

# Ventilation on Demand – Controllable Mine Fans, Applications and Limitations

Worldwide interest in developing technology for the automatic control of mine ventilation systems has existed since the 1980s and has mainly been driven by the need to save costs. Demand-oriented ventilation technology is based on the fundamental idea that those areas of the mine where a lot of work is being done should be provided with a greater flow of ventilation air, appropriate to their needs, that those parts where there is little or no activity whatsoever. In this way it is possible to increase the volume flow in the active production areas at the expense of the ventilating air that is delivered to the non-active zones. The aim is

to achieve the optimum volume flow control at the lowest operating cost based on the minimum volume flow requirement in the areas concerned. This paper examines in detail the fundamental concept of ventilation on demand (VOD) and the basic approach that is being taken from today's perspective. As the technical options available have been improved over the course of the last two decades it seeks to present the systems developed to date and to examine their advantages and limitations along with the opportunities provided by fan control technology.

## Bedarfsgerechte Bewetterung – steuerbare Lüfertechnik, Einsatzbeispiele, Grenzen

Das weltweite Interesse an einem Konzept zu einer automatisierten Kontrolle der Bewetterung besteht schon seit den 1980er Jahren und beruht vor allem auf dem Aspekt der Kostenersparnis. Einer bedarfsgerechten Bewetterung liegt der Grundgedanke zugrunde, dass Bereichen, in denen viel gearbeitet wird, dem Bedarf entsprechend mehr Wettervolumenstrom zur Verfügung stehen soll als Bereichen, in denen nur wenig oder gar nicht gearbeitet wird. So kann der Volumenstrom in aktiven Abbaubereichen auf Kosten des Volumenstroms in nicht aktiven Bereichen erhöht wer-

den. Ziel ist eine optimale Volumenstromsteuerung bei niedrigsten Betriebskosten auf Basis des Mindestwettervolumenstroms in den jeweiligen Bereichen. In diesem Beitrag wird der Grundgedanke und Ansatz zur bedarfsgerechten Bewetterung (ventilation on demand – VOD) aus heutiger Sicht näher beschrieben. Da sich in den letzten zwei Jahrzehnten die technischen Möglichkeiten weiterentwickelt haben, sind beispielhaft die bisher entwickelten Systeme, deren Vorteile und Einsatzgrenzen sowie die Möglichkeiten der Lüftersteuerung dargestellt.

### 1 Introduction

Worldwide interest in developing technology for the automatic control of mine ventilation systems has existed since the 1980s and has mainly been driven by the need to save costs. Apart from remote-control systems for continuously monitored mine fans there were, at the beginning of the period in question, very few successfully executed installations of this kind in actual operation, a fact that prompted the following statement by A. Harley at the Third International Mine Ventilation Conference in 1984: 'It would not be unreasonable to expect that once the reliability of current environment monitoring systems has been improved and sufficient experience has been gained, the installations in question will be capable of controlling the ventilation flow to a certain degree' (1). Over the last 30 years we have indeed achieved full control of the ventilation system, whereas selective management, which is a much more complex challenge, has only been possible 'to a certain degree'.

### 1 Einleitung

Das weltweite Interesse an einem Konzept zu einer automatisierten Kontrolle der Bewetterung besteht schon seit den 1980er Jahren und beruht vor allem auf dem Aspekt der Kostenersparnis. Außer einer Fernsteuerung von kontinuierlich überwachten Lüftern gab es zu Beginn jenes Betrachtungszeitraums nur wenige umgesetzte Konzepte dieser Art, was zu der Aussage von A. Harley auf dem 3. internationalen Bewetterungskongress im Jahr 1984 führte: „Es ist nicht unbegründet zu erwarten, dass wenn die Zuverlässigkeit der gegenwärtigen Umweltmonitoringsysteme verbessert wird und Erfahrungen gesammelt werden, dass dann die Anlagen in der Lage sein werden, die Bewetterung zu einem gewissen Grad zu kontrollieren“ (1). Eine komplette Kontrolle der Bewetterung ist während der letzten 30 Jahre möglich geworden, während die Steuerung der Bewetterung eine sehr komplexe Herausforderung ist und bisher nur „zu einem gewissen Grad“ realisiert wurde.

## 2 The basic concept

### 2.1 Conceptual approach

The fundamental idea of ventilation on demand means providing those areas where a lot of work is under way with a greater flow of ventilating air, in line with their requirements, than those parts of the mine where there is little or no activity whatsoever. In this way it is possible to increase the volume flow in the active production areas at the expense of the ventilating air that is delivered to the non-active zones. Increasing the volume flow helps to achieve a better dilution and extraction of any harmful emissions and at the same time optimises the operating costs by applying an efficient fan control procedure.

The general remit for such a system can be presented as follows:

- to calculate the ventilation requirement for personnel and machines;
- to determine the total ventilation requirement for each working zone, ventilating district and/or production area;
- to control the mine fans and air resistance levels in line with the identified needs and as a result; and
- to ensure a dynamic allocation of the ventilating air flow throughout the entire mine ventilation circuit.

The aim is to achieve the optimum volume flow control at the lowest operating cost based on the minimum air flow requirement in the areas concerned (2, 3).

While the main fans and auxiliary ventilation areas play a key role in the overall mine ventilation system, the fan installations that are allocated to individual ventilating districts are also crucial when it comes to providing 'ventilation on demand'. Continuous ventilation at 100% fan capacity would represent the least favourable operating status. Based on this suggested scenario it is possible to reduce the volume flow throughout the mine when production levels are low, e.g. at weekends, provided that no toxic, combustible or explosive gases are likely to be released from the strata and collect in the mine workings (1, 4). In those working areas provided with auxiliary ventilation systems it is possible to reduce the ventilation level as and when circumstances permit, or indeed to shut the system down completely when the zone in question is unmanned and there is no risk to the workforce. The ventilation requirement in individual ventilating districts is determined in accordance with following parameters:

- minimum volume of air flow;
- possible release of natural gases from the surrounding rock;
- possible release of gases from operating materials (e.g. stowing material);
- the need for heat dissipation;
- the occurrence of radiation sources (e.g. radon); and
- shotfiring fumes.

If the period of time between the first and the last work assignment (blue zones in Figure 1) within one shift amounts to 75% of the shift duration, e.g., controlling the district fan in line with ventilation needs will result in an initial reduction in energy consumption at times when production levels are zero (grey zones in Figure 1). Controlling the fan in accordance with the arrival of

## 2 Ansatz

### 2.1 Konzeptioneller Ansatz

Der Grundgedanke zur bedarfsgerechten Bewetterung lautet: Bereichen, in denen viel gearbeitet wird, soll dem Bedarf entsprechend mehr Wettervolumenstrom zur Verfügung stehen als Bereichen, in denen nur wenig oder gar nicht gearbeitet wird. So kann der Volumenstrom in aktiven Abbaubereichen auf Kosten des Volumenstroms in nicht aktiven Bereichen erhöht werden. Die Volumenstromerhöhung würde eine bessere Verdünnung und Abführung der Schadstoffemissionen bei gleichzeitiger Kostenoptimierung durch Regelung der Lüfter bewirken.

Generelle Aufgaben eines solchen Systems bestehen in

- der Berechnung des Wetterbedarfs für Maschinen und Personen,
- der Ermittlung eines Gesamtwetterbedarfs für jede Abbauteilung, Wetterabteilung bzw. jedes Revier,
- der Steuerung von Lüftern und Wetterwiderständen entsprechend dem ermittelten Bedarf und demzufolge
- der Gewährleistung einer dynamischen Volumenstromverteilung für die gesamte Grubenbewetterung.

Ziel ist eine optimale Volumenstromsteuerung bei niedrigsten Betriebskosten auf Basis des Mindestwettervolumenstroms in den jeweiligen Bereichen (2, 3).

Neben der Bewetterung der gesamten Grube durch den Hauptgrubenlüfter oder gesonderter Bereiche sind die Lüfter der einzelnen Wetterabteilungen für eine bedarfsgerechte Steuerung von großer Bedeutung. Eine kontinuierliche Bewetterung bei 100%iger Lüfterleistung würde den ungünstigsten Zustand darstellen. Ausgehend von diesem Szenario kann der Volumenstrom bei geringer Produktion in der gesamten Grube – z.B. am Wochenende – reduziert werden, sofern keine giftigen, brennbaren oder explosiblen Gase aus dem Gebirge austreten und sich in den Grubenbauen ansammeln können (1, 4). Bei sonderbewetterten Grubenbauen ist es möglich, die Bewetterung je nach Gegebenheiten zu reduzieren oder bei Nichtbelegung und Nichtgefährdung außer Betrieb zu setzen. Der Bedarf in einzelnen Wetterabteilungen wird unter Beachtung folgender Parameter ermittelt:

- Mindestwettervolumenstrom,
- evtl. Auftreten natürlicher, aus dem Gebirge freisetzbare Gase,
- evtl. Auftreten freisetzbare Gase aus eingebrachten Materialien (z.B. Versatz),
- notwendiger Wärmeabtransport,
- Auftreten von Strahlung (z.B. Radon) und
- Sprengschwaden.

Wenn die Zeitdauer zwischen erstem und letztem Arbeitseinsatz (blaue Bereiche in Bild 1) innerhalb einer Schicht beispielsweise 75% der Schichtdauer beträgt, dann bewirkt eine dem Bedarf entsprechende Steuerung des Abteilungs Lüfters eine erste Verringerung des Energieverbrauchs zu Zeiten von keiner Produktion (graue Bereiche in Bild 1). Die Steuerung des Lüfters je nach Eintreffen von Personen und Maschinen, maximal beobachteter und ausgewerteter Zeitdauer für einen Arbeitsvorgang und Auswetterzeit wäre eine weitere Verbesserung des Bewette-

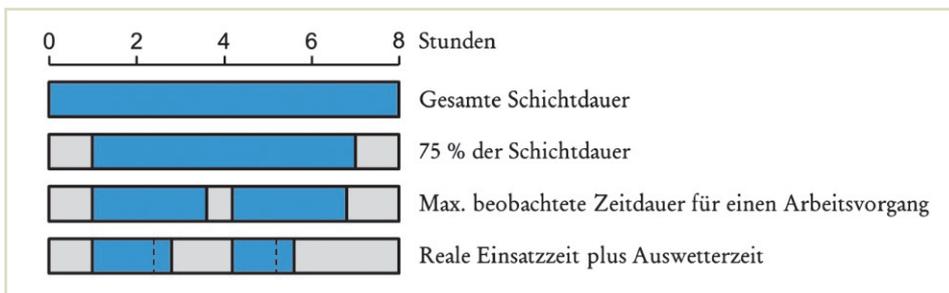


Fig. 1. Schematic representation of ventilation requirement times for a working unit over the course of one shift.  
Bild 1. Beispielhaft, schematisch dargestellte Bedarfszeiten der Bewetterung eines Betriebspunkts während einer Schicht.

personnel and machines, and in line with the maximum observed and analysed duration of each work cycle and fume dispersal period, would result in a further improvement in the ventilation status. The ultimate objective is to control the district fan in accordance with the actual deployment time of the workforce and mobile machines, and in line with the fume dispersal period, as the working district in question would be 'over-ventilated' if ventilating air is delivered at any other time. Moreover, the fans can be powered down when the workforce evacuates the area for shotfiring and then set up for fume dissipation by deploying a specially adapted operating regime (3, 4, 5).

## 2.2 Technical approach and specimen calculation

The volumetric air flow to the fans can be controlled using electrically adjustable guide blades, frequency inverters or pole-reversible fan motors. All the main fan-control functions, diagnosis options and status modes can be read and modified either directly at the fan unit itself or via a user interface built into the mine process control system (1, 6).

The different working units have to have their efficiency levels analysed in some detail for every possible application so that the most cost-effective system can be selected as part of the investment decision. In practice this means purchasing extensive control technology. Today electronic components and sensors make up a much larger part of the overall installation than was the case with systems in the past.

As a mine fan can only operate according to its performance curve, each unit is usually designed for efficiency at the main duty point. The rotor blades are adjustable in angle on the hub so that the unit can be controlled according to demand. Each angle produces a change in the performance curve. This results in a wide array of possible duty points (Figure 2).

However, as only one setting angle can have an optimum impact on the flow rate, the flow profile and the blade efficiency will change with every degree setting. If the blades remain on their ideal angle setting, consistent with the guide vanes, efficiency levels will not change significantly by altering the rotation speed because of the largely constant flow pattern. Any further losses can only be offset by using a frequency inverter. At the same time the effect factor  $\cos \varphi$  is increased. Any additional losses incurred are a result of the electric losses in the inverter. The ability to make stepless adjustments over the entire speed range creates a completely new energy regime for the fan and it is now possible to run the unit in every range from zero to its rated speed. Other benefits include the smooth start-up phase and the use of frequency regulation for deceleration. This not only reduces wear and tear on the mechanical components and promotes longevity but also

rungszustands. Letztendlich ist es das Ziel, den Abteilungslüfter entsprechend der realen Einsatzzeit von Personen und mobilen Maschinen sowie der jeweiligen Auswetterzeit zu steuern, da bei einer Bewetterung zu anderen Zeiten der jeweilige Abbaubereich „überbewettert“ wäre. Außerdem könnten die Lüfter zwischen Verlassen des Personals aus den Abbaubereichen und dem Sprengen heruntergefahren und nach dem Sprengen in einen speziell für die aktuelle Situation angepassten Modus zum Auswettern eingestellt werden (3, 4, 5).

## 2.2 Technischer Ansatz und Beispielberechnung

Die Steuerung des Volumenstroms an den Lüftern kann z. B. über elektrisch verstellbare Leitschaufeln, Frequenzumrichter oder polumschaltbare Motoren der Lüfter erfolgen. Jeweils an der Lüftersteuerung direkt am Lüfter oder über eine Benutzeroberfläche des Prozessleitsystems der Grube können alle wichtigen Funktionen, Diagnosemöglichkeiten und der Status der Lüfter eingesehen und verändert werden (1, 6).

Die exakte Betrachtung der Betriebspunkte zu den Wirkungsgraden muss für alle operativen Einsatzfälle durchgeführt werden, um in die wirtschaftlichste Anlage zu investieren. In der Praxis bedeutet dies den Einsatz einer umfangreichen Regelung. Hierbei nehmen heutzutage im Vergleich zum alten Stand der Technik die Elektronikkomponenten und Sensoren einen weitaus größeren Teil der Gesamtanlage ein als früher.

Da ein Ventilator nur auf seiner Kennlinie arbeiten kann, wird dieser meist für den Hauptbetriebspunkt effizient ausgelegt. Um bedarfsgerecht regeln zu können, sind die Laufschaufeln auf der Nabe im Winkel verstellbar. Jeder Winkel erzeugt eine Änderung in der Kennlinie. Es ergeben sich eine Vielzahl von möglichen Betriebspunkten (Bild 2).

Da sich jedoch nur ein Anstellwinkel optimal auf das Strömungsverhältnis auswirkt, verändern sich mit jeder Gradstellung der Strömungsverlauf und der Flügelwirkungsgrad. Bleiben die Flügel auf der idealen Winkelstellung, passend zur Leitvorrichtung, ändern sich die Wirkungsgrade durch den weitestgehend gleichbleibenden Strömungsverlauf durch Drehzahländerung nicht wesentlich. Erst mit einem Frequenzumrichter können weitere Verluste ausgeglichen werden. Gleichzeitig wird der Wirkfaktor  $\cos \varphi$  erhöht. Weitere Verluste entstehen durch die elektrischen Verluste im Umrichter. Die mögliche stufenlose Verstellung des kompletten Drehzahlbereichs ergibt eine völlig neue energetische Verfahrensweise für den Lüfter. Es ist nun möglich, den Lüfter in allen Bereichen von null bis Nenndrehzahl zu fahren. Ein weiterer Vorteil ist die sanfte Anfahrphase und das Abbremsen des Lüfters durch die Frequenzregelung. Dies schont nicht nur die mechanischen Bauteile und fördert die Langlebigkeit, sondern entlastet

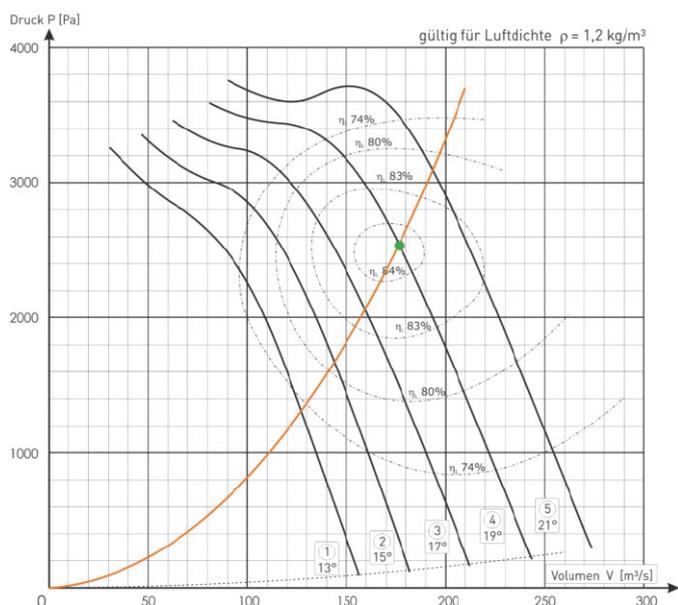


Fig. 2. Typical performance curves for different blade settings.  
Bild 2. Beispielhafte Übersicht über Kennlinien unterschiedlicher Schaufelstellungen.

helps to relieve the power input system. With direct starting the start-up current undergoes a 7- to 9-fold surge, whereas with the frequency inverter system there is only a 1.1- to 1.3-fold increase.

The power comparison scenario examined below illustrates the different operating periods when power demand is at a varying level:

In the case in point (Figure 2) the underground workplace has an assumed volumetric air flow of  $176 \text{ m}^3/\text{s}$  at a total pressure of  $2,530 \text{ Pa}$ . The optimal fan for this situation is designed to achieve the best possible blade efficiency. The system's plotted resistance parabola, which represents the equivalent mine dimensions, indicates the possible working points per blade setting. The required shaft output power of the motor is calculated by means of the following formula (1):

$$N_{shaft} = \frac{\dot{V} * \Delta p_{t,L}}{102 * g * \eta_F} \quad (1)$$

This gives the power output that has to be available at the shaft. The actual energy expenditure is based on the type of motor and control system used. The required power input is dependent on the motor efficiency, the effect factor  $\cos \varphi$  and the effectiveness of the control system according to the formula (2).

$$N_{in} = \frac{N_{shaft}}{\eta_M * \cos(\varphi) * \eta_{cs}} \quad (2)$$

Only these calculation values are used in depicting the relationships that exist in this particular example. In actual practice the losses encountered along the control chain can be broken down for closer analysis. Other electrical components such as transformers and so on, which are equally important, can be disregarded as the relationship in question remains unaltered throughout.

auch die Stromeinspeisung. Mit einer Direkteinschaltung ist der Anlaufstrom etwa mit 7- bis 9-fach anzurechnen, mit einem Frequenzumrichter wird das etwa 1,1- bis 1,3-fache erreicht.

Um den zu unterschiedlichen Zeiten verschiedenen Leistungsbedarf eines Lüfters zu verdeutlichen, wird im Folgenden der energetische Vergleich an einem Beispiel aufgezeigt:

Im Beispielfall (Bild 2) ist der Betriebspunkt der Grube bei angenommen  $176 \text{ m}^3/\text{s}$  Volumenstrom und bei  $2.530 \text{ Pa}$  Totaldruck. Der dafür optimale Lüfter ist so ausgelegt, dass der beste Flügelwirkungsgrad erreicht ist. Mit der eingezeichneten Widerstandsparabel des Systems, welche die Grubenweite darstellt, sind mögliche Betriebspunkte per Schaufelverstellung ersichtlich. Die notwendige Wellenleistung des Motors errechnet sich durch die Formel (1):

$$N_{Welle} = \frac{\dot{V} * \Delta p_{t,L}}{102 * g * \eta_L} \quad (1)$$

Dies ergibt die notwendige Leistung, die an der Welle vorhanden sein muss. Der wirkliche Energieaufwand richtet sich nach den gewählten Motoren und Steuerungen. Die notwendige, zugeführte Leistung ist abhängig vom Motorwirkungsgrad, Wirkfaktor  $\cos \varphi$  und dem Wirkungsgrad der Steuerung gemäß Formel (2).

$$N_{zu} = \frac{N_{Welle}}{\eta_M * \cos(\varphi) * \eta_{St}} \quad (2)$$

Für die Darstellung der Zusammenhänge in diesem Beispiel werden nur diese Werte berechnungstechnisch verwendet. In der Praxis können gerade in der Steuerung die Verluste gesplittet und näher betrachtet werden. Ebenso notwendige weitere Elektrokomponenten wie Transformatoren etc. bleiben unberücksichtigt, da der aufgezeigte Zusammenhang in gleichem Maße bestehen bleibt.

Bei einem gewählten  $560 \text{ kW}$  Motor ist der Motorwirkungsgrad fast bei Volllast und gemäß Motorhersteller mit  $\eta_{Motor} = 95,8$  angegeben (Tabelle 1). Für eine nicht drehzahlgeregelte Steuerung, die den Ventilator mit Nominaldrehzahl betreibt (hier  $1.000 \text{ min}^{-1}$ ), ergibt sich gemäß Formel (1) eine notwendige Wellenleistung für den Betriebspunkt auf Schaufelstellung 4 ( $19^\circ$ ) von  $524 \text{ kW}$ . Die zugeführte Leistung beträgt, gemäß Formel (2),  $642 \text{ kW}$ . Selbst im Vergleich mit einer frequenzgeregelten Steuerung, die den Lüfter auf Nominaldrehzahl betreibt, also eigentlich höhere Verluste in der Schaltanlage aufweist als mit Direktsteuerung, wird aufgrund der Phasenkompensation der  $\cos \varphi$  auf etwa  $0,98$  angehoben. Die zugeführte Leistung sinkt auf etwa  $581 \text{ kW}$ .

Der Vorteil einer Drehzahlregelung wird erst mit der Betrachtung von Teilbetriebspunkten, wie z.B. einer Nacht- oder Wartungsschicht, richtig ersichtlich. Im Beispiel wird ein weiterer Betriebspunkt mit einem Volumenstrom von  $121 \text{ m}^3/\text{s}$  betrachtet. Für

Load / Last	50%	75%	100%
$\eta_{Motor}$	92.9	95.8	95.8
$\cos(\varphi)$	0.73	0.82	0.86

Table 1. Motor data. // Tabelle 1. Motordaten.

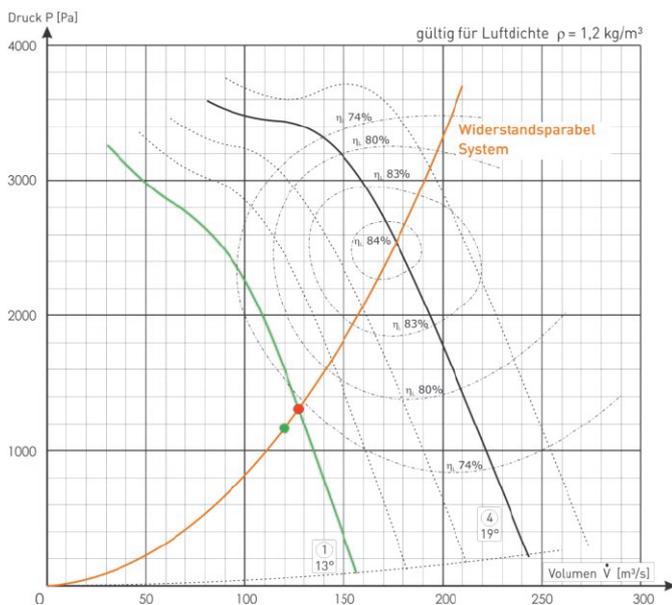


Fig. 3. Example illustration of the real duty point using just blade adjustment.  
Bild 3. Beispielhafte Darstellung des realen Betriebspunkts bei reiner Schaufelverstellung.

For a 560 kW motor running at nearly full load the motor efficiency according to the manufacturer is specified at  $\eta_{\text{Motor}} = 95,8$  (Table 1). For a non speed-controlled system, which operates the fan at the nominal speed (in this case  $1,000 \text{ min}^{-1}$ ), the required shaft output for a workplace with a blade setting of 4 ( $19^\circ$ ), according to formula (1), is 524 kW. The supplied power input, according to formula (2), is 642 kW. Even when compared with a frequency-inverter control system that runs the fan at its nominal speed, in other words one that actually has higher switchgear losses than a direct control system, the value of  $\cos \varphi$  is increased to about 0.98 because of phase compensation. The power input falls to about 581 kW.

The advantage of speed regulation only becomes really evident when examining partially-active workplaces, such as those operating a night-shift or maintenance-shift routines. The example given also looks at another working point where the volume flow rate is  $121 \text{ m}^3/\text{s}$ . When the direct control system is used the operator only has the option of adjusting the rotor blades to setting 1 ( $13^\circ$ ). The actual duty point lies at the intersection between the resistance parabola and the performance curve (Figure 3). Because of the less favourable (in airflow terms) blade angle the fan is still only operating at an efficiency rate of less than 74%. The required shaft output is 235 kW. In addition, the motor is being run in the partial load range with the result that in this case the motor efficiency and the  $\cos \varphi$  value are changing in accordance with Table 1. For the direct control system the supplied power is therefore 350 kW.

With the control also set to blade position 4 ( $19^\circ$ ) the required duty point can be approached directly at a frequency of 34.3 Hz or a speed of  $688 \text{ min}^{-1}$ . The fan characteristic curve moves as shown in Figure 4.

Applying the same flow angle at the blade makes for little change in the efficiency rate, with the result that a marked differ-

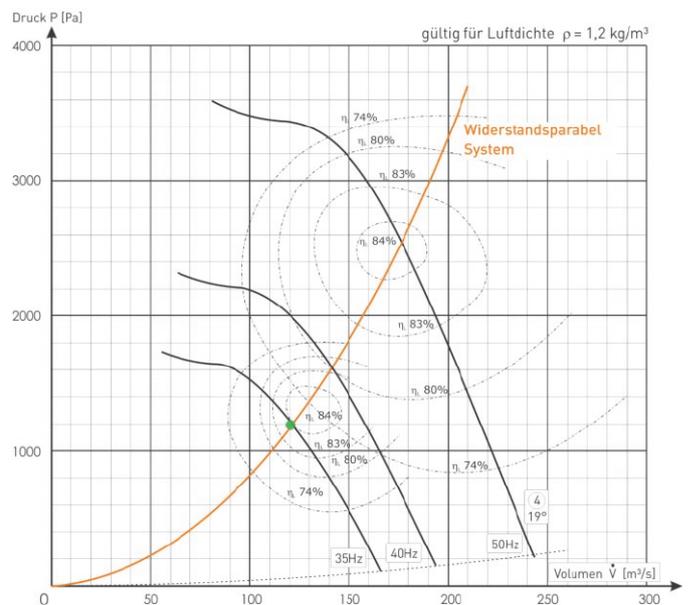


Fig. 4. Shift in the characteristic curve as a result of a change in frequency.  
Bild 4. Verschiebung der Kennlinie durch Veränderung der Frequenz.

die Direktsteuerung bleibt dem Anwender nur die Möglichkeit, die Laufschaufel auf die Stellung 1 ( $13^\circ$ ) einzustellen. Der wirkliche Betriebspunkt liegt im Schnittpunkt der Widerstandsparabel und der Kennlinie (Bild 3). Durch den strömungstechnisch ungünstigeren Schaufelwinkel weist der Ventilator nur noch einen Wirkungsgrad von unter 74% auf. Die notwendige Wellenleistung beträgt 235 kW. Zusätzlich wird der Motor im Teillastbereich gefahren, so dass sich hier Motorwirkungsgrad und  $\cos \varphi$  gemäß Tabelle 1 verändern. Für Direktsteuerung beträgt die zugeführte Leistung somit 350 kW.

Mit der Frequenz von 34,3 Hz oder einer Drehzahl von  $688 \text{ min}^{-1}$  kann der gewünschte Betriebspunkt mit der Regelung auch in Schaufelstellung 4 ( $19^\circ$ ) direkt angefahren werden. Die Lüfterkennlinie verschiebt sich wie in Bild 4 dargestellt.

Durch den gleichen Strömungswinkel der Schaufel verändert sich der Wirkungsgrad nur wenig, sodass bereits an der notwendigen Wellenleistung von 174 kW ein deutlicher Unterschied erkennbar ist. Natürlich wird der Motor weit unter seinem Volllastbereich gefordert, trotzdem ist mit Flügelwirkungsgrad und verbessertem Wirkfaktor eine zugeführte Leistung von nur 208 kW notwendig. In der Tabelle 2 sind alle berechneten Daten für das Beispiel zusammengefasst.

Um dieses Beispiel auch kostentechnisch zu betrachten, wird angenommen, dass der Teillastbetrieb zu 30% im Jahr erfolgt, in der restlichen Zeit auf Volllast. Nach Beispielrechnung (Tabelle 3) ergibt sich ein Jahresdelta von 59.450 €, rein an Energiekosten. Demgegenüber stehen die höheren Investitions- und Wartungskosten einer Drehzahlregelung. Allerdings ist die notwendige Schaufelverstellung für den Direktbetrieb ebenso mit hohen Kosten verbunden, sollte diese elektrohydraulisch im laufenden Zustand verstellbar sein. Diese Kosten müssen in Abhängigkeit von Baugröße und Leistung des Lüfters gegeneinander verglichen werden.

ence is noticeable even at the required shaft output of 174 kW. Naturally the demand on the motor is well below its full-load range, but nevertheless a power input of just 208 kW is needed given the blade efficiency and the improved effect factor. All the calculated data for the example given have been compiled in Table 2.

In order to examine this particular scenario from a cost viewpoint it is assumed that the partial-load regime constitutes 30% of the annual total, with the remainder representing full-load operations. This specimen calculation (Table 3) produces an annual delta of 59,450 €, made up entirely of energy costs. This compares with the higher investment and maintenance costs of a speed-regulated system. Admittedly, the blade adjustment facility required for the direct control system is also an expensive arrangement if this deployment is to be performed electrohydraulically while the system is in operation. These costs have to be compared one against the other as a function of the size and power output of the fan installation.

The investment costs of speed regulation in terms of the medium- to long-term operational requirements can be compared in this way and the findings will make a significant contribution to the decision-making process.

A wide-ranging, needs-based management system is not only dependent on having the optimal, energy-efficient fan control technology but also requires knowledge of the type and location of the mobile machines in operation. In this respect it is particu-

Die Investitionskosten einer Drehzahlregelung zu den mittel- bis langfristigen betrieblichen Erfordernissen lassen sich so gegenüberstellen und tragen maßgeblich zur Entscheidungsfindung bei.

Für eine umfangreiche bedarfsgerechte Steuerung ist neben der Betrachtung der optimalen und energieeffizienten Regelung des Lüfters auch die Kenntnis über Art und Einsatzort von mobilen Maschinen ausschlaggebend. Zielführend ist hierbei der Einsatz eines verlässlichen Ortungs- und Informationssystems für die eingesetzten Maschinen. Diese Erfassung ist entscheidend für die Ermittlung eines Mindestvolumenstroms in den jeweiligen Wetterabteilungen. Bei einer Bedarfsänderung können die Betriebszustände der Lüfter, aber auch die Einstellungen von Wettertüren oder -drosseln, geregelt werden. Letzteres sollte vermieden werden, da dies den Wetterwiderstand direkt verändert, während eine Regelung der Lüfter energetisch sinnvoller ist. Die Steuerung der Bewetterung kann sowohl manuell als auch zeit- und ereignisbezogen umgesetzt werden (1, 2, 4).

Neben den Erfassungs- und Regelungssystemen ist die messtechnische Überwachung der einzustellenden Parameter ein weiterer elementarer Bestandteil einer bedarfsgerechten Bewetterung. Diese Überwachung beinhaltet eine kontinuierliche Messung des Volumenstroms und der Schadstoffkonzentrationen sowie ggf. Temperatur und Feuchte in den einzelnen Wetterabteilungen.

Optimum duty point – full load		
	Direct control	Speed-regulated control
volume [m <sup>3</sup> /s]	176	176
pressure [Pa]	2,530	2,530
blade setting no.	4 (19°)	4 (19°)
fan efficiency $\eta_f$ [%]	85	85
<b>required shaft output <math>N_{\text{shaft}}</math> [kW]</b>	<b>524</b>	<b>524</b>
control system efficiency $\eta_{\text{CS}}$ [%]	99	96
motor efficiency $\eta_M$ [%]	95,8	95,8
power factor $\cos(\varphi)$	0,86	0,98
<b>power input <math>N_{\text{in}}</math> [kW]</b>	<b>642</b>	<b>581</b>
Partial operation		
	Direct control	Speed-regulated control
nominal volume [m <sup>3</sup> /s]	121	121
nominal pressure [Pa]	1.200	1.200
actual volume [m <sup>3</sup> /s]	127	121
actual pressure [Pa]	1,350	1,200
blade setting no.	1 (13°)	4 (19°)
fan efficiency $\eta_f$ [%]	73	83
<b>required shaft output <math>N_{\text{shaft}}</math> [kW]</b>	<b>235</b>	<b>174</b>
control system efficiency $\eta_{\text{CS}}$ [%]	99	96
motor efficiency $\eta_M$ [%]	92,9	89
power factor $\cos(\varphi)$	0,73	0,98
<b>power input <math>N_{\text{in}}</math> [kW]</b>	<b>350</b>	<b>208</b>

Table 2. Overview of calculated data.

Betriebspunkt Optimum – Volllast		
	Direkte Steuerung	Drehzahlgeregelter Steuerung
Volumen [m <sup>3</sup> /s]	176	176
Druck [Pa]	2.530	2.530
Schaufelstellung Nr.	4 (19°)	4 (19°)
Wirkungsgrad Lüfter $\eta_L$ [%]	85	85
<b>Notwendige Wellenleistung <math>N_{\text{Welle}}</math> [kW]</b>	<b>524</b>	<b>524</b>
Wirkungsgrad Steuerung $\eta_{\text{St}}$ [%]	99	96
Wirkungsgrad Motor $\eta_M$ [%]	95,8	95,8
Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	0,86	0,98
<b>zugeführte Leistung <math>N_{\text{zu}}</math> [kW]</b>	<b>642</b>	<b>581</b>
Teilbetrieb		
	Direkte Steuerung	Drehzahlgeregelter Steuerung
Soll-Volumen [m <sup>3</sup> /s]	121	121
Soll-Druck [Pa]	1.200	1.200
Ist-Volumen [m <sup>3</sup> /s]	127	121
Ist-Druck [Pa]	1,350	1,200
Schaufelstellung Nr.	1 (13°)	4 (19°)
Wirkungsgrad Lüfter $\eta_L$ [%]	73	83
<b>Notwendige Wellenleistung <math>N_{\text{Welle}}</math> [kW]</b>	<b>235</b>	<b>174</b>
Wirkungsgrad Steuerung $\eta_{\text{St}}$ [%]	99	96
Wirkungsgrad Motor $\eta_M$ [%]	92,9	89
Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	0,73	0,98
<b>zugeführte Leistung <math>N_{\text{zu}}</math> [kW]</b>	<b>350</b>	<b>208</b>

Tabelle 2. Zusammenfassung der berechneten Daten.

Energy expenditure/cost with direct control/blade adjustment		
for ~365 days at 24h	operating period	energy expenditure
70 % full load	~6,130 h at 642 kW	3,935,460 kWh
30 % partial load	~2,600 h at 350 kW	910,000 kWh
	Total	4,845,460 kWh
energy costs	at 8 ct/kWh	387,640 €
Energy expenditure/cost of speed control		
for ~365 days at 24h	operating period	energy expenditure
70 % full load	~6,130 h at 581 kW	3,561,530 kWh
30 % partial load	~2,600 h at 208 kW	540,800 kWh
	Total	4,102,330 kWh
energy costs	at 8 ct/kWh	328,190 €

Table 3. Cost comparison between blade adjustment and speed control.

Energieaufwand / Kosten mit direkter Steuerung / Schaufelverstellung		
Für ~365 Tage à 24h	Betriebsdauer	Energieaufwand
70 % Volllastbetrieb	~6.130 h à 642 kW	3.935.460 kWh
30 % Teilbetrieb	~2.600 h à 350 kW	910.000 kWh
	Summe	4.845.460 kWh
Energiekosten	Bei 8 ct/kWh	387.640 €
Energieaufwand / Kosten der Drehzahlregelung		
Für ~365 Tage à 24h	Betriebsdauer	Energieaufwand
70 % Volllastbetrieb	~6.130 h à 581 kW	3.561.530 kWh
30 % Teilbetrieb	~2.600 h à 208 kW	540.800 kWh
	Summe	4.102.330 kWh
Energiekosten	Bei 8 ct/kWh	328.190 €

Tabelle 3. Kostenvergleich Schaufelverstellung vs. Drehzahlregelung.

larly useful to have a reliable tracking and information system for the mining machines as data of this kind will play a crucial role in determining the minimum volume of air required in the different ventilating districts. In the event of a change in demand the operating status of the fans can be altered if necessary, as can the settings of the air doors and regulators. This latter action should in fact be avoided if possible, as such a measure will have a direct impact on the air resistance, whereas it is more logical from an energy viewpoint to practise fan control. Controlling the ventilation system can be a manual operation or may be time- and event-driven (1, 2, 4).

In addition to tracking and control technology, measurement-based monitoring of the setting parameters is another elementary part of any needs-based ventilation system. Such a monitoring set-up will provide continuous measurement of the volume flow and pollutant concentration levels and may also record temperature and humidity levels in individual ventilating districts.

Air circuit modelling and dynamic real-time calculation of the volume-flow requirements can be undertaken using modelling and simulation software. Using a communication or management infrastructure operating via network connections it is possible to collect the information from the individual system components in real time, or as close as possible to it, as well as to perform control actions on the relevant components and determine the benefits of the measures in question. All the analysed data are also stored so that they remain available for subsequent investigations (1, 2, 4, 7, 8).

### 3 Existing VOD systems

The controlled ventilation systems that have already been developed, and which operate on the principles described above, yield a potential saving of between 30 and 50 % of the energy cost of the ventilation process (9, 10). However, various ancillary conditions need to be taken into account here, such as the type of mineral winning method being used and the previous fan dispositions under normal operations. To date, ventilation systems of this kind have usually been employed simply to reduce energy costs and improve productivity levels, not to vent toxic gases. The latter benefit is generally cited merely as a positive side effect. Tried and tested controlled ventilation (VOD) systems have already been set up in several countries, including

Die Wetternetzmodellierung und dynamische Echtzeitberechnung des Volumenstrombedarfs ist mithilfe einer Modellierungs- und Simulationssoftware durchführbar. Mithilfe einer Kommunikations- bzw. Managementinfrastruktur über Netzwerkverbindungen ist es möglich, die Informationen der einzelnen Systemkomponenten echtzeitlich bzw. echtzeitnah zu sammeln, Regelungen der entsprechenden Komponenten vorzunehmen und den Nutzen der Regelung zu bestimmen. Außerdem findet eine Speicherung aller analysierten Daten statt, sodass sie für spätere Untersuchungen zur Verfügung stehen (1, 2, 4, 7, 8).

### 3 Bestehende Systeme zur bedarfsgerechten Bewetterung

Bereits entwickelte, bedarfsgerechte Bewetterungssysteme, die nach dem zuvor beschriebenen Ansatz arbeiten, geben ein Einsparpotential von ca. 30 bis 50 % der Energiekosten für die Bewetterung an (9, 10). Dabei sind jedoch die jeweils verschiedenen Randbedingungen, wie z.B. das Abbauverfahren und die bisherigen Lüftereinstellungen im Regelbetrieb, zu beachten. Die Gründe für den Einsatz solcher Bewetterungssysteme sind bisher nur die Reduzierung von Energiekosten und die Steigerung der Produktivität, nicht aber die Reduzierung der Schadstoffkonzentrationen. Diese wird meist nur als positiver Nebeneffekt aufgeführt. Bereits erprobte Systeme für bedarfsgerechte Bewetterung existieren u.a. in

- Kanada (ein Patent, zwei Software-Anbieter, ca. zehn Anwendungen in Bergwerken) und
- Skandinavien (zwei Software-Anbieter, min. zwei Anwendungen in Bergwerken).

Die Anwendung und Erprobung solcher Systeme fand bei unterschiedlichen Bergbaubetreibern mit Ausrüstungen verschiedener Hersteller, jedoch ausschließlich in Bergwerken mit Mehrsohlenabbau oder Strebbau als Abbauverfahren statt. Verschiedene konkrete Einsatzfälle von bedarfsgerechter Bewetterung werden im folgenden Kapitel 4 näher beschrieben.

Neben diesen bedarfsgerechten Hauptbewetterungssystemen entwickelte die Firma Korfmann Lufttechnik GmbH, Witten, im Jahr 2017 eine intelligente Regelung zur bedarfsgerechten Bewetterung von einzelnen luttengebundenen Vortrieben. Diese Weiterentwicklung reguliert nicht nur den Lüfter nach vorab ein-

- Canada (one patent, two software providers and about ten installations at various mines) and
- Scandinavia (two software providers and at least two underground installations).

Such systems have been set up and tested by a number of mine operators using equipment supplied by various manufacturers. However, these installations have only been introduced at mines where the mineral is being extracted using multi-horizon mining or longwall face working. Chapter 4 of this paper describes in some detail a number of actual examples of (VOD) in operation.

In 2017 Korfmann Lufttechnik GmbH, Witten/Germany, which produces VOD equipment, developed an intelligent control system for the needs-based ventilation of individual air duct-supported drivages. This new system not only regulates the fan in accordance with pre-set requirements, and on the basis of measurements taken at the roadhead and/or at the fan, but also checks the existing readings against a calculated optimum value. A unique feature of this installation is that it also performs an energy-efficiency assessment of the layout of the air duct system along with real-time monitoring aimed at identifying potential damage within the air ducting itself (11).

## 4 VOD systems in operation

### 4.1 Malmberget

The Swedish iron-ore mine of Malmberget, which is owned by the LKAB company, currently operates an optimised underground ventilation system. The district fans are now controlled using signals from CO sensors as well as transducers mounted on the mobile machines. If the CO value rises above the continuously pre-measured concentration level the fan units, which are fitted with frequency inverters, are automatically powered up.

When vehicles pass by a registration point the machines send their specific data via a radio and telephone network to a central computer system, whereupon the mine ventilation regime is re-adjusted accordingly one or two minutes later. As well as keeping the concentration of noxious substances at as low a level as possible, this system – which has an estimated pay-back period of around 1.5 years – also results in a 29% reduction in energy consumption compared with the previous arrangement in which the fans were operated day and night at their highest setting (9).

### 4.2 Kristineberg Mine

At the end of the 1980s the Swedish ore mine of Kristineberg, which is owned by Boliden Mineral AB, set up a computer system that could switch on the main ventilation system just before production commenced, and then switch it off again at the end of the working period. During each shift the mine foreman had the option of re-setting the fans for each individual working face according to the production plan. It was found, however, that the overman did not have the time to make trips to the control room and so this aspect of the ventilation system remained an unused function.

At the beginning of the 1990s a fully automatic 'ventilation on demand' system was installed at another Swedish ore mine operated by Boliden Mineral AB. In this case a fleet of mine trucks was required to work in an extraction chamber with auxiliary

gestellten Anforderungen und mittels Messungen vor Ort bzw. am Lüfter, sondern überprüft darüber hinaus die vorhandenen Messwerte mit einem rechnerisch ermittelten Optimum. Einzigartig bei diesem System ist die zusätzliche Bewertung des Luttensystems hinsichtlich seiner energieeffizienten Verlegung und das echtzeitfähige Monitoring von möglichen Beschädigungen innerhalb des Luttensstrangs (11).

## 4 Einsatz bedarfsgerechter Bewetterungssysteme

### 4.1 Malmberget

Im schwedischen Eisenerzbergwerk Malmberget der Firma LKAB wurde eine Optimierung der Bewetterung vorgenommen. Die Abteilungslüfter werden nun sowohl anhand von Signalen von CO-Sensoren als auch anhand von Signalgebern auf den mobilen Maschinen gesteuert. Wenn der CO-Wert das zuvor kontinuierlich gemessene Konzentrationsniveau übersteigt, werden die mit Frequenzumrichter ausgestatteten Lüfter automatisch hochgefahren.

Passiert ein Fahrzeug eine Registrierstelle, senden die Maschinen ihre spezifischen Daten via Funk- und Telefonnetz an ein zentrales Computersystem, woraufhin ein bis zwei Minuten später die Bewetterung genau dementsprechend eingestellt wird. Neben dem Ziel, die Schadstoffbelastung so gering wie möglich zu halten, bewirkten die Maßnahmen bei einer Amortisierungszeit von ca. 1,5 Jahren auch eine 29%ige Reduzierung des Energieverbrauchs im Vergleich zur vorherigen Betriebsweise, in der die Lüfter rund um die Uhr in Maximaleinstellung betrieben worden waren (9).

### 4.2 Kristineberg Mine

Ende der 1980er Jahre wurde im schwedischen Erzbergwerk Kristineberg der Firma Boliden Mineral AB ein Computersystem betrieben, über das die Hauptgrubenbewetterung vor Produktionsbeginn eingeschaltet und danach wieder ausgeschaltet wurde. Während der Schicht bestand für den Steiger die Möglichkeit, die Lüfter der einzelnen Arbeitsorte entsprechend dem Produktionsplan einzustellen. Es zeigte sich, dass der Steiger keine Zeit hatte, den Kontrollraum zu befahren und somit blieb diese Funktion des Bewetterungssystems ungenutzt.

Anfang der 1990er Jahre wurde in einem anderen Erzbergwerk der Boliden Mineral AB in Schweden ein voll automatisches bedarfsgerechtes Bewetterungssystem installiert. Ladetransportfahrzeuge arbeiteten in einem sonderbewetterten Ort. Zu Schichtbeginn wurden alle Ortslüfter mit 50% der maximalen Drehzahl betrieben und der Hauptgrubenlüfter entsprechend des benötigten Gesamtvolumenstroms eingestellt. Beginnt ein Ladetransportfahrzeug an einem Abbauort seine Arbeit, wird über Sender und Empfänger ein Signal weitergeleitet, was dazu führt, dass der Lüfter auf voller Leistung eingestellt wird. Da sich dadurch der Gesamtvolumenstrom erhöht, wird auch der Hauptgrubenlüfter entsprechend in den Einstellungen verändert.

Aufgrund der Erschließung neuer Erzvorkommen in größerer Teufe und größerer Entfernung vom bisherigen untertägigen Abbaugebiet wurde Ende der 1990er Jahre in der Kristineberg Mine ein automatisiertes, bedarfsgerechtes Bewetterungssystem eingerichtet. Auch in diesem Bergwerk werden die Abbauorte über Lüfter und Lutten jeweils einzeln sonderbewettert und das Lade-

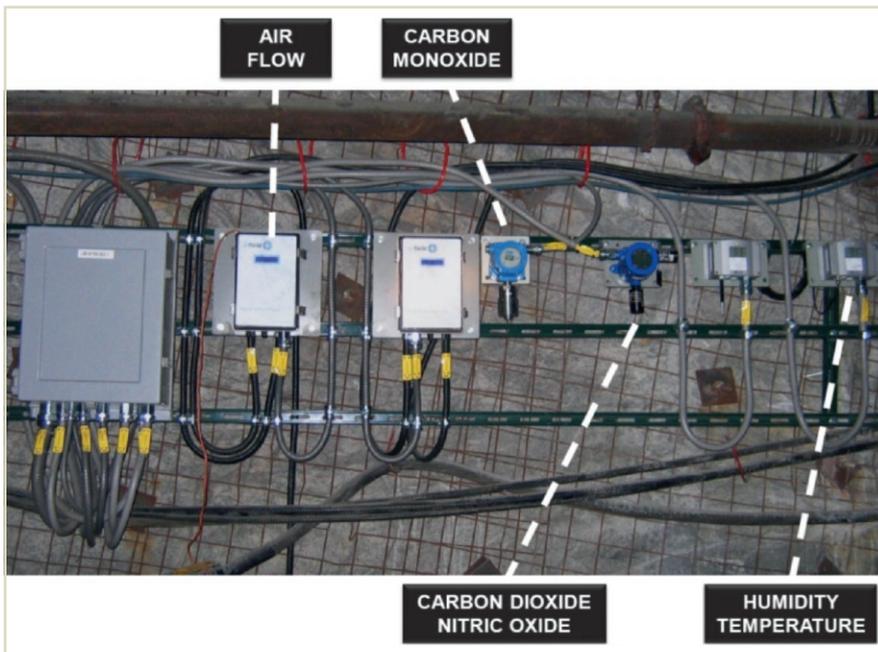


Fig. 5. Sensor array (14).  
Bild 5. Installierte Sensoren (14).

ventilation. At the beginning of the shift all the area fans are operated at 50% of their maximum speed and the main mine fan is set according to the total air flow requirement. When an ore truck begins work at an extraction point a signal is relayed via a transmitter-receiver system that sets the fan to run at full output. As this increases the total volume flow, the main fan for the mine has its setting altered accordingly.

At the end of the 1990s, following the development of new ore deposits at a deeper working level and at a greater distance from the previous extraction districts, an automatic, needs-based ventilation system was installed at Kristineberg Mine. Here too the individual working chambers are provided with auxiliary ventilation systems with fans and air ducting and each ore truck sends out a signal when it enters a working zone. This switches on the fan, which is then regulated in accordance with the vehicle's needs. When there is no further signal forthcoming, as is the case when the vehicle leaves the working chamber, the system proceeds to switch the fan off again after a period of 15 minutes. The ventilation requirement is calculated as a product of 207 m<sup>3</sup>/h of air, the diesel motor output, a usage factor and a safety factor. The safety factor is 1.5 and the usage factor is 0.3 for a loader vehicle that both loads and transports the material, 0.4 for a vehicle that loads a dumper truck and 0.15 for a dump truck in roadway haulages.

The ventilation system also incorporates a dispersal mode for shotfiring fumes. During firing all the fans are switched off and the air doors are opened. When blasting has finished the air doors are closed by the VOD system and the fans are run at full output. After one hour, or as decreed by the shift foreman, the VOD system is returned to 'normal mode'.

Another operating mode can be deployed in the event of an underground fire. In such a case the ventilation system is used to switch off the fans and close all the air doors so as to prevent any propagation of the smoke. When the area has been evacuated of its workforce the officer in charge can bring selected fans back into operation (12).

transportfahrzeug sendet ein Signal, wenn es ein Abbauort befährt. Daraufhin wird der Lüfter eingeschaltet und entsprechend dem Bedarf des Fahrzeugs geregelt. Wenn kein weiteres Signal folgt, was der Fall ist, wenn das Fahrzeug das Abbauort verlässt, schaltet das System den Lüfter nach 15 min wieder ab. Der Bedarf wird aus einem Produkt von 207 m<sup>3</sup>/h, der Dieselmotorleistung, einem Nutzungsfaktor und einem Sicherheitsfaktor errechnet. Der Sicherheitsfaktor beträgt 1,5 und der Nutzungsfaktor entspricht 0,3 für ein Ladetransportfahrzeug, welches lädt und fördert, 0,4 für ein Ladetransportfahrzeug, das einen Muldenkipper belädt, und 0,15 für einen Muldenkipper bei der Streckenförderung.

Im installierten Bewetterungssystem ist auch ein Auswetterungsmodus für Sprengschwaden integriert. Während der Sprengung sind alle Lüfter ausgeschaltet und die Wettertüren geöffnet. Nach der Sprengung werden die Wettertüren durch das bedarfsgerechte Bewetterungssystem geschlossen und die Lüfter bei voller Leistung betrieben. Nach einer Stunde oder durch den Schichtsteiger wird das bedarfsgerechte Bewetterungssystem wieder in den „Normalmodus“ zurückgesetzt.

Ein weiterer Modus ist anwendbar, wenn ein Feuer in der Grube ausbricht. In diesem Fall können mit Hilfe des Bewetterungssystems die Lüfter ausgeschaltet und alle Wettertüren geschlossen werden, um ein Ausbreiten der Rauchschwaden zu verhindern. Nach der Evakuierung der Belegschaft kann der Einsatzleiter einzelne Lüfter gezielt wieder in Betrieb nehmen (12).

### 4.3 Coleman Mine

Bevor in der Coleman Mine in Kanada ein bedarfsgerechtes Bewetterungssystem installiert wurde, stand die Bewetterung der Aus- und Vorrückung eines neuen Nickelerzkörpers im Fokus der Betrachtungen (13). Als wettertechnische Elemente sind in diesem Fall Lüfter im Frischwetterweg und Drosselklappen im Abwetterweg installiert. Zusätzlich wurden Sensoren zur Messung des Volumenstroms, des CO-, CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Gehalts sowie der Temperatur eingerichtet (Bild 5), um das Zusammenspiel von Lüftern und Drosseln sowie deren Einfluss auf die Eigen-

### 4.3 Coleman Mine

Before Coleman Mine in Canada took the decision to install a VOD system the focus was on setting up a ventilation circuit for the development drivages for a new nickel ore body (13). The ventilation elements in this case comprise fans in the intake airway and restrictor flaps in the return airway. Sensors were also installed to measure the volume flow, the CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> content and the temperature level (Figure 5), the aim here being to examine the interaction between the fans and the restrictors and their influence on the mine air characteristics. This system was at first only controlled by the ventilation engineer. In the next stage of the development process the control system was automated using data obtained from both human and mechanised sources.

The VOD system was set up as a pilot project and installed on five horizons close to the ore body. When the system has been successfully tested, according to mine operators Vale, it will also be extended to other production districts (as at 2011). An identical set-up is to be installed at a mine operated by Goldcorp Inc. in Timmins (Ontario) and at Fraser Mine, also in Canada, which is owned by Xstrata Nickel (10, 15, 16).

### 4.4 Creighton Mine

The availability of frequency control for the intermediate fans means that in this case the volumetric air flow can be varied in line with ventilation demand. At Creighton Mine, which is currently the deepest nickel mine in Canada (>3000 m), this technology is crucial when it comes to finding a practical solution for setting up a needs-based ventilation system (17).

A time-of-day-based control system has already been installed and other possibilities exist for further optimisation, such as control based on actual operating time at the face.

Criteria for four air-flow settings (Table 4) could then be worked out after having identified the time components required for the individual operations that made up the overall working cycle, i.e. material loading and transport, drilling, introducing the explosive charge and rockbolting (Table 4).

These criteria show that at Creighton Mine the deployment of mobile machines is also an important factor. A further system is needed to identify personnel and vehicles for the aforementioned volume flow settings and to transmit the specific data in question (motor output, volume air flow required). Efforts are under way to arrange training sessions for this system so as to

Flow setting	Criteria
100%	→ when deploying loader or up to 4 other vehicles → at CO >25 ppm → at temperature >32 °C
60%	→ when no loader present but 3 other vehicles → CO <25 ppm → at temperature <32 °C
40%	→ when no loader present but 2 other vehicles → CO <25 ppm → at temperature <32 °C
0%	→ no vehicles present for the previous 15 minutes → CO <25 ppm → at temperature <32 °C

Table 4. Criteria used for volume air flow settings (17).

schaften der Wetter zu untersuchen. Eine Regelung dieses Systems wurde zunächst nur vom Wettersteiger vorgenommen. Im nächsten Schritt der Entwicklung folgte die Automatisierung der Steuerung basierend auf der Erfassung von Maschinen und Personen.

Als Pilotprojekt wurde das bedarfsgerechte Bewetterungssystem auf fünf Sohlen im Bereich eines Erzkörpers installiert. Nach dem Erproben dieses Systems soll es laut der Betreiberfirma Vale auch auf andere Abbaubereiche ausgeweitet werden (Stand 2011). Auf gleiche Art und Weise soll es in einem Bergwerk der Goldcorp Inc. in Timmins (Ontario/Kanada) und der kanadischen Fraser Mine der Firma Xstrata Nickel eingerichtet werden (10, 15, 16).

### 4.4 Creighton Mine

Die Verfügbarkeit von Frequenzsteuerungen an den Zwischenlüftern ermöglicht es in diesem Fall, den Volumenstrom je nach Bedarf zu variieren. Am Beispiel der Creighton Mine, das derzeit tiefste Nickelbergwerk Kanadas (>3000 m), ist dies eine entscheidende Voraussetzung für das Herausfinden der praktischen Methodik und die Anwendung eines bedarfsgerechten Bewetterungssystems (17).

Eine tageszeitbezogene Steuerung wurde bereits eingerichtet. Darüber hinaus bestanden weitere Möglichkeiten zur Optimierung, wie z.B. eine Steuerung nach tatsächlicher Einsatzzeit vor Ort.

Nach dem Identifizieren der Anteile von Lade- und Förderarbeit sowie Bohrarbeit, Laden des Sprengstoffs und Ankerarbeit an der Gesamtarbeitszeit konnten Kriterien für vier Volumenstromereinstellungen (Tabelle 4) herausgearbeitet werden.

Diese Kriterien zeigen, dass in der Creighton Mine auch der Einsatz von mobilen Maschinen von Bedeutung ist. Ein weiteres System muss für die genannten Volumenstromereinstellungen Fahrzeuge und Personen identifizieren und deren spezifische Daten (Motorleistung, benötigter Volumenstrom) übermitteln. Die Durchführung von Schulungen für dieses System wird angestrebt, um dem Bedienpersonal (Grubenwart, Wettersteiger/-abteilung, Elektriker, Mechaniker, IT-Abteilung) die nötigen Kenntnisse zum Umgang mit dem eingerichteten System zu vermitteln (17).

Eine Vorstellung, wie die Kontrolle von Maschinen und Lüftern auf der Benutzeroberfläche einer entsprechenden Software visualisiert wird, vermittelt Bild 6.

Volumenstrom-einstellung	Kriterien
100%	→ bei Einsatz eines Laders oder bis zu 4 sonstigen Fahrzeugen → bei CO >25 ppm → bei Temperatur >32 °C
60%	→ bei keinem Lader aber 3 sonstigen Fahrzeugen → CO <25 ppm → bei Temperatur <32 °C
40%	→ bei keinem Lader aber 2 sonstigen Fahrzeugen → CO <25 ppm → bei Temperatur <32 °C
0%	→ keine Fahrzeuge in den letzten 15 Minuten → CO <25 ppm → bei Temperatur <32 °C

Tabelle 4. Kriterien für Volumenstromereinstellungen (17).

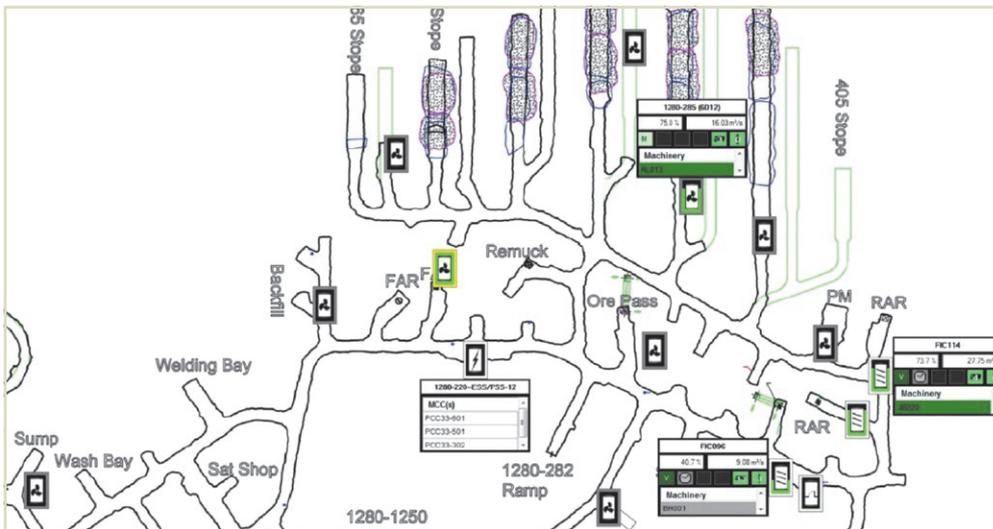


Fig. 6. Extract from details of the user interface of a ventilation-on-demand program (18).  
Bild 6. Ausschnitt aus einer Darstellung der Benutzeroberfläche eines bedarfsgerechten Bewetterungsprogramms (18).

provide operational personnel (control room staff, ventilation engineers and ventilation department staff, electricians, mechanical engineers, IT staff) with the knowledge needed to work with the new set-up (17).

Figure 6 gives some idea of how such a machine and fan control layout would appear on the user interface of an appropriate software system.

### 5 Appraisal of the most extensively tested systems

As described in the paragraphs above, both Vale and Xstrata Nickel each have a mine in the Sudbury area that is fitted with a VOD system.

Between 2009 and 2012 an investigation was carried out by the Canadian Centre for Excellence in Mining Innovation (CEMI) in conjunction with the aforementioned mine operating companies and the respective software providers and machine manufacturers with a view to identifying the best implementation of VOD in underground mines specifically in terms of the Canadian systems. The resulting assessment was presented for the first time in May 2013. The introduction of VOD has meant that an additional sub-level can now be operated as a result of the reduction in the total volumetric air flow requirement of the existing working faces. The overhead costs can also be reduced by between 8 and 20% and, furthermore, possibilities were identified for new mine planning improvements.

This exercise also produced ten essential elements for an effective VOD system:

1. communication system installed throughout the mine;
2. frequency inverters fitted to every fan unit;
3. variably adjustable regulator flaps;
4. system for regulating the mine climate (heating or cooling);
5. tracking system for stationary and mobile machines;
6. decentralised monitoring system for volume flow and gas concentrations;
7. working-time planning program;
8. central system for collecting, checking and modelling the data;
9. a decision on volume flow distribution; and
10. a communications centre for coordinating tasks and volume flows.

### 5 Auswertung der am ausführlichsten getesteten Systeme

Wie in den letzten beiden Abschnitten beschrieben, haben sowohl der Bergbaukonzern Vale als auch Xstrata Nickel je ein Bergwerk in der Region um Sudbury mit einem bedarfsgerechten Bewetterungssystem ausgerüstet.

Eine Untersuchung zur besten Umsetzung der bedarfsgerechten Bewetterung in untertägigen Bergwerken wurde vom kanadischen Center for Excellence in Mining Innovation (CEMI) in Zusammenarbeit mit den bereits genannten Bergbaubetreibern und den jeweiligen Softwareanbietern sowie Bergbaumaschinenherstellern in den Jahren 2009 bis 2012 speziell für die kanadischen Systeme durchgeführt. Im Mai 2013 wurde erstmals eine Auswertung dieser Untersuchungen vorgestellt. Der Einsatz bedarfsgerechter Bewetterung führte dazu, dass eine zusätzliche Teilsohle betrieben werden kann, da der Gesamtvolumenstrom für die bereits bestehenden Abbaubereiche verringert werden konnte. Außerdem kam es zu einer Reduzierung der Gemeinkosten um 8 bis 20%, und es wurde Potential erkannt, die zukünftige Bergwerksplanung zu verbessern.

Weiterhin konnten zehn Bestandteile für ein optimal arbeitendes bedarfsgerechtes Bewetterungssystem benannt werden:

1. Kommunikationssystem in der gesamten Grube,
2. Frequenzumrichter an allen Lüftern,
3. variabel einstellbare Drosselklappen,
4. System zur Regulierung des Grubenklimas (Heizen bzw. Kühlen),
5. Erfassungssystem für stationäre und mobile Maschinen,
6. dezentralisiertes Monitoringsystem für Volumenstrom und Gaskonzentrationen,
7. Arbeitszeitplanungsprogramm,
8. zentrales System zur Sammlung, Kontrolle und Modellierung von Daten,
9. Entscheidung über Volumenstromverteilung und
10. Kommunikationsstelle zur Koordination von Aufgaben und Volumenströmen.

Das CEMI entwickelte auf Grundlage der Erkenntnisse aus den praktischen Anwendungen im kanadischen Erzbergbau eine Übersicht (19), welche die Eigenschaften der Parameter für be-

Development stage/ Entwicklungsstufe	1	2	3	4
savings & benefits/ Einsparungen & Vorteile	Status quo 	energy/ Energie 	energy/ Energie  production/ Produktion 	energy/ Energie  production/ Produktion  mine planing/ Bergwerksplanung 
Monitoring	as prescribed/vorschriftsgemäß manual/manuell periodic/periodisch	fixed/stationär electric/elektrisch continuous/kontinuierlich	mobile/mobil electric/elektrisch reactive/reaktionsfähig	predictive/vorhersagend
Controls/ Regelung	static/ statisch	static scheduling/ statische Zeitplanung	dynamic scheduling/ dynamische Zeitplanung	dynamic/dynamisch
Technology/ Technik		frequency inverter/ Frequenzumrichter	tracking system for vehicles/ Erfassungssystem für Fahrzeuge	scenario & analysis/ Szenario & Analyse central executive unit / Zentrale Ausführungsstelle

Table 5. Overview of development stages for optimised mine ventilation (19).

Tabelle 5. Übersicht der Entwicklungsstufen bei der Optimierung der Bewetterung (19).

Using data collected from practical applications in the Canadian ore mining industry the CEMI produced a summary table (19) that presents the attributes of the parameters for VOD in four development stages (Table 5).

The parameters for development stages 2 to 3 were tested over a six-months assessment period during practical operations at the aforementioned Coleman and Creighton mines. These initial tests on the changes in volume flow were carried out during the period 2010 to 2013. The technical information gleaned from these investigations was as follows (19):

- The choice of ventilation elements will depend very much on the method of excavation.
- Fitting frequency inverters to the fans will yield an optimum level of efficiency.
- As is the case with CO<sub>2</sub>, CO and NO measurements, continuous temperature monitoring will provide useful information about the activities of mobile machines.
- When carrying out the measurements watch out for cross-interference. NO measurements appear to be the least affected by external factors. Temperature monitoring is less important in the case of machines of low motor output.
- Allowance must be made for delay times in transmitting the measured data and in detecting the toxic concentration levels (dead time). This applies to both gas measurements and temperature measurements. Measurements aimed at checking the named parameters must be taken as close as possible to the mobile machines in operation.
- Vehicles constitute the largest individual source of emissions when it comes to determining the minimum volume of air. This suggests a further need for alternative drive technologies.
- The data measurement intervals will determine how often and how quickly the checks need to be made on the toxic concentration levels and volume of traffic. The shorter the control intervals the greater will be the savings in ventilation operating costs. Measuring the data at 1-minute intervals was the

darfsgerechte Bewetterung in vier Entwicklungsstufen darstellt (Tabelle 5).

Die Parameter der Entwicklungsstufen 2 bis 3 wurden dabei über einen sechsmonatigen Untersuchungszeitraum in den beschriebenen Bergwerken Coleman Mine und Creighton Mine im praktischen Betrieb getestet. Diese ersten Versuche der Volumenstromänderung wurden in den Jahren 2010 bis 2013 durchgeführt. Fachliche Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen waren (19):

- Die Auswahl der Elemente der Grubenbewetterung ist sehr vom Abbauverfahren abhängig.
- Frequenzumrichter an den Lüftern erbringen einen optimalen Wirkungsgrad.
- Neben Messungen der Gase CO<sub>2</sub>, CO und NO liefert auch eine kontinuierliche Überwachung der Temperatur Hinweise auf die Aktivität von mobilen Maschinen.
- Bei der Messdurchführung ist auf Querempfindlichkeiten zu achten, Messungen von NO scheinen am wenigsten von äußeren Gegebenheiten beeinflusst zu werden. Die Temperaturüberwachung ist für gering motorisierte Maschinen weniger von Bedeutung.
- Verzögerungszeiten bei der Messwertübermittlung und bei der Detektion der Schadstoffkonzentrationen (Totzeit) sind zu beachten. Dies gilt sowohl für die Gas- als auch für die Temperaturmessung. Eine Messung zur Kontrolle der genannten Parameter muss so nah wie möglich an den aktiven mobilen Maschinen erfolgen.
- Fahrzeuge bilden die größte Einzelemissionsquelle, die den Mindestvolumenstrom bestimmt. Es wird weiterer Bedarf an alternativen Antriebsarten gesehen.
- Was, wie oft und wie schnell eine Kontrolle der Schadstoffkonzentrationen und des Fahrzeugaufkommens erfolgen muss, bestimmt das Intervall der Messwertaufnahme. Je kleiner das Kontrollintervall, desto mehr Betriebskosten der Bewetterung konnten eingespart werden. Die Messwertaufnahme im zeitlichen Abstand von 1 min wurde favorisiert, da hierbei durch die

preferred sampling rate since this would create a precisely timed record of the changing conditions and provide the basis on which an adequately rapid response could be made.

According to the CEMI (20), the next step – which would also enable practical testing of the parameters defined in development stage 4 – would involve a budget requirement of at least 1.2 m CAD over four years along with additional investment amounting to 8.4 m CAD (450 man-months) in order to implement the findings reached. Introducing development stage 4 will bring an estimated saving of around 1 m CAD/a in energy costs and is expected to improve production by between 2 and 5%/a. The CEMI also intends to carry out trials on changes to the volumetric air flow during the shift and to investigate the use of dynamic control systems. As well as fitting sensors to mobile machinery the CEMI's future test programme includes the preparation of an efficiency index for mine ventilation systems (energy consumption for ventilation/tonnage produced). (20, 21, 22).

## 6 Limitations to the VOD system

In conclusion it may be stated that recognised VOD systems have to date only been developed for mines in steep formations, as is the case in the sub-level stope workings with caving that operate in the Canadian nickel mines located around the town of Sudbury (16, 17, 18). As described in the previous section, for the CEMI too the type of ventilation elements selected will be determined by the kind of mineral extraction system being used.

While in the case of sub-level stoping and longwall face working the extraction units are served by individual roadways, and in the case of sub-level working especially many of the extraction chambers are provided with auxiliary ventilation, the system of ventilation employed in room and pillar working is characterised by the fact that the extraction units are located within a large number of parallel and intersecting roadways. In the case of room and pillar mining, therefore, auxiliary ventilation of the working zones is the exception rather than the rule. This is a key difference from the comprehensive system solutions for optimised mine ventilation that are described in the relevant literature, as these particular concepts are designed for workings with auxiliary ventilation. More complex operating conditions prevail in the case of ventilation circuits serving the extraction faces of room and pillar workings in level seams.

The following considerations tend to impose limits on the introduction of current VOD systems, particularly when these are to be used in conjunction with room and pillar working (23):

- The ability to adjust the main mine fan is only of limited significance when it comes to controlled ventilation systems as the downtimes and equivalent run-up times needed for such an installation are simply too great. Any reduction in the speed of the fan motor means that the corresponding decrease in volume air flow will affect every ventilating district in the mine. This method of volume flow control is therefore only feasible when the overall air requirement is relatively low.
- Within the actual ventilating districts any change in volume flow, contingent on the magnitude of the change and the length of the airways serving the room and pillar workings,

zeitlich genaue Erfassung von sich verändernden Bedingungen entsprechend schnell darauf reagiert werden kann.

Die nächsten Schritte, um auch die Einflussgrößen der Entwicklungsstufe 4 in der Praxis zu testen, erfordern laut CEMI (20) einen Budgetbedarf von mindestens 1,2 Mio. CAD über vier Jahre und weitere Investitionen zur Implementierung der bisherigen Erkenntnisse in Höhe von 8,4 Mio. CAD (450 Mann-Monate). Bei Betrieb der Entwicklungsstufe 4 wird eine Einsparung von 1 Mio. CAD/a bei den Energiekosten und eine Produktionssteigerung von 2 bis 5%/a abgeschätzt. Versuche, den Volumenstrom während der Schicht zu verändern und Untersuchungen mit dynamischen Regelungen sind vom CEMI beabsichtigt. Neben der Einführung von Sensoren auf den mobilen Maschinen ist u.a. auch die Erarbeitung eines Effizienzindex für Bewetterung (Energieverbrauch der Bewetterung/produzierte Tonnage) ein weiteres Ziel der zukünftigen Untersuchungen des CEMI (20, 21, 22).

## 6 Grenzen der bedarfsgerechten Bewetterung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bekannte Systeme für eine bedarfsgerechte Bewetterung bislang nur für Bergwerke der steilen Lagerung, wie z.B. für den Teilsohlenbau mit Versatz im kanadischen Nickelbergbau in der Region um Sudbury (16, 17, 18), entwickelt wurden. Wie im letzten Abschnitt beschrieben, ist auch für das CEMI die Auswahl der Elemente der Bewetterung vom Abbauverfahren abhängig.

Während bei Abbauverfahren, wie z.B. Teilsohlenbau oder Strebbaubau, einzelne Strecken zu den Abbauorten führen und vor allem im Teilsohlenbau viele Arbeitsorte sonderbewettert werden, ist die Bewetterung im Abbauverfahren Kammerbau dadurch gekennzeichnet, dass sich Abbauorte in einer Vielzahl von parallelen, miteinander durchschlägigen Strecken befinden. Die Sonderbewetterung von Arbeitsorten ist im Kammerbau eher die Ausnahme. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu den in der einschlägigen Literatur beschriebenen umfassenden Systemlösungen für die Optimierung der Bewetterung, da diese Systemlösungen auf eine Sonderbewetterung der Arbeitsorte ausgelegt sind. In einem flach gelagerten Flöz im Kammerbau ergeben sich für die Bewetterung der Vor-Ort-Bereiche komplexere Randbedingungen.

Folgende Aspekte stellen speziell bei der Anwendung im Kammerbau Grenzen des Einsatzes der bisher entwickelten bedarfsgerechten Bewetterungssysteme dar (23):

- Die Verstellung des Hauptgrubenlüfters ist für eine bedarfsgerechte Bewetterung von nur geringer Bedeutung, da die Totzeiten und die entsprechenden Vorlaufzeiten für eine solche Regelung zu groß sind. Bei Drehzahlverringerung des Lüftermotors wirkt sich die entsprechende Volumenstromminderung auf alle Wetterabteilungen der Grube aus. Somit ist diese Lösung zur Volumenstromsteuerung nur praktikabel, wenn generell ein geringerer Wetterbedarf besteht.
- Innerhalb der Wetterabteilungen benötigen Änderungen des Volumenstroms, abhängig von dessen Höhe und der Länge der Wetterwege beim Abbauverfahren Kammerbau, eine Zeitdauer von bis zu 90 min, um vor Ort wirksam zu sein. Die Kenntnis über die resultierende Totzeit ist von Bedeutung für die Festle-

will require up to 90 minutes to have an impact at the working faces. The information available on the resulting downtime is important for determining the response times and action times for controlling the district fans. If the downtime is much shorter than the operation time control of the district fan may be considered feasible. If the downtime is greater than the operation time of the machinery the change in the setting of the district fan would have to be performed earlier, and by the amount of downtime, so as to generate an increased volume of air at the workplace.

- Detailed information on the operating locations of the vehicles is needed in order to control the ventilation air flows. As things stand at present, it is not sufficient to have a control system based merely on toxic emission values in the return air.

gung der Ansprech- und Aktionszeiten bei einer Steuerung der Abteilungslüfter. Ist die Totzeit deutlich kleiner als die Einsatzdauer, kann eine Regelung des Abteilungslüfters als durchführbar angesehen werden. Wenn die Totzeit größer ist als die Einsatzdauer der Arbeitsmaschine, müsste alternativ die veränderte Einstellung des Abteilungslüfters um den Betrag der Totzeit früher geschehen, damit ein erhöhter Volumenstrom vor Ort wirksam ist.

- Detaillierte Kenntnisse über Fahrzeugeinsatzorte sind für eine Steuerung der Wetzervolumenströme erforderlich, eine Steuerung lediglich auf Basis von Schadstoffmesswerten in den Abwettern wäre zum jetzigen Kenntnisstand nicht hinreichend.

## References / Quellenverzeichnis

- (1) Commission of the European Communities: Technical coal research (1990): Feasibility of controlled ventilation.
- (2) Masse, M.: Optimized mine ventilation system. Simsmart Technologies Inc. (31.08.2007).
- (3) Simsmart Technologies Inc.: Optimized Mine Ventilation-On-Demand, OMVOD – System Description. Per Email zugesandt an Lucas Kempe im Rahmen seiner Literaturarbeit an der TU Bergakademie Freiberg am 24.3.2011.
- (4) Hardcastle, S.; Kocsis, C.: The ventilation challenge. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin – CIM Bulletin 2004.
- (5) Hardcastle, S.; Kocsis, C.; O'Connor, D.: Justifying ventilation-on-demand in a Canadian mine and the need for process based simulations. In: 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, 2006, pp. 15-27. London [u.a.], Taylor & Francis.
- (6) Allen, C.; Da Prat, R.: Variable frequency Drives as Applied to Ventilation System, 2009. [http://www.bestech.com/Downloads/Whitepapers/VFD%20Paper%20CIM\\_Toronto%20May%202009.pdf](http://www.bestech.com/Downloads/Whitepapers/VFD%20Paper%20CIM_Toronto%20May%202009.pdf), 13.12.2011.
- (7) Bestech: NRG1-ECO(TM) – Mines can save millions with NRG1-ECO(TM) optimizing Ventilation-on-Demand, 2011a. [http://www.bestech.com/Downloads/ProductSheets/BESTECH\\_NRG1-ECO.pdf](http://www.bestech.com/Downloads/ProductSheets/BESTECH_NRG1-ECO.pdf), 08.12.2011.
- (8) Kempe, L.: Bedarfsgerechte Bewetterung (ventilation on demand) – internationaler Vergleich der bisherigen Umsetzung. Literaturarbeit, unveröffentlicht, März 2011.
- (9) Nensen, P.; Lundkvist, A.: From 167 GWH to 72 GWH – Ventilation on Demand in LKAB's iron ore mine, Malmberget, 2011. [www.ubavie.gv.at/fileadmin/site/umwelthemen/industrie/IPPC\\_Konferenz/Nensen.pdf](http://www.ubavie.gv.at/fileadmin/site/umwelthemen/industrie/IPPC_Konferenz/Nensen.pdf), 13.12.2011.
- (10) Bestech: Vale and Xstrata commission energy management solution that can save millions in energy costs. Ontario Mineral Exploration Review, 2011b, Frühjahr 2011, S. 30–34.
- (11) Papesch, M.: Fan Energy on Demand 2.0 – Entwicklung eines Systems zur energieeffizienten Bewetterung von luttengebundenen Tunnelvortrieben mit Axialventilatoren. Masterarbeit in Kooperation mit der Technischen Universität Dortmund, Dezember 2017.
- (12) Isaksson, M.; Andersson, P.; Ekenstedt, F.: Ventilation on Demand (VOD): Systems used by Boliden Mineral AB, Kristineberg Mine, 1987–2008. In: Indian School of Mines, Department of Mining Engineering (Hrsg.): Mine Ventilation – 9th International Mine Ventilation Congress 2009. New Hampshire, USA: Science Publishers, pp. 105–112.
- (13) Allen, C.; Keen, B.: Ventilation on Demand (VOD) project – Vale Inco Limited, Coleman Mine: 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2008, pp. 45–49.
- (14) Bestech: NRG1-ECO Energy Consumption Optimization. Informationsmaterial übergeben auf der Fachausstellung im Rahmen des SME annual meetings in Denver Februar 2013.
- (15) Tollinsky, N.: Coleman Mine VOD system hailed as success. Bestech's NRG1-ECO system generates energy savings. Sudbury Mining Solutions Journal December 1, 2011, pp. 14–15.
- (16) Chadwick, J.: In depth news. International Mining October 2011, pp. 34–47.
- (17) O'Connor, D.: Ventilation on Demand (VOD) auxiliary fan project – Vale Inco Limited, Creighton Mine: 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2008, pp. 41–44.
- (18) Simsmart Technologies Inc.: SmartEXEC Mining – Project Phases. Informationsmaterial übergeben auf der Fachausstellung im Rahmen des SME annual meetings in Denver Februar 2013.
- (19) Centre for Excellence in Mining Innovation – CEMI: Ventilation on Demand for Production. E-Mail (18.04.2013).
- (20) Dasys, A.: Ventilation on Demand. CIM 2013 – Technical Workshop. Sudbury, Ontario, Canada (06.05.2013).
- (21) Natural Resources Canada: Ventilation on Demand. Sudbury, Ontario, Canada (06.05.2013).
- (22) Hughes, G.: Ventilation on Demand For Production. Centre for Excellence in Mining Innovation. Overview of Program. Sudbury, Ontario, Canada (06.05.2013).
- (23) Noll, S.: Optimierung der Grubenbewetterung mittels bedarfsgerechter Volumenstromsteuerung im Kammerbau. Dissertation 2016, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg.

## Authors / Autoren

Dr.-Ing. Sascha Engler, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Erfurt, Dipl.-Ing. (FH) Jens Kegenhoff und M.Sc. Matthias Papesch, Korffmann Lufttechnik GmbH, Witten