Ergin Isleyen
Jürgen F. Brune
Sebnem H. Duzgun

Continuous Respirable Dust Monitoring with Localization

The U.S. Mine Safety and Health Administration (MSHA) mandates the use of continuous personal dust monitors (PDM) in underground mines to verify compliance with mandatory respirable dust standards. Regulation 30 CFR §70.100 establishes a limit of 1.5 mg/m³ averaged over an eight hour working shift. Miners who work in dusty conditions are required to wear the PDM for several shifts each month to document that they are not overexposed to respirable dust. The PDM uses frequency changes in a tapered element oscillating microbalance (TEOM) to measure inhaled, respirable dust concentrations that the PDM displays in one minute intervals. Researchers at the Colorado School of Mines (CSM), Golden, CO/USA, are combining PDM output with location information from the underground miner tracking system to identify locations of high dust exposure. They display the combined information of dust concentration and location in "heat" maps to inform miners and mine management of hazardous dust sources. Management can eliminate dust hotspots through improved ventilation, sprays, scrubbers, or other engineering and administrative controls. Researchers proved the dust localization concept by designing a radio frequency identification (RFID) based miner tracking system and implementing it in the CSM's Edgar Experimental Mine.

Kontinuierliche Feinstaubüberwachung mittels Lokalisierung

Die US Mine Safety and Health Administration (MSHA) schreibt den Einsatz von kontinuierlichen persönlichen Staubmessgeräten (PDM) in Untertagebergwerken vor, um die Einhaltung der vorgeschriebenen Normen für lungengängigen Staub zu überprüfen. Die Vorschrift 30 CFR §70.100 legt einen Grenzwert von durchschnittlich 1,5 mg/m³ innerhalb einer achtstündigen Arbeitsschicht fest. Bergleute, die in staubbelasteten Bereichen arbeiten, müssen das PDM während mehrerer Schichten je Monat tragen, um zu dokumentieren, dass sie nicht übermäßig lungengängigem Staub ausgesetzt sind. Das PDM nutzt Frequenzänderungen in einem TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) zur Messung der eingeatmeten Feinstaubkonzentration, die das PDM in Intervallen von einer Minute anzeigt. Forscher an der Colorado School of Mines (CSM), Golden, CO/USA, verbinden die Ergebnisse des PDM mit Standortinformationen aus dem Ortungssystem für Bergleute unter Tage, um Orte mit hoher Staubbelastung zu ermitteln. Die zusammengefassten Informationen über die Staubkonzentration und den Standort werden in Wärmekarten dargestellt, um die Bergleute und die Bergwerksleitung über gefährliche Staubquellen zu informieren. Das Management kann Staub-Hotspots durch verbesserte Bewetterung, Bedüsung, Staubfilter oder andere technische und administrative Maßnahmen beseitigen. Die Forscher haben das Konzept der Staublokalisierung durch die Entwicklung eines auf Radiofrequenz-Identifikation (RFID) basierenden Systems zur Verfolgung von Bergleuten und dessen Implementierung im Edgar-Versuchsbergwerk der CSM unter Beweis gestellt.

Introduction

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Dust Control Handbook (1) defines mine dust as small solid particles created by the breaking up of the larger particles. When suspended in air, these particles will become hazardous to workers' health depending on their size. Particles ranging from 2 to 60 µm remain suspended in the air for long periods and may be inhaled by miners working underground. Dust particles < 10 µm are considered respirable. ISO 7708-1995 and the American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) determined the respirable criterion for dust, D_{50} to be 4 µm. Furthermore, the Mine Safety and Health Administration (MSHA) mandates a permissible exposure limit for respirable dust of 1.5 mg/m³, averaged over an 8 h shift, to prevent adverse health effects among miners.

Einleitung

Das vom National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) veröffentlichte Handbuch zur Staubkontrolle (Dust Control Handbook) (1) definiert Grubenstaub als kleine feste Partikel, die durch das Zerbrechen größerer Partikel entstehen. Wenn diese Partikel in der Luft schweben, werden sie je nach ihrer Größe zu einer Gefahr für die Gesundheit der Arbeitnehmer. Partikel mit einer Größe von 2 bis 60 µm verbleiben lange Zeit in der Luft und können von Bergleuten, die unter Tage arbeiten, eingeatmet werden. Staubpartikel < 10 µm gelten als lungengängig. Die ISO-Norm 7708-1995 und die American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH) haben den lungengängigen Grenzwert für Staub, D_{50}, auf 4 µm festgelegt. Darüber hinaus schreibt die Mine Safety and Health Administration (MSHA) einen zulässigen Grenzwert für lungengängigen Staub von 1,5 mg/m³ gemittelt über eine

Mine workers continue to suffer from overexposures to respirable dust, with debilitating health consequences that eventually lead to death. Colinet et al. (2) found the prevalence of coal workers' pneumoconiosis (CWP) to be increasing between 2000 and 2006, showing CWP in almost 8 % of underground coal miners who had more than 25 years of mining experience. The U.S. National Academies of Engineering (3) report on "Monitoring and Sampling Approaches to Assess Underground Coal Mine Dust Exposures" documents that, since 2002 and especially since 2010, there have been significant increases in the prevalence of CWP in U.S. miners who have 15 or more years' tenure in coal.

MSHA requires measurement of respirable dust by an approved continuous personal dust monitor (CPDM) for all underground miners exposed to respirable dust. Currently, there is one available commercial instrument that has been approved as a CPDM, Thermo ScientificTM PDM3700[1], which incorporates a real-time particulate monitor to measure respirable dust mass concentration, shift exposure, and accumulated exposure in real-time (4). It uses a tapered element oscillating microbalance (TEOM) to measure continuously the mass of collected particles. Airflow enters the PDM through a cyclone, drawn into a heated flow tube to be heated, then flows into mass transducer where the particulate matter is deposited onto the TEOM. After this, the air flows through temperature, relative humidity, and differential pressure sensors, and finally, through the pump to exit the system (5). The PDM3700 maintains a constant volumetric flow rate of about 2 l/min and reports the sample volumes in volumetric terms based on ambient temperature as measured near the cyclone.

PDM3700 samples, analyzes and calculates the mass-based concentration of the respirable dust. The mass calculation is based on the change in frequency of the TEOM. Figure 1 shows an extract of PDM data for one shift.

The blue line shows the dust mass concentration (Mass1), expressed in mg/m³. Mass1 is normally additive, i.e. it should show a steady increase of dust mass over time. If the PDM gets shaken or bumped, as indicated by erratic "tilt" readings (green

8 h-Schicht vor, um gesundheitliche Beeinträchtigungen bei Bergleuten zu vermeiden.

Bergleute leiden nach wie vor unter einer zu hohen Exposition gegenüber Feinstaub, die zu schweren gesundheitlichen Beeinträchtigungen und schließlich zum Tod führt. Colinet et al. (2) stellten fest, dass die Verbreitung der Pneumokoniose der Kohlebergleute zwischen 2000 und 2006 zunahm und bei fast 8 % der Bergleute unter Tage mit mehr als 25 Jahren Bergbauerfahrung auftrat. Der Bericht der US National Academies of Engineering (3) über „Monitoring and Sampling Approaches to Assess Underground Coal Mine Dust Exposures" (Überwachungs- und Probenahmeverfahren zur Bewertung der Staubbelastung unter Tage) dokumentiert, dass seit 2002 und insbesondere seit 2010 die Vorkommnisse der Kohlebergleute-Pneumokoniose bei US-Bergleuten, die 15 oder mehr Jahre im Kohlebergbau tätig waren, erheblich gestiegen sind.

Die MSHA verlangt für alle Bergleute unter Tage, die lungengängigem Staub ausgesetzt sind, die Messung des lungengängigen Staubs mit einem zugelassenen kontinuierlichen persönlichen Staubmessgerät (CPDM). Derzeit gibt es ein kommerzielles Gerät, das als CPDM zugelassen ist, das Thermo ScientificTM PDM3700[1], das einen Echtzeit-Partikelmonitor zur Messung der Feinstaubmassenkonzentration, der Schichtexposition und der kumulierten Exposition in Echtzeit enthält (4). Das Gerät verwendet eine oszillierende Mikrowaage mit konischem Element (TEOM) zur kontinuierlichen Messung der Masse der gesammelten Partikel. Der Luftstrom tritt durch einen Staubabscheider in den PDM ein, wird zur Erwärmung in ein beheiztes Strömungsrohr gesaugt und strömt dann in den Massenwandler, wo sich die Partikel auf dem TEOM ablagern. Danach strömt die Luft durch Temperatur-, relative Feuchte- und Differenzdrucksensoren und schließlich durch die Pumpe, um das System zu verlassen (5). Das PDM3700 hält eine konstante volumetrische Durchflussrate von etwa 2 l/min aufrecht und meldet die Probenvolumina in volumetrischer Form auf der Grundlage der in der Nähe des Staubabscheiders gemessenen Umgebungstemperatur.

Das PDM3700 nimmt Proben, analysiert und berechnet die massenbasierte Konzentration des lungengängigen Staubs. Die Berechnung der Masse basiert auf der Änderung der Frequenz des TEOM. Bild 1 zeigt einen Auszug aus den PDM-Daten einer Schicht.

Die blaue Linie zeigt die Staubmassenkonzentration (Mass1), ausgedrückt in mg/m³. Mass1 ist normalerweise additiv, d.h. sie sollte eine stetige Zunahme der Staubmasse im Lauf der Zeit zeigen. Wenn das PDM geschüttelt oder gestoßen wird, was durch unregelmäßige „Kipp"-Messwerte (grüne Kurve) angezeigt wird, kann die Staubmasse vom TEOM abge-

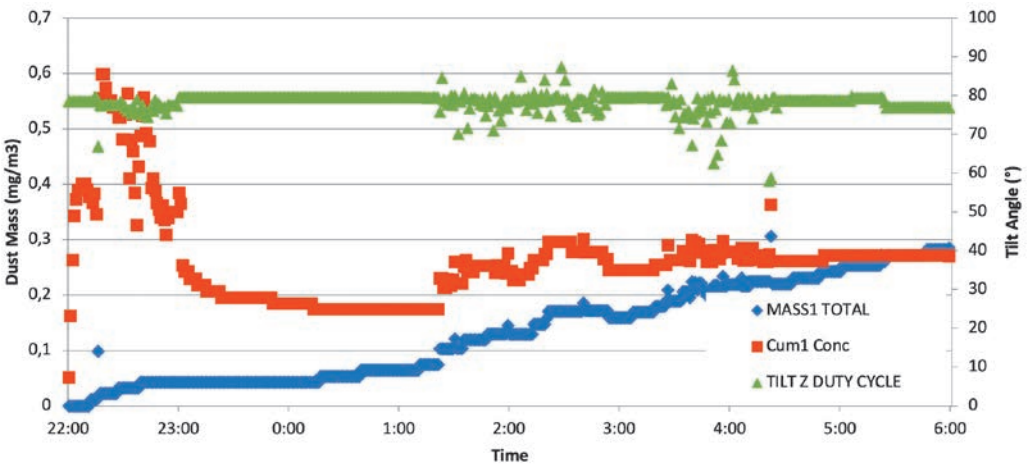

Fig. 1. PDM data for one shift. // Bild 1. PDM-Daten für eine Schicht. Source/Quelle: CSM

[1] *The mention of specific product names and manufacturers does not imply endorsement by the authors or the publisher.*

[1] *Die Angabe spezieller Produktbezeichnungen und Hersteller ist nicht als Werbung durch die Autoren oder Herausgeber zu verstehen.*

graph), dust mass may be shaken off the TEOM and lost. The PDM software then corrects the Mass1 reading to revert to the last good mass reading and continues counting, ignoring the lost dust mass. Plotted in red is the cumulative dust concentration, end-of-shift (EOS) forecast. In this case, the miner was exposed to a high dust concentration during the first 40 min of his/her shift, as indicated by the steep rise of the blue curve between 22:00 and 23:00. This coincides combined with the peak of the EOS estimate shown as the red curve. The tilt sensor indicates erratic data between 1:30 and 4:30 am, which resulted in several corrections of the dust mass, indicated by brief reductions in Mass1 (blue line) that were recovered a short while later.

Due to the end-of-shift averaging, the blue and red lines will converge at the end of the shift as both data streams mark the EOS dust concentration at that point. The slight divergence of about 0.1 mg/m³ signifies an error in the recording that is acceptable given the systematic inaccuracies in the measurement process. Volkwein et al. (6), showed that the PDM had a 95 % confidence that the individual PDM measurements were within ± 25 % of the reference measurements.

Despite having a near real-time dust exposure vs. time record from the PDM3700, the instrument cannot track miners' working locations along with their associated dust exposure levels. Location monitoring and tracking are necessary to identify sources and areas of excessive dust exposure, to predict hazardous exposure levels and to implement mitigating engineering and administrative controls before a miner is exposed.

The objective of this study is to improve the functionality of the PDM by adding geolocation information to the respirable dust exposure monitoring data. The location information can be extracted from a given miner tracking system such as Leaky-Feeder-based trackers, RFID tracking systems, or GPS where available. Dust exposure locations will be obtained by combining location and dust concentrations, and these locations will be visualized using geographic mapping tools. This information may then be used to design engineering and administrative controls to reduce or eliminate respirable dust exposure among miners, plant, and factory workers.

In this paper, the authors present the proof-of-concept for the proposed continuous dust monitoring with the localization system. For this purpose, researchers use the PDM and location data collected in the Edgar Experimental Mine of the Colorado School of Mines (CSM), Golden, CO/USA.

Methodology

The methodology used to develop a visualization tool for continuous dust monitoring with the localization system is shown in Figure 2.

In the first step, dust concentrations and location data are collected using PDM and the tracking system. In the second step, the time series of location and dust concentration values are combined. In the third step, spline interpolation technique is used to interpolate the collected dust concentration values to a raster surface along the data collection route. In the last step, the result of spline interpolation is used to create 3-D heat map visualization of dust concentration values.

schüttelt werden und verloren gehen. Die PDM-Software korrigiert dann den Messwert Mass1, um zum letzten guten Messwert zurückzukehren, und setzt die Zählung fort, wobei die verlorene Staubmasse ignoriert wird. In rot ist die kumulative Staubkonzentration am Ende der Schicht (EOS) dargestellt. In diesem Fall war der Bergmann während der ersten 40 min seiner Schicht einer hohen Staubkonzentration ausgesetzt, wie der steile Anstieg der blauen Kurve zwischen 22:00 und 23:00 Uhr zeigt. Dies fällt mit dem Spitzenwert der EOS-Schätzung zusammen, der als rote Kurve dargestellt ist. Der Neigungssensor zeigt erratische Daten zwischen 1:30 und 4:30 Uhr an, was zu mehreren Korrekturen der Staubmasse führte, die durch eine kurze Verringerung der Mass1 (blaue Linie) angezeigt werden, die kurze Zeit später wiederhergestellt wurde.

Aufgrund der Mittelwertbildung am Ende der Schicht werden die blaue und die rote Linie am Ende der Schicht konvergieren, da beide Datenströme die EOS-Staubkonzentration an diesem Punkt markieren. Die geringe Abweichung von etwa 0,1 mg/m³ stellt einen Fehler in der Aufzeichnung dar, der angesichts der systematischen Ungenauigkeiten im Messverfahren akzeptabel ist. Volkwein et al. (6) wiesen nach, dass das PDM eine 95 %-ige Sicherheit dafür bietet, dass die einzelnen PDM-Messungen innerhalb von ± 25 % der Referenzmessungen liegen.

Obwohl das PDM3700 die Staubexposition nahezu in Echtzeit aufzeichnet, kann das Gerät die Arbeitsorte der Bergleute und die damit verbundenen Staubexpositionswerte nicht verfolgen. Standortüberwachung und -verfolgung sind notwendig, um Quellen und Bereiche übermäßiger Staubexposition zu ermitteln, gefährliche Expositionswerte vorherzusagen und technische und verwaltungstechnische Maßnahmen zur Verringerung der Exposition zu ergreifen, bevor ein Bergmann der Gefahr ausgesetzt wird.

Ziel dieser Studie ist es, die Funktionalität des PDM zu verbessern, indem die Daten zur Überwachung der Feinstaubexposition um Geolokalisierungsinformationen ergänzt werden. Die Standortinformationen können einem bestehenden Bergbauverfolgungssystem wie Leaky-Feeder-basierten Trackern, RFID Verfolgungssystemen oder GPS, sofern verfügbar, entnommen werden. Die Standorte der Staubbelastung werden durch die Kombination von Standort und Staubkonzentration ermittelt, und diese Stand-

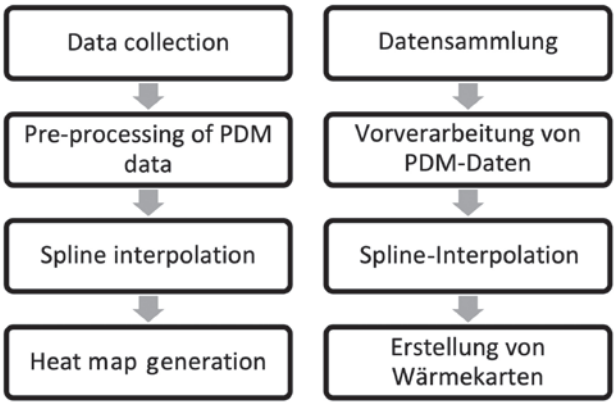

Fig. 2. Methodology used to develop a visualization tool.
Bild 2. Methodik zur Entwicklung eines Visualisierungstools.
Source/Quelle: CSM

Data collection

The researchers at the CSM have acquired a PDM3700 personal dust monitor from Thermo Fisher Scientific. They experimented with PDM in the Edgar Experimental Mine to demonstrate the capabilities of the proposed system. Since the geolocation capability of the system is still in the development stage, location information is collected manually. The authors marked the locations and the time while PDM records dust data in the mine. The locations where the PDM recorded dust readings in the Edgar Mine are acquired by matching the time readings of the PDM and manual location tracking. The route of PDM data collection in Edgar Mine is shown in Figure 3.

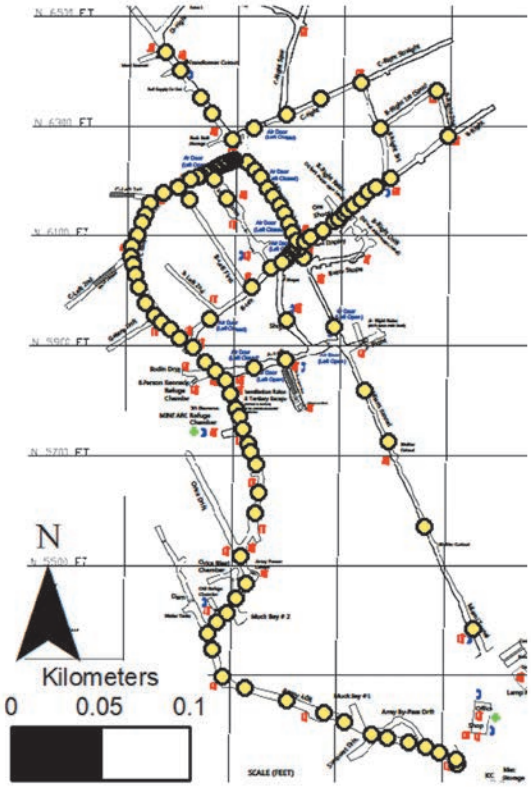

Fig. 3. PDM data collection locations in Edgar Mine.
Bild 3. Standorte für die PDM-Datensammlung in der Edgar-Versuchsgrube. Source/Quelle: CSM

Pre-processing of PDM data

For each minute interval, the PDM records 30 min average dust concentrations for the prior 30 min interval, the cumulative dust concentration to that point in time, and an estimated end-of-shift projected concentration. The mass calculation is based on the change in the frequency of the tapered element. Using the frequency values, equation 1 determines the dust concentration values. K_0 is the instrument calibration constant.

$$K_0 = \frac{MASS1\ TOTAL_{final}}{\left[\left(\frac{1}{Mass\ frequency^2_{final}}\right)-\left(\frac{1}{Mass\ frequency^2_{initial}}\right)\right]} \quad (1)$$

The K_0 value obtained using equation 1 is used in the re-calculation of the Mass Total values. This calculation also overrules the PDM's internal principle of only recording dust mass values if the difference is greater than 0.01 mg. Since the re-calculation con-

orte werden mit geografischen Kartenwerkzeugen visualisiert. Diese Informationen können dann dazu verwendet werden, technische und verwaltungstechnische Überwachungsmechanismen zu entwickeln, um die Exposition von Bergleuten, Anlagen- und Fabrikarbeitern gegenüber lungengängigem Staub zu verringern oder zu beseitigen.

In diesem Beitrag stellen die Autoren den Konzeptnachweis für die vorgeschlagene kontinuierliche Staubüberwachung mit Hilfe des Lokalisierungssystems vor. Zu diesem Zweck verwenden die Forscher die PDM- und Ortungsdaten, die im Edgar-Versuchsbergwerk der Colorado School of Mines (CSM), Golden, CO/USA, gesammelt wurden.

Methodik

Die Methodik zur Entwicklung eines Visualisierungstools für die kontinuierliche Staubüberwachung mit dem Lokalisierungssystem ist in Bild 2 dargestellt.

Im ersten Schritt werden Staubkonzentrationen und Standortdaten mit Hilfe von PDM und dem Ortungssystem erfasst. Im zweiten Schritt werden die Zeitreihen der Standort- und Staubkonzentrationswerte kombiniert. Im dritten Schritt werden die gesammelten Staubkonzentrationswerte mittels Spline-Interpolation zu einer Rasterfläche entlang der Erfassungsstrecke interpoliert. Im letzten Schritt wird das Ergebnis der Spline-Interpolation verwendet, um eine 3D-Wärmekarten-Visualisierung der Staubkonzentrationswerte zu erstellen.

Datenerfassung

Die Forscher an der CSM haben einen persönlichen Staubmonitor PDM3700 von Thermo Fisher Scientific erworben. Sie haben mit dem PDM im Edgar-Versuchsbergwerk experimentiert, um die Fähigkeiten des vorgeschlagenen Systems zu demonstrieren. Da sich die Geolokalisierungsfunktion des Systems noch in der Entwicklungsphase befindet, werden die Standortinformationen manuell erfasst. Die Autoren markierten die Orte und den Zeitpunkt, während das PDM die Staubdaten im Bergwerk aufzeichnete. Die Orte, an denen das PDM in der Edgar-Versuchsgrube Staubdaten aufgezeichnet hat, werden durch den Abgleich der Zeitmessungen des PDM und der manuellen Standortverfolgung ermittelt. Die Route der PDM Datenerfassung in der Edgar-Versuchsgrube ist in Bild 3 dargestellt.

Vorverarbeitung der PDM-Daten

Für jedes Minutenintervall zeichnet das PDM die durchschnittlichen 30-minütigen Staubkonzentrationen für das vorangegangene 30-minütige Intervall, die kumulative Staubkonzentration bis zu diesem Zeitpunkt und eine geschätzte prognostizierte Konzentration am Ende der Schicht auf. Die Berechnung der Masse basiert auf der Änderung der Frequenz des konischen Elements. Anhand der Frequenzwerte werden mit Hilfe von Gleichung 1 die Staubkonzentrationswerte ermittelt. K_0 ist die Kalibrierungskonstante des Instruments.

$$K_0 = \frac{MASS1\ TOTAL_{final}}{\left[\left(\frac{1}{Mass\ frequency^2_{final}}\right)-\left(\frac{1}{Mass\ frequency^2_{initial}}\right)\right]} \quad (1)$$

Der mit Gleichung 1 ermittelte K_0-Wert wird für die Neuberechnung der Gesamtmassenwerte verwendet. Durch diese Berech-

siders the small changes in Mass Frequency values, more sensitive Mass Total values are obtained (Equation 2).

$$Mass\ Total_{i+1} = K_0 \left[\frac{1}{Mass\ frequency_{i+1}^2} - \frac{1}{Mass\ frequency_i^2} \right] \quad (2)$$

The PDM calculates Mass Total values each minute. From this data, equation 3 determines dust concentrations per minute:

$$Dust\ Concentration\ Per\ Minute\ (\frac{mg}{m^3}) = \frac{MASS1\ TOTAL_i - MASS1\ TOTAL_{i-1}}{Flow\ Rate}\ x\ 1000 \quad (3)$$

Dust concentration values are shown in Figure 4. 30 min average and cumulative concentration values are obtained from the PDM, while the concentration per minute values are calculated using equation 3.

The graph shows that the dust concentrations are usually low in Edgar Mine, as evident from the dust data recorded during the first hour of testing. During the second hour of testing, researchers released compressed air in various locations to create artificial dust clouds. Recorded dust concentration peaks as indicated by the 30 min average and cumulative concentration values.

nung wird auch das interne Prinzip des PDM außer Kraft gesetzt, wonach Staubmassenwerte nur dann aufgezeichnet werden, wenn die Differenz größer als 0,01 mg ist. Da die Neuberechnung die kleinen Änderungen in den Massenhäufigkeitswerten berücksichtigt, erhält man empfindlichere Gesamtmassenwerte (Gleichung 2).

$$Mass\ Total_{i+1} = K_0 \left[\frac{1}{Mass\ frequency_{i+1}^2} - \frac{1}{Mass\ frequency_i^2} \right] \quad (2)$$

Das PDM berechnet jede Minute die Gesamtwerte der Masse. Aus diesen Daten bestimmt Gleichung 3 die Staubkonzentration pro Minute:

$$Dust\ Concentration\ Per\ Minute\ (\frac{mg}{m^3}) = \frac{MASS1\ TOTAL_i - MASS1\ TOTAL_{i-1}}{Flow\ Rate}\ x\ 1000 \quad (3)$$

Die Staubkonzentrationswerte sind in Bild 4 dargestellt. Die 30-minütigen Durchschnittswerte und die kumulativen Konzentrationswerte stammen aus dem PDM, während die Konzentrationswerte pro Minute mit Gleichung 3 berechnet wurden.

Das Diagramm zeigt, dass die Staubkonzentrationen im Edgar-Versuchsbergwerk in der Regel niedrig sind, wie aus

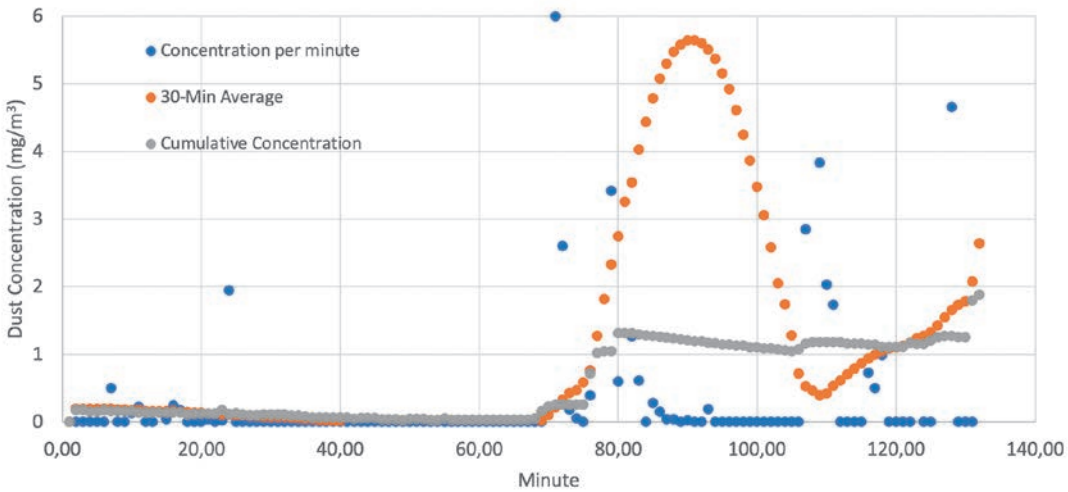

Fig. 4. Dust concentration values for Edgar Mine.
Bild 4. Staubkonzentrationswerte in der Edgar-Versuchsgrube. Source/Quelle: CSM

Spline interpolation

To create a heat map, researchers interpolated the PDM dust concentration values over the data collection route using spline interpolation. Spline estimates values using a mathematical function that minimizes the overall surface curvature. This results in a smooth surface that passes exactly through the input points (7).

A standard spline interpolation produces a raster surface over a specific geographic space. However, dust concentration events should be analyzed in terms of areas inside the network structure since, in underground mines, dust clouds can only occur along the network of mine entries. Therefore, the interpolation of dust concentration values should be limited to the grid of cells that belong to the Edgar mine drifts. This approach prevents the interpolation calculations outside the mine entries. Examples where spline interpolation with cell restrictions were used include travel-to-work analysis in sustainable urban development (8) and

den während der ersten Teststunde aufgezeichneten Staubdaten hervorgeht. Während der zweiten Teststunde ließen die Forscher an verschiedenen Stellen erneut Druckluft ab, um künstliche Staubwolken zu erzeugen. Die aufgezeichneten Staubkonzentrationsspitzen werden durch den 30-minütigen Durchschnittswert und die kumulativen Konzentrationswerte angezeigt.

Spline-Interpolation

Um eine Wärmekarte zu erstellen, interpolierten die Forscher die PDM-Staubkonzentrationswerte über die Datensammelroute mit Hilfe der Spline-Interpolation. Bei der Spline-Interpolation werden die Werte mit Hilfe einer mathematischen Funktion angepasst, welche die Krümmung der gesamten Oberfläche minimiert. Das Ergebnis ist eine glatte Oberfläche, die genau durch die Eingabepunkte verläuft (7).

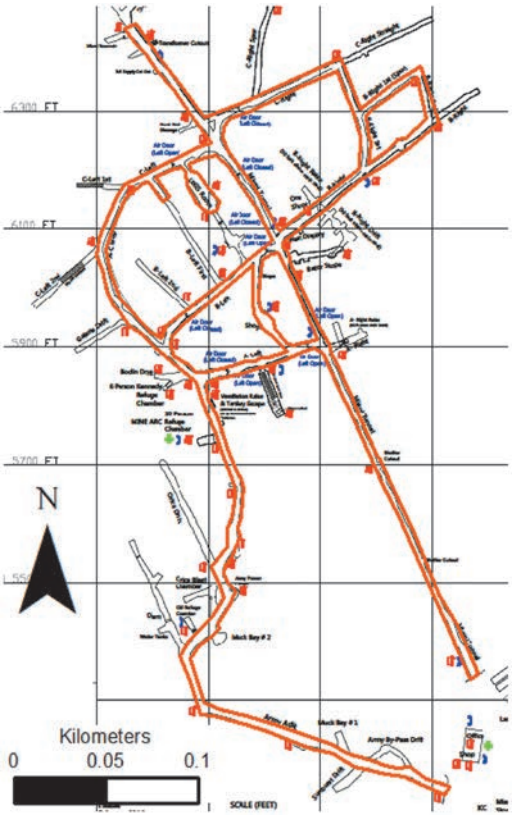

Fig. 5. Interpolation area used in spline.
Bild 5. Verwendeter Spline-Interpolationsbereich.
Source/Quelle: CSM

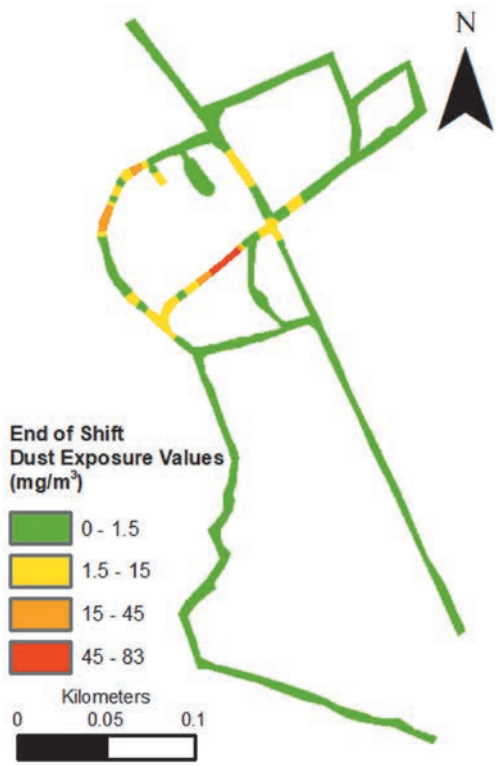

Fig. 6. Result of spline interpolation.
Bild 6. Ergebnis der Spline-Interpolation.
Source/Quelle: CSM

visualization of the depth of water channels (9). In this study, the Edgar mine drift network is obtained by creating a polygon feature that follows the data collection route (Figure 5).

In this study, researchers used the "Spatial Analyst" toolbox available in the ArcGIS software to apply spline interpolation on dust concentration values (10). In spline interpolation, the choice of output cell size is important since this parameter controls how smooth the results will be. For this study, after obtaining interpolation results for several cell sizes, a cell size of 0.15 m resulted in the most effective smoothing of dust concentration values. Figure 6 shows the result of spline interpolation. These results represent the end of shift dust exposure of a person if she stays in that location for a full 8 h shift.

The result of the spline indicates low dust concentration for most of the Edgar Mine. Several locations show medium levels of dust concentrations and a few locations exhibit dust concentrations above 1.5 mg/m³. Location mapping clearly documents several, dictinct, high-dust areas. In comparison, the PDM-only, time series data in Figure 4 only reveals a single peak of dust concentrations.

Heat map generation

Spline interpolation results are commonly visualized in 3-D since it provides a more intuitive understanding of the results. Figure 7 visualized the raster surface in 3-D using the end of shift dust exposure values obtained from spline interpolation as elevation values. Elevations are amplified for better visualization of the higher dust concentrations.

Eine Standard-Spline-Interpolation erzeugt eine Rasterfläche über einem bestimmten geografischen Raum. Staubkonzentrationsereignisse sollten jedoch in Bezug auf Flächen innerhalb der Netzstruktur analysiert werden, da in untertägigen Bergwerken Staubwolken nur entlang des Netzes der Grubeneinfahrten auftreten können. Daher sollte die Interpolation der Staubkonzentrationswerte auf das Gitter der Zellen beschränkt werden, die zu den Edgar-Stollen gehören. Auf diese Weise werden Interpolationsberechnungen außerhalb der Stolleneingänge vermieden. Beispiele, bei denen die Spline-Interpolation mit Zellenbeschränkungen verwendet wurde, sind die Analyse des Arbeitswegs in der nachhaltigen Stadtentwicklung (8) und die Visualisierung der Tiefe von Wasserkanälen (9). In dieser Studie wird das Edgar-Stollennetz durch die Erstellung einer Polygonfunktion, die der Datenerfassungsroute folgt, ermittelt (Bild 5).

In dieser Studie verwendeten die Forscher die in der ArcGIS-Software verfügbare Toolbox „Spatial Analyst", um die Spline-Interpolation auf Staubkonzentrationswerte anzuwenden (10). Bei der Spline-Interpolation ist die Wahl der Ausgangszellengröße wichtig, da dieser Parameter bestimmt, wie glatt die Ergebnisse sein werden. In dieser Studie führte eine Zellengröße von 0,15 m zur effektivsten Glättung der Staubkonzentrationswerte, nachdem Interpolationsergebnisse für verschiedene Zellengrößen ermittelt worden waren. Bild 6 zeigt das Ergebnis der Spline-Interpolation. Diese Ergebnisse stellen die Staubbelastung einer Person am Ende der Schicht dar, wenn sie sich während einer vollen 8 h-Schicht an diesem Ort aufhält.

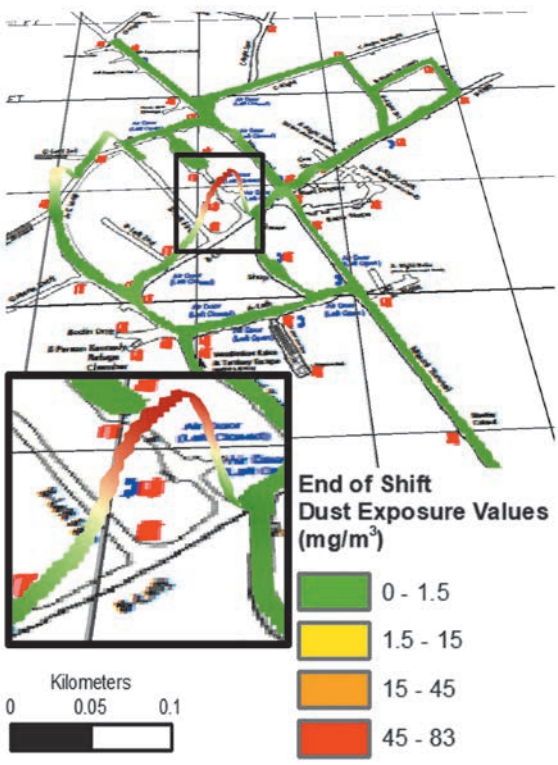

Fig. 7. 3-D heat map. // Bild 7. 3D Wärmekarte.
Source/Quelle: CSM

Discussion

Researchers at the Colorado School of Mines experimented with personal dust monitor (PDM) data tied to location tracking to provide a proof-of-concept for continuous dust monitoring with a localization system. The method works with any miner tracking system, including RFID, GPS, Leeaky Feeder or even manual location tracking. Combining PDM dust output with coordinates using data collection time provides enough data to show the capabilities of the system.

PDM only provides cumulative dust concentration values or a 30 min moving average of dust concentrations which are not enough to use for identifying hot spots in the mine. Therefore, the researchers calculate dust concentrations for each minute using the mass frequency values as the basis of the calculation. This calculation provides dust concentration values that can be related to specific locations in the mine. However, the error rate may increase as the time interval for the dust concentration value decreases. Further investigation of the error propagation is required to understand the accuracy of the calculated values.

Dust concentration time series values were interpolated over the data collection route in Edgar using spline interpolation. The analysis showed that the dust concentrations in the Edgar Mine are consistently low. Researcher artificially created several hot spots with high dust levels. PDM output alone indicated only a single hot spot, but spline interpolation and location analysis confirmed a number of distinct locations with high dust concentrations. Results were visualized in 3-D as a heat map to provide a clear representation of the hot spot locations.

Das Ergebnis der Spline-Interpolation weist eine niedrige Staubkonzentration im Großteil der Edgar Versuchsgrube nach. Mehrere Standorte zeigen mittlere Staubkonzentrationen und einige wenige Standorte weisen Staubkonzentrationen über 1,5 mg/m³ auf. Die Standortkartierung dokumentiert eindeutig mehrere eng umgrenzte Gebiete mit hoher Staubkonzentration. Im Vergleich dazu zeigen die reinen PDM Zeitreihendaten in Bild 4 nur eine einzige Spitze der Staubkonzentration.

Erstellung von Wärmekarten

Die Ergebnisse der Spline-Interpolation werden in der Regel in 3D visualisiert, da dies ein besseres Verständnis der Ergebnisse ermöglicht. In Bild 7 wird die Rasteroberfläche in 3D visualisiert, wobei die aus der Spline-Interpolation erhaltenen Werte für die Staubexposition am Ende der Schicht als Erhebungswerte verwendet werden. Die Erhebungen werden zur besseren Visualisierung der höheren Staubkonzentrationen verstärkt.

Diskussion

Die Forscher an der CSM experimentierten mit Daten von persönlichen Staubmessgeräten (PDM) in Verbindung mit der Standortverfolgung, um einen Konzeptnachweis für die kontinuierliche Staubüberwachung mit einem Lokalisierungssystem zu erbringen. Die Methode funktioniert mit jedem Ortungssystem für Bergleute, einschließlich RFID, GPS, Leeaky Feeder oder sogar manueller Standortverfolgung. Die Kombination des PDM-Stauboutputs mit den Koordinaten unter Verwendung der Datenerfassungszeit liefert genügend Daten, um die Möglichkeiten des Systems aufzuzeigen.

Das PDM liefert nur kumulative Staubkonzentrationswerte oder einen dynamischen 30 min-Durchschnitt der Staubkonzentrationen, die nicht ausreichen, um Hot Spots im Bergwerk zu identifizieren. Daher berechnen die Forscher die Staubkonzentrationen für jede Minute, indem sie die Massenhäufigkeitswerte als Grundlage für die Berechnung verwenden. Diese Berechnung liefert Staubkonzentrationswerte, die sich auf bestimmte Stellen im Bergwerk beziehen lassen. Allerdings kann sich die Fehlerquote erhöhen, wenn das Zeitintervall für den Staubkonzentrationswert kleiner wird. Eine weitere Untersuchung der Fehlerfolge ist erforderlich, um die Genauigkeit der berechneten Werte zu verstehen.

Die Zeitreihenwerte der Staubkonzentration wurden mit Hilfe der Spline-Interpolation über die Datenerfassungsstrecke im Edgar Versuchsbergwerk interpoliert. Die Analyse ergab, dass die Staubkonzentrationen in der Edgar Versuchsgrube durchweg niedrig sind. Forscher haben mehrere Hot Spots mit hohen Staubkonzentrationen künstlich erzeugt. Die PDM-Ausgabe allein wies nur auf einen einzigen Hot Spot hin, aber die Spline-Interpolation und die Standortanalyse bestätigten eine Reihe von eindeutigen Orten mit hohen Staubkonzentrationen. Die Ergebnisse wurden in 3-D als Wärmekarte visualisiert, um eine klare Darstellung der Hot-Spot-Standorte zu erhalten.

Schlussfolgerungen

Die Messung von Feinstaub mit einem PDM ist für alle Bergleute unter Tage, die Feinstaub ausgesetzt sind, vorgeschrieben. Das Gerät misst die Feinstaubmassenkonzentration, die

Conclusions

Measurement of respirable dust by a PDM is required for all underground miners exposed to respirable dust. The device measures respirable dust mass concentration, shift exposure and accumulated exposure in real-time. However, miners' locations are not tracked along with their associated dust exposure levels. Location tracking is necessary to identify sources of excessive dust exposure and to implement mitigating engineering and administrative controls before a miner is exposed. To properly manage respirable dust exposures, operators need a tool that identifies hazardous dust sources by location as well as concentration.

The proposed system uses spline interpolation tool on minute by minute dust concentration values calculated based on the mass frequencies obtained by the PDM. The heat map is generated by using the raster surface obtained by spline interpolation. The heat maps obtained with this methodology provides a clear understanding of where the excessive dust exposures occur.

Schichtexposition und die kumulierte Exposition in Echtzeit. Die Standorte der Bergleute werden jedoch nicht zusammen mit den damit verbundenen Staubbelastungswerten erfasst. Eine Standortverfolgung ist notwendig, um Quellen übermäßiger Staubexposition zu identifizieren und technische und verwaltungstechnische Maßnahmen zur Verringerung der Exposition zu ergreifen, bevor ein Bergmann gefährdet wird. Um die Exposition gegenüber lungengängigen Stäuben ordnungsgemäß zu handhaben, benötigen die Betreiber ein Werkzeug, das gefährliche Staubquellen sowohl nach Standort als auch nach Konzentration identifiziert.

Das vorgeschlagene System verwendet ein Spline-Interpolationstool für die minütlich erfassten Staubkonzentrationswerte, die auf Grundlage der vom PDM ermittelten Massenhäufigkeiten berechnet werden. Die Wärmekarte wird mit Hilfe der durch Spline-Interpolation erhaltenen Rasterfläche erstellt. Die mit dieser Methode erstellten Karten vermitteln ein klares Bild davon, wo die übermäßigen Staubbelastungen auftreten.

References / Quellenverzeichnis

(1) Cecala, A. B. (2019): Dust control handbook for industrial minerals mining and processing 2nd edition. NIOSH. Pittsburgh PA.

(2) Colinet, J. F.; Rider, J. P.; Listak, J. M.; Organiscak, J. A.; Wolfe, A. L. (2010): Best practices for dust control in coal mining. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health DHHS Publication No. 2010-110 (IC 9517), pp 1–76.

(3) National Academies (2018): Monitoring and sampling approaches to assess underground coal mine dust exposures. National Academies Press Washington DC, DOI: 10.17226/2511.

(4) Halterman, A. (2018): Comparison of respirable mass concentrations measured by a personal dust monitor and a personal DTA RAM to gravimetric measurement. Annals of Work Exposures and Health, Vol. 62, No. 1, pp. 62–71.

(5) ThermoScientific, Operator's Manual for PDM3700 Personal Dust Monitor, 25 March 2016: assets.thermofisher.com/TFSAssets/LSG/manuals/EPM-manual-PDM3700.pdf, Accessed October 2019.

(6) Volkwein, J. (2004): Performance of a new personal respirable dust monitor for mine use. US Department of Health and Human Services, Public Health Services, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health.

(7) Childs, C. (2004): Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst. ArcUser, July-September, 3235 (569), pp 32–35.

(8) Wolny, A.; Ogryzek, M.; Zrobek, R. (2017): Challenges, opportunities and barriers to sustainable transport development in functional urban areas. Environmental Engineering: Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering, 10, pp. 1–9.

(9) ESRI (2018): How to use spline with barriers to visualize the depth of water channels. Accessed from support.esri.com/en/technical-article/000014496, on July 7th 2020.

(10) ESRI (2019): ArcGIS Desktop: Release 10.7.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Authors / Autoren

Ergin Isleyen PhD, Prof. Dr.-Ing. Jürgen F. Brune,
Prof. Dr.-Ing. Sebnem H. Duzgun, Colorado School of Mines,
Golden, CO/USA