblick

Die bisherigen Erläuterungen haben aufgezeigt, dass bereits gute Ansätze zur Umsetzung einer bedarfsgerechten Bewetterung entwickelt wurden. Dennoch sind weiterhin einige Fragen offen, deren Beantwortung eine weitere Steigerung der Effizienz erwarten lässt.

Einfache technische Ergänzungen können dabei schon zu Erfolgen und weiteren Einsparpotentialen führen. Wenn beispielsweise ein Lader nicht unter Last oder Volllast fährt, benötigt er tendenziell geringere Wettermengen zur Verdünnung der Dieselschwaden. Wenn nicht nur Herstellerdaten und aktuelle Position, sondern auch der tatsächliche Status übermittelt werden kann, wird eine umso bessere Analyse der Situation möglich.

Auch muss in der Arbeitsweise der Programme berücksichtigt sein, dass eine Reaktion auf neue Umstände nicht unmittelbar zu den gewünschten Ergebnissen führt. Ein Lader beispielsweise, der einen Betriebspunkt erreicht und in diesem Abschnitt registriert wird und dadurch wiederum einen Lüfter auf mehr Leistung einstellt, benötigt unmittelbar entsprechende Volumenströme zur Verdünnung der Abgase. Zusätzliche Volumenströme sind aber nicht sofort verfügbar, sondern unterliegen der Trägheit des Wetternetzes. Hier empfiehlt sich die genaue Festlegung von typischen Routen der einzelnen Fahrzeuge, damit das Programm bereits in ausreichender Zeit zuvor erkennen kann, wo später erhöhte Bedarfe auftreten werden. Gleiches gilt auch für die Erreichbarkeit, Trägheit und Querempfindlichkeit von Sensoren. Auch hier führt die technisch derzeit nicht anders lösbare Verzögerung zwischen Auftreten einer Situation und der zugehörigen Reaktion möglicherweise zu entscheidenden Versorgungsdefiziten.

Schließlich ist auch die Reaktion auf Extremsituationen nicht abschließend geklärt. Fällt das Kommunikationsnetz aus oder kommt es in einer Grube zu Gasausbrüchen oder Bränden, die wiederum einen Ausfall des Kommunikationssystems hervorrufen, können pauschale Reaktionen nicht immer zu einem guten Ausgang der Situation führen. In welcher Form ein Notfallmanagement möglich ist und wie dieses umgesetzt werden kann, muss noch abschließend geklärt werden.

5 Zusammenfassung

Ventilation on Demand steht als konzeptueller Oberbegriff für jede Optimierung eines wettertechnischen Systems, sofern die

a good reaction to be on the safe side, but could be the wrong response, e.g. in case of mine fires. In this field, more research will be required to develop feasible and safe solutions.

5 Conclusions

Ventilation on demand is the conceptual name of any optimisation in mine ventilation systems that targets the intelligent and controlled supply of individual mine sites with the required quantities of air in the time they are needed. For the implementation of a VOD systems, the following matters can be respected:

- Concerning defining the demand knowing emission sources, consumers and regulatory guidelines.
- Concerning knowing consumers and emission sources, vehicle tracking, vehicle identification and personnel tracking.
- Concerning adjusting the system by adjustable main fans, auxiliary fans, regulators and ventilation doors.
- Concerning validation of airflow measuring devices, gas concentration measuring devices and dust measuring devices.
- Concerning network communication with tracking hardware, network infrastructure (connecting wires etc), control units and software.

Using VOD can not only lead to a reduction of energy consumption, but can also be used to increase production or to expand the mine network with the available ventilation utilities.

For a maximum benefit from VOD, further research is to be conducted. An example for a closer investigation of auxiliary system optimisation can be read in the following article on adjustable mine fans.

Optimierung über die gezielte, den lokalen Bedarfen entsprechende Wetterführung realisiert wird. VOD deckt zusammenfassend folgende Aspekte bezüglich der gezielten Steuerung von Wetterströmen ab:

- Kenntnis über rechtliche Rahmenbedingungen, Gasquellen und Verbraucher,
- Erfassung von Aufenthaltsort von Personen und Maschinen, Status von Maschinen und aktuelle Zusammensetzung der Wetter,
- Anpassung von Hauptgrubenlüftern, Zusatzlüftern und Reglern sowie
- Einrichtung von Mess- und Regelstationen, Kommunikations-Infrastruktur, Software und wettertechnischen Elementen.

Der zielgerichtete Einsatz von VOD kann nicht nur zu einer reinen Kostensenkung in bestehenden wettertechnischen Systemen führen, sondern auch zu einer Erhöhung der Produktivität und der Erschließung weiterer Felder bei gleichbleibenden Kosten und gleichen wettertechnischen Ressourcen.

Um die noch ungeklärten Fragen, z.B. Berücksichtigung der Trägheit des Systems oder Einsatz von geeigneter Sensorik, zu lösen sowie den Bereich der Wettertechnik weitergehend in die Planung und Steuerung der Produktion, des Transports sowie der Wartung und Instandhaltung zu integrieren, sind weitere Entwicklungen von ganzheitlichen Ansätzen notwendig. Auch ist jedes Wetternetz mit seinen Elementen einzeln zu betrachten, sodass neben dem konzeptuellen Ansatz weitere Detailbetrachtungen notwendig sind. Ein Beispiel zur Detailbetrachtung wird im genannten Folgeartikel zur steuerbaren Lüftertechnik vorgestellt.

References / Quellenverzeichnis

(1) Jahn, M.: Der älteste Bergbau in Europa. Berlin: Akademischer Verlag, 1960.
(2) Die Geschichte der Grubenbewetterung. Online. Available: http://www.grubenbewetterung.de.
(3) Agricola, G.: De re metallica libri XII. 1556.
(4) Lagowski, K.: Air Supply on Demand – New Ventilation Technology Provides Airflow When and Where It Is Needed. 2013.
(5) Hardcastle, S. G.; Gangal, M. K.; Schreer M.; Gauthier, P.: Ventilation-on-Demand – Quantity or Quality – A Pilot Trial at Barrick Gold's Bousquet Mine. In: Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium, Rolla, 1999.
(6) Katary, S.: Ventilation on Demand – CAF (Community Adjustment Fund). CEMI, 2012.
(7) Basu, A. J.; Andersen, M. M.; Godsey, A. J.: A Framework for Integrating Mine Ventilation Optimization (MVO) with Ventilation on Demand (VOD). 2013.
(8) Mukka, L.; Blomgren, C.: Extension of the main ventilation system at LKABs Kiruna Mine for the new main haulage level 1365 m. 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, 2008.
(9) Kocsis, C. K.; Hardcastle, S. G.; Hall, R.: The Benefit of Using Mine Process Simulators to Design a "Life-Cycle" Mine Ventilation System. In: SME Annual Meeting, Denver, 2004.
(10) Gillies, A. D. S.; Wu, H. W.; Shires, D.: Development of an Assessmet Tool to Minimize Safe After Blast Re-Entry Time to Improve the Mining Cycle. In: Proceedings, 10th US Mine Ventilation Symposium, Anchorage, Balkema, 2004.
(11) Hardcastle, S. G.; Kocsis, C. K.: The Ventilation Challenge - A Canadian Perspective On Maintaining a Good Working Environment in Deep Mines. 2002.
(12) Chatterjee, A.; Zhang, L. Xia, X.: Optimization of Mine Ventilation Fan Speeds According to Ventilation on Demand and Time of Use Tariff. Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Pretoria, Pretoria, 2014.
(13) Tran-Valade, T.; Allen: Ventilation-On-Demand key consideration for the business case", in Canadian Institute of Mining (CIM) Convention: Proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference, Toronto, Canada, 2013.
(14) Howden Simsmart: Ventilation on Demand brings substantial energy and cost savings. 2016.
(15) http://new.abb.com/mining/underground-mining/mine-automation/smartventilation

Authors / Autoren

Felix Dicks, cand. M.Sc. Mining Engineering, und
Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, Institut für Bergbau,
Technische Universität (TU) Clausthal, Clausthal-Zellerfeld