

Jürgen Brune

What Can Go Wrong with Mine Refuge Chambers?

Following the 2006 explosion at the Sago mine in West Virginia/USA twelve miners were trapped without communications for 47 h in a self-made barricade. When mine rescuers finally arrived, eleven of the twelve had died of CO poisoning. This prompted the US government to enact the MINER Act and follow-up regulation, requiring all underground coal mines to maintain mobile underground refuge chambers that provide life support for up to 96 h. This paper examines some of the engineering challenges associated with refuge chambers, including:

1. the airlock function designed to keep toxic mine gases out of the chamber;
2. the dissipation of metabolic heat generated by the occupants inside the chamber;
3. the resistance to withstand fires and explosions;
4. the difficulty of making accurate air quality measurements in a condensing atmosphere inside the chamber;
5. the ability to communicate to the outside; and
6. the decision to shelter and the psychological pressures for miners inside the chambers.

The paper will provide an overview of current research and suggests improvements to overcome current limitations.

Problemstellungen beim Einsatz von Fluchtkammern im Untertagebergbau

Nach der Gasexplosion auf dem US-Bergwerk Sago im Januar 2006 haben sich zwölf überlebende Bergleute in einem entlegenen Stollenteil verbarrikadiert in der Hoffnung, von der Grubenwehr gerettet zu werden. Als nach 47 h die Grubenretter eintrafen, waren elf der zwölf Bergleute an CO-Vergiftung gestorben, und der Zwölfte konnte mit schweren Vergiftungserscheinungen gerettet werden. Aufgrund dieses Unglücks verabschiedete der US-Kongress im Juni 2006 das MINER-Act-Gesetz, das Forschung über den Einsatz mobiler Fluchtkammern in allen US-Kohlebergwerken vorsieht – diese wurden per Verordnung seit dem Jahr 2009 verpflichtend. Die Kammern müssen Atemluft, Wasser und Nahrung für bis zu 96 h vorhalten. Dieser Artikel beschreibt folgende ingenieurtechnische Herausforderungen für untertägige Fluchtkammern:

1. Luftschleusen, um giftige Gase aus der Kammer herauszuhalten,
2. die Dissipation der Körperwärme in der Kammer,
3. die Standfestigkeit der Kammern gegen Hitze und Explosionsdruck,
4. die Schwierigkeit, in kondensierender Atmosphäre in der Kammer korrekte Messungen zur Überwachung der Atemluftqualität durchzuführen,
5. die Herausforderung, von unter Tage mit der Grubenleitung über Tage zu kommunizieren sowie
6. die Psychologie der Entscheidung eingeschlossener Bergleute, sich in die Fluchtkammer zu retten oder die Flucht zum Tage anzutreten.

Die Arbeit vermittelt außerdem einen Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Fluchtkammern.

Background

The Mine Improvement and New Emergency Response (MINER) Act was passed by the US Congress in 2006 following deadly explosion disasters at the Sago Mine where twelve miners perished, and the Kentucky Darby mine, where five miners lost their lives. Among the key provisions of this law is a provision for the US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) to conduct research on refuge alternatives to provide shelter for miners whose escape to the surface is blocked. Independent of the outcome of this research, the US State of West Virginia pioneered requiring refuge chambers to be installed and provided in all underground coal mines. These chambers were to be designed to provide life support for a minimum of 96 h with breathable

Hintergrund

Das MINER Act-Gesetz wurde vom US-Kongress im Sommer 2006 verabschiedet, nachdem sich im Januar 2006 eine Explosion auf der Grube Sago ereignet hatte, bei der zwölf Bergleute tödlich verunglückt waren, sowie einer Explosion auf der Grube Kentucky Darby, bei der fünf Bergleute starben. Das Gesetz sah vor, dass das Office of Mine Safety and Health Research des Nationalen Forschungsinstituts für Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz (National Institute for Occupational Safety and Health – NIOSH) der USA Forschung und Entwicklungsarbeit über Fluchtkammern durchführen sollte, in die sich eingeschlossene Bergleute retten könnten. Unabhängig von dieser Forschung trieb der US-Staat West Virginia ein eigenes Entwicklungsvorhaben voran, um



Fig. 1. Portable mine refuge chamber for use in coal mines.
Bild 1. Mobile Fluchtkammer für Kohlebergwerke. Photo/Foto: Brune



Fig. 2. Outside view of a built-in-place shelter with external battery power supply and air conditioning.
Bild 2. Außenansicht einer stationären Fluchtkammer mit externer Batteriestromversorgung und Klimatisierung. Photo/Foto: Brune

air, food, water and human waste disposal. A special Task Force recommended that the apparent temperature inside the chamber should not exceed a value of 95 based on a heat index developed by Steadman (1). Since 2009, US federal regulations (30 CFR §75.1506) require each underground coal mine operator to furnish refuge chambers within 300 m from each working face and outby at distances equivalent to 30 min of travel (10).

Before 2009, refuge chambers were not regularly used in US coal mines and no experience or research existed about their utilization. Rather, miners were trained to shelter in place if escape from the mine was cut off, and materials to build shelters were stored in strategic locations.

Due to the rapid section advance in modern, high-performance longwall coal mines, each longwall or development face may move up to 25 m/d. In order to keep a refuge alternative close to the face, it must be mobile and moved up every few days. Movable or portable chambers (Figure 1) are commonly designed either as rigid, steel bodies or as inflatable, tent-style chambers that are lighter and easier to handle for transport, but require time to set up before they can be used.



Fig. 3. Inside view of a built-in-place refuge chamber.
Bild 3. Innenansicht einer stationären Fluchtkammer. Photo/Foto: Brune

kurzfristig alle Gruben mit Fluchtkammern auszustatten. Diese Kammern sollten bis zu 96 h Überleben mit Atemluft, Nahrung, Wasser und Toiletten bieten. Eine für diese Entwicklung eingerichtete Expertengruppe in West Virginia legte u.a. fest, dass der Hitzeindex nach Steadman (1) den Maximalwert von 95 nicht überschreiten sollte. Die US-Bundesbergbehörde Mine Safety and Health Administration (MSHA) zog im Jahr 2009 mit ähnlichen Regeln nach und verlangt seitdem, dass Fluchtkammern in allen Kohlebergwerken in Abständen von maximal 300 m von allen Abbauorten eingerichtet werden müssen und von dort aus entlang des Fluchtwegs entsprechend einer Fluchtzeit von etwa 30 min (10).

Vor dem Jahr 2009 waren Fluchtkammern im Regelwerk vorgesehen, wurden jedoch selten eingesetzt und es bestand keinerlei Erfahrung oder einschlägige Forschung über ihren Einsatz. Bergleute wurden unterwiesen, sich in einem Grubenbau mit ausreichender Atemluftmenge und -qualität zu verbarrikadieren, wenn sie eingeschlossen waren. Baumaterial für diese Barrikaden wurde in allen Abbauorten bereitgestellt.

US-Hochleistungsstreb erreichen häufig Verhiebsleistungen von über 25 m/d. Um die Fluchtkammern 300 m oder näher am Streb zu halten, müssen die Kammern mobil sein und alle paar Tage nachgeführt werden. Mobile Fluchtkammern (Bild 1) sind entweder als starrwandige Kammern oder als aufblasbare Zeltstrukturen ausgeführt. Zeltkammern sind leichter und kompakter, müssen aber vor Inbetriebnahme aufgeblasen werden, was einige Minuten dauert.

Neben mobilen Kammern werden auch stationäre Kammern eingesetzt (Bilder 2, 3). Stationäre Kammern haben den Vorteil, dass sie mit fest installierter Strom-, Wasser-, Atemluftversorgung, Telefonverbindung und Klimatisierung eingerichtet werden können. Im Einsatzfall besteht daneben eine Notversorgung für die Überlebensfunktionen. Die meisten Metallerzbergwerke in den USA sind mit diesen stationären Kammern ausgestattet. Grubenbrände in Nichtkohlebergwerken haben eine begrenzte Brandlast, sodass Brände nach einigen Stunden erlöschen. Kohlebergwerke haben dagegen nahezu unbegrenzte Brennstoffreserven, und es besteht immer die Gefahr einer

Besides the movable refuge chambers, mines also employ in-place shelters at designated locations. In-place shelters have the advantage that they can be equipped with electric power, water, compressed air, communication lines and a borehole to the surface to supply air, air conditioning, food, drinking water, and medications for the miners. Most metal-non-metal mines are equipped with in-place shelters (Figures 2, 3) and such shelters are being used regularly, even in minor emergencies.

Fires in metal-non-metal mines are typically equipment fires that have a limited supply of fuel and burn out after several hours. During these emergencies, in-place shelters work well as miners shelter in a well-equipped and supported location and simply wait a few hours for the fire to burn out. Coal mine fires may involve a near-unlimited supply of fuel, and there is always the danger of methane-air explosions that may occur if the ventilation system is compromised.

The following sections discuss the fundamental problems of underground mine refuge shelters and potential solutions.

Maintaining a breathable atmosphere

Refuge chambers are typically equipped with a supply of oxygen and chemical scrubbers that clean CO₂ and CO from the inside air. Chambers that are equipped with batteries may employ mechanical fans to operate the scrubbers while other chambers may have curtains filled with the scrubber chemical and do not require a fan. The oxygen supply is designed to make up for human consumption and leakage losses that occur particularly with tent-style chambers. As with all life support, breathing air supplies are designed to last at least 96 h at full occupancy level.

A critical time to establish and maintain chamber air quality is during entry. Although most chambers are equipped with a set of double doors which form an air lock that can be purged, there is a significant risk of contamination if the mine air contains high concentration of toxic gases or smoke. Mine rescue teams encountered CO levels greater than 10,000 ppm (1%) after the coal dust explosion in the Upper Big Branch mine in 2010 (2). Investigators found their CO meters pegged at 9,999 ppm, indicating potentially much higher concentrations. Assuming that miners enter a refuge chamber in such an atmosphere, they would have to purge the air lock to dilute the CO concentration by a factor of 400 or more to reach an acceptable air quality of 25 ppm or less CO inside the main chamber. It should be noted that, although 25 ppm is the current 8 h threshold limit value (TLV), regulations require the CO concentration to be 10 ppm or less, requiring a dilution factor of 1,000.

Each full volume exchange of the airlock chamber typically reduces the contaminant concentration by 50%. Thus, to reach a dilution factor of 1,000, ten purges would be required, given $2^{10} = 1,024$. Bauer et al. (3) studied purging in an experimental airlock chamber, starting with an outside CO concentration of 400 ppm based on MSHA standards (10). They assumed that four purging cycles would suffice to reduce the concentration from 400 to 25 ppm which confirms the 50% reduction assumption. Figure 4 shows the purge times required at different air flow rates. Bauer et al. also note that 400 ppm may not be realistic in post-explosion conditions where the CO level may exceed 1% or more. They also note that the purging circumstances

Methanexplosion, besonders dann, wenn die Bewetterungssysteme beschädigt sind.

In den folgenden Abschnitten werden die Problemstellungen erläutert, die sich beim Einsatz von Fluchtkammern unter Tage ergeben.

Versorgung mit Atemluft

Fluchtkammern sind mit Atemluftsystemen ausgestattet, welche die Bergleute mit Sauerstoff versorgen und die Atemluft von CO₂ und CO reinigen. Batteriebetriebene Kammern haben aktive Reinigungssysteme, welche die Luft mit Gebläsen durch die Gaswäschechemikalien saugen, während in passiven Kammern Vorhänge eingesetzt werden, die mit den Chemikalien imprägniert sind. Die Sauerstoffversorgung aus Gasflaschen ist so ausgelegt, dass sie etwaige Leckagen besonders bei Zeltkammern kompensiert. Die Atemluftaufbereitung ist für mindestens 96 h dimensioniert.

Die Atemluftqualität muss insbesondere dann sichergestellt werden, wenn die Bergleute in die Kammer eintreten. Die Kammern sind mit einer Luftschleuse ausgestattet, über die giftige Gase aus den Grubenwettern ausgewaschen werden. Messungen nach der Explosion der Grube Upper Big Branch im Jahr 2010 ergaben, dass die CO-Konzentration über 10.000 ppm (1%) lag, wobei mehrere Messinstrumente den Maximalwert von 9.999 ppm anzeigten (2). Wenn man annimmt, dass Bergleute aus einer solchen Atmosphäre in die Luftschleuse eintreten, muss die CO-Konzentration um einen Faktor von mindestens 400 auf den akzeptablen Grenzwert von 25 ppm verdünnt werden.

Jeder komplette Luftaustausch des Schleusenvolumens verdünnt die Gaskonzentrationen um den Faktor 2. Damit sind für die Verdünnung mindestens neun komplette Zyklen notwendig: $2^9 = 512$. Experimentelle Studien von Bauer und anderen (3) haben diesen Sachverhalt bestätigt, allerdings lediglich für einen Anfangswert von nur 400 ppm, basierend auf bergbehördlicher Vorgabe (10). Für die Verdünnung auf 25 ppm benötigten sie vier Luftaustauschzyklen (Bild 4). Bei den Studien stellte sich heraus, dass die Vorgabe von lediglich 400 ppm in Fällen von Grubengasexplosionen nicht ausreichend ist, da nach Explosionen in den meisten Fällen höhere Gaskonzentrationen entstehen. Die Studien ergaben auch, dass die Verdünnung von der Gestaltung und Größe der Luftschleuse sowie von der Geschwindigkeit abhängt, mit der die Bergleute in die Fluchtkammer eintreten.

In den meisten Kammern bietet die Luftschleuse lediglich Platz für ein Viertel bis ein Drittel der vollen Kapazität der Kammer, sodass die Bergleute in drei bis vier Gruppen eintreten müssen. Wenn man annimmt, dass jeder Luftaustauschzyklus 3 min dauert, benötigt jede Gruppe für neun Zyklen etwa 30 min, bevor sie in die Hauptkammer eintreten kann. Während dieser Zeit müssen andere Bergleute vor der Kammer warten. Da die in den USA üblichen Sauerstoffseltretter eine Kapazität von lediglich einer Stunde haben, müssen also in der Nähe der Fluchtkammer weitere Seltretter vorgehalten werden, damit die wartenden Bergleute eine ausreichende Atemluftversorgung erhalten. Bei einer CO-Konzentration von 1% (10.000 ppm) muss die Luftschleuse für vier Gruppen und neun Zyklen ein Atemluftvolumen vom 36-fachen des Luftschleusenvolumens vorhalten. Der Verfasser kennt derzeit keine Fluchtkammer, die diese Kapazität besitzt.

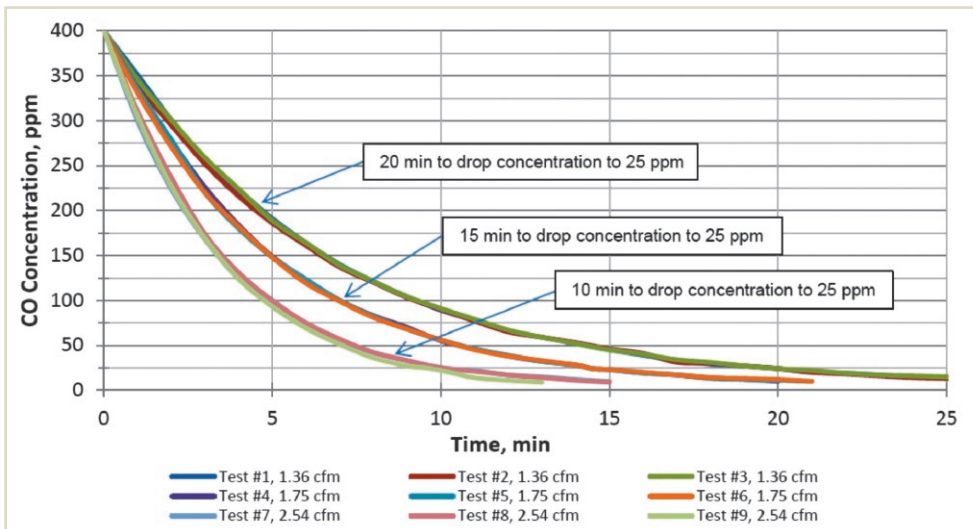


Fig. 4. Purge times to reduce the CO concentration from 400 to 25 ppm, using three different purge air flow rates (3).
 Bild 4. Säuberungszeiten bei drei unterschiedlichen Luftzufuhraten, um die CO-Konzentration von 400 auf 25 ppm zu verringern (3).

are affected by the size and shape of the airlock and the speed with which miners can enter it.

In most chambers, the airlock only has room for 1/4 to 1/3 of the total occupancy of the chamber. This means miners must enter the airlock in three or four groups. Assuming each purge takes only 3 min, it would take about 30 min to get each group of miners through the airlock, while the other miners wait outside under self-contained self-rescuers (SCSRs). Note that US regulation (10) provide for a 20-min time frame for all purging cycles to be completed for all occupants of the chamber. As these rescuers only provide 1 h breathing capacity, there must be a cache of SCSRs next to every chamber to protect miners while they wait to get in. Furthermore, up to 36 purges may be required for four groups of miners to enter the chamber. The author is not aware of any chamber that provides air for up to 36 purges so that all miners can safely enter the chamber.

Heat dissipation from the chamber

An average human, at rest, produces approximately 117 W of heat (4, 5). In addition, the CO₂ scrubbing process involves an exothermal chemical reaction that adds 40 to 50 W per person to the heat generated inside the chamber. The ability of the chamber to dissipate this heat depends on the temperature of the air and rock inside the mine. The US Mine Safety and Health Administration (MSHA) has limited the apparent temperature in mine refuge alternatives to a heat index of 95 based on Steadman (1), see also (10). This temperature index is based on a mathematical regression that uses the dry bulb temperature and relative humidity as input parameters. At 90% relative humidity, a heat index of 95 is reached at a dry bulb temperature of 28.3 °C.

Physical experiments using a 10-person, tent-style chamber, along with model calculations by Yantek (6) have shown that the occupancy level in a given chamber may need to be de-rated if the ambient temperature in the mine exceeds the maximum design temperature. In an example given by Yantek, no de-rating is required below 15.5 °C. At 18 °C, the capacity must be reduced by 40%, up to 21 °C by 60% and at temperatures up to 24 °C, de-rating by 80% would be required. Similar de-rating curves were developed by the author (4) for four different chamber models (Figure 5).

Wärmedissipation in Fluchtkammern

Im Ruhezustand entwickelt eine Durchschnittsperson etwa 117 W Wärmeleistung (4, 5). Dazu kommt die exotherme Wärmeentwicklung des CO₂-Gaswäscheprozesses, der je nach den eingesetzten Chemikalien etwa 40 bis 50 W entwickelt. Die Möglichkeit der Fluchtkammer, Wärme an die Grubenumgebung abzuführen, richtet sich nach der Wetter- und Gesteinstemperatur in der Grube. Die MSHA hat im Jahr 2009 festgelegt, dass ein Grubenklimawert von 95 nach der Klimafunktion von Steadman (1) gemäß (10) nicht überschritten werden darf. Die Steadman-Funktion basiert auf einer mathematischen Regression auf der Basis von Trockentemperatur und relativer Feuchte. Bei einer Feuchte von 90% wird der Grenzwert 95 bei einer Trockentemperatur von 28,3 °C erreicht.

Experimentelle Untersuchungen von Yantek (6) in einer Zeltkammer für zehn Personen sowie numerische Modellrechnungen haben ergeben, dass eine Fluchtkammer zur Einhaltung des Klimagrenzwerts ab einer kritischen Grubentemperatur nicht mehr mit der vollen Zahl von Bergleuten belegt werden darf. Die maximale Belegung muss oberhalb der kritischen Temperatur stufenweise zurückgefahren werden. In einem von Yantek angeführten Beispiel liegt die kritische Temperatur bei 15,5 °C. Bei 18 °C muss die Kapazität um 40% reduziert werden. Bei 21 °C werden es bereits 60% und ab 24 °C beträgt die Reduktion 80%. Der Autor selbst hat in einer Modellrechnung für vier verschiedene Kammertypen ähnliche Reduktionen berechnet, die in Bild 5 dargestellt sind (4).

Die Untersuchungen von Yantek und Brune zeigen außerdem, dass die Atmosphäre in den Fluchtkammern nach einigen Stunden 100% relative Feuchte erreicht und die Feuchtigkeit danach an den kühleren Wänden auskondensiert. Es ist dann zu erwarten, dass sich das Kondenswasser auf dem Kammerboden sammelt, was bei Zeltkammern zu unangenehmen Bedingungen führt. Einige Hersteller bieten klimatisierte Fluchtkammern an, in denen Temperatur und Feuchte in komfortablen Grenzen gehalten werden. Die Klimaanlage sind batteriebetrieben und müssen daher die Zulassungsbedingungen für Elektroanlagen in Kohlebergwerken erfüllen.

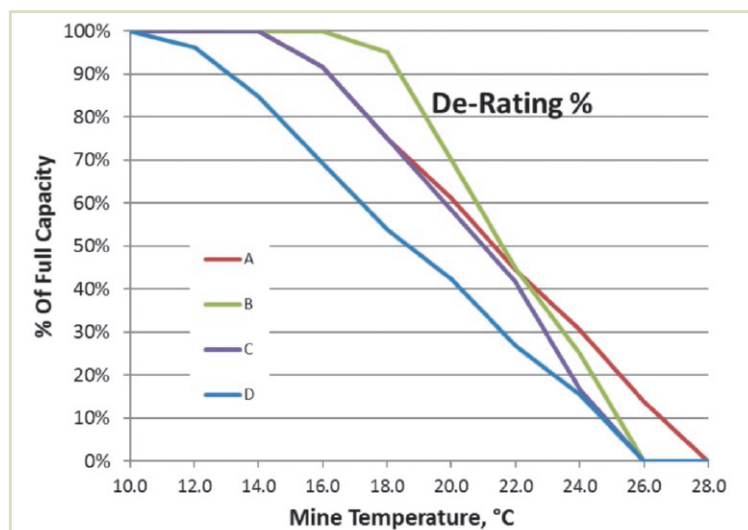


Fig. 5. De-rating of refuge chamber capacity at higher mine ambient temperatures for four different chamber models, modified after (4).

Bild 5. Abnahme der Fluchtkammerkapazität bei steigender Grubentemperatur für vier verschiedene Fluchtkammermodelle, nach (4).

Yantek's experiments and the author's calculations show that the atmosphere inside refuge chambers will reach condensing conditions at relative humidity levels near 100%. Researchers expect water to pool at the floor of the chamber, which may make conditions uncomfortable especially in tent-style chambers.

Some manufacturers offer mobile refuge chambers with cooling and air conditioning. These chambers require battery power but have the advantage that the atmosphere inside the chamber is maintained at a more comfortable humidity as well.

Resistance to withstand fires and explosions

Based on MSHA requirements (10), mine refuge chambers must be designed to withstand a flash fire of 150 °C for 3 s prior to being deployed. In addition, the undeployed chamber also must be able to withstand an explosion pressure of 100 kPa (15 psi) overpressure for 0.2 s.

If a free standing chamber with a cross sectional area of 4 m² is unilaterally exposed to such an explosion pressure, this pressure may briefly exert a force of 400 kN on the chamber. In full scale mine explosion tests, Weiss et al. (7) subjected a 700 kg battery charger to a static pressure of approximately 200 kPa. The charger had a cross section area of approximately 1 m² and was thrown a distance of 24 m.

This experiment makes questionable the ability of any refuge chamber to withstand direct impact from a mine explosion. Currently, no facility exists in the USA to physically test the explosion resistance capability of mine refuge chambers.

Air quality monitoring

The quality of air inside the chamber must be carefully monitored to maintain oxygen between 18.5 and 23%, CO₂ below 1% and CO below 10 ppm (10). Handheld gas detectors can be used for this purpose, but are usually not designed to function in condensing atmospheres or above 95% relative humidity as condensation may clog or incapacitate the sensors. Most gas sensors, including CO, are limited to a relative humidity below 90. Yantek (6) showed from experiments that the relative humidity inside the chamber would rise to 93%, which makes it questionable whether air quality measurements could be performed accurately inside the chambers.

Widerstand gegen Brände und Explosionen

Gemäß (10) müssen Fluchtkammern so gebaut sein, dass sie einer kurzzeitigen Hitzeeinwirkung von 150 °C für eine Dauer von 3 s standhalten. Die Kammern müssen außerdem, solange sie im Bereitschaftszustand sind, einem Explosionsüberdruck von 100 kPa für eine Zeitdauer von 0.2 s standhalten. Bei Zeltkammern gilt als Bereitschaftszustand, wenn das Zelt nicht aufgebaut ist.

Wenn eine freistehende Kammer, oder bei Zeltkammern der starre Teil, der die Luftschleuse und Atemluftaufbereitung enthält, bei einer angenommenen Querschnittsfläche von 4 m² einer Explosionsdruckwelle von 100 kPa ausgesetzt ist, entwickelt sich eine Kraft von 400 kN auf die Kammer. In Explosionsversuchen auf der Versuchsgrube Lake Lynn wurde ein Batterieladegerät mit einer Masse von 700 kg und einer Querschnittsfläche von 1 m² einem Explosionsdruck von etwa 200 kPa ausgesetzt (7). Das Ladegerät wurde über eine Distanz von 24 m weggeschleudert.

Dieses Experiment stellt infrage, ob mobile Fluchtkammern tatsächlich das geforderte Explosionskriterium erfüllen können. Derzeit gibt es in den USA keine Versuchseinrichtungen, in denen diese Bedingungen experimentell überprüft werden können.

Überwachung der Atemluftqualität

Die Atemluft in der Fluchtkammer muss gemäß (10) zwischen 19,5% und 23% Sauerstoff und darf maximal 1% CO₂ und 10 ppm CO enthalten. Diese Grenzwerte werden mit Handmessgeräten überwacht und die Gasregleinrichtungen entsprechend bedient. Handgasmessgeräte können allerdings üblicherweise nur bis zu einer relativen Feuchte von 90% eingesetzt werden, da die Sensoren in kondensierenden Atmosphären oberhalb 95% nicht mehr korrekt arbeiten. Yantek hat experimentell relative Feuchtigkeiten von 93% erreicht, was die korrekte Messung der Luftzusammensetzung in Frage stellt (6).

Kommunikationssysteme

Stationäre Fluchtkammern haben üblicherweise drahtgebundene Telefonverbindungen, die bei mobilen Kammern nicht möglich sind. Kommunikation mit den Tagesanlagen ist zwingend erforderlich, damit das Notfallmanagement über das Befinden der Kammerinsassen und deren Bedürfnisse informiert werden kann.

Communications

While in-place mine refuge chambers usually have wired telephone communications installed, portable chambers do not. The ability to communicate with the outside is critical to inform emergency managers about the wellbeing of chamber occupants and their medical needs as well as to inform occupants about the progress of their rescue. If communications are not available, emergency managers will be guessing about the missing miners and miners will increasingly worry about being rescued.

In the aftermath of a mine explosion, rescuers may need to drill holes near the locations of all refuge chambers to assess the atmosphere and, by lowering cameras, microphones and loudspeakers, to determine if chambers had been deployed and are occupied. Still, this may prove inconclusive if direct communication with the miners in the chamber cannot be established. Mines increasingly employ wireless communication systems that are designed to survive explosions and fires so in the future, portable refuge chambers will need to be tied into the wireless communication networks.

Psychological stresses

NIOSH researchers point out in publications and training presentations that escape from the mine is the primary course of action during an emergency. Brnich et al. (8) outline the difficulty of decision making when a crew of miners is trapped and contemplates the use of a refuge chamber. In the majority of mine emergency situations, miners know that something is wrong but have limited information even if communication to the surface is still functional.

Wenn keine Kommunikation möglich ist, haben weder Management noch die eingeschlossenen Bergleute ausreichende Informationen, und die Bergleute werden noch stärkeren psychischen Belastungen ausgesetzt.

Nach einem Grubenunglück versuchen die Retter oft, Bohrlöcher nahe den Fluchtkammern niederzubringen, um dann mit Kameras, Lautsprechern und Mikrofonen Kontakt zu den Eingeschlossenen aufzunehmen. Diese Kommunikationsmethode ist jedoch nicht zuverlässig und erfordert je nach Umständen eine lange Vorbereitungszeit. Drahtlose, brand- und explosionsfeste Kommunikationseinrichtungen sind großenteils noch im Entwicklungsstadium, sollten aber in der Zukunft für den Einsatz in mobilen Fluchtkammern berücksichtigt werden.

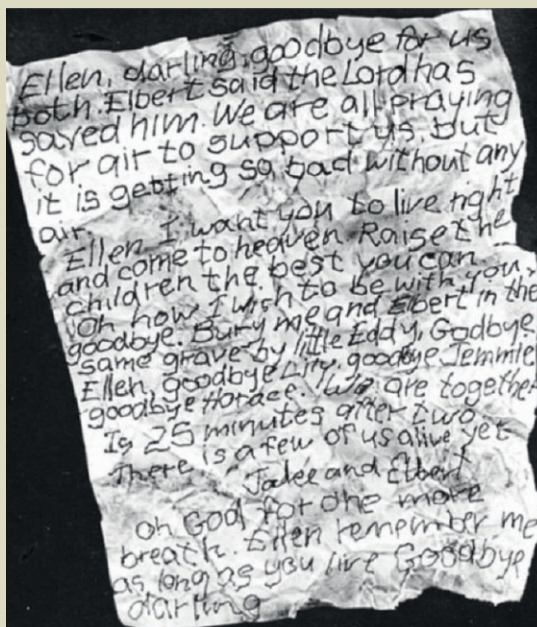
Psychische Belastungen

Die Forscher bei NIOSH betonen in ihren Veröffentlichungen und Trainingsunterlagen, dass die Selbstrettung und Flucht zum Tage die beste Rettungsmaßnahme im Fall eines Grubenunglücks ist. Brnich und andere (8) weisen darauf hin, dass eingeschlossene Bergleute vor äußerst schwierige Entscheidungen gestellt werden, wenn sie vor der Wahl stehen, in einer Fluchtkammer zu warten oder zu versuchen, einen sicheren Grubenteil oder die Tagesoberfläche zu erreichen. In den meisten Unglückssituationen haben eingeschlossene Bergleute nur sehr beschränkte Informationen, selbst wenn noch Telefonverbindungen zum Tage funktionieren.

Es ist kaum Forschung darüber möglich, welchen psychologischen und physischen Belastungen Bergleute in Fluchtkammern im Ernstfall ausgesetzt sind. Es gibt einige Briefe und Tagebucheinträge, die eingeschlossene Bergleute kurz vor ihrem Tod verfasst haben und die ihre Erlebnisse eindrucksvoll zeigen. Bild 6

Text of the letter:

Ellen darling, good-bye for us both. Elbert said the Lord has saved him. We are all praying for air to support us; but it is getting so bad without any air. Ellen, I want you to live right and come to heaven. Raise the children the best you can. Oh, how I wish to be with you, goodbye. Bury me and Elbert in the same grave by little Eddy, Goodbye Ellen, goodbye Lilly, goodbye Jimmie, goodbye Horace. We are together. Its 25 minutes after two. There is a few of us alive yet. Jake and Elbert
Oh God, for one more breath. Ellen remember me as long as you live. Good-bye darling.



Wortlaut des Briefs:

Liebste Ellen, Lebewohl für uns beide. Elbert sagt, der Herr habe ihn gerettet. Wir alle beten um frische Atemluft, aber es wird immer schlimmer ohne Luft. Ellen, ich möchte, dass du rechtschaffen lebst und in den Himmel kommst. Ziehe die Kinder gross, so gut du kannst. Oh, wie sehr wünschte ich bei dir zu sein, Lebewohl. Beerdigt mich und Elbert im selben Grab beim kleinen Eddy. Lebewohl Ellen, Lebewohl Lilly, Lebewohl Jimmie, Lebewohl Horace. Wir sind zusammen. Ein paar von uns leben noch. Jake und Elbert
Lieber Gott, gib mir noch einen Atemzug. Ellen, denk an mich, solange du lebst. Auf Wiedersehen, mein Liebling.

Fig. 6. A letter of good-bye written by a miner trapped underground after the Fraterville Mine explosion in Tennessee, 1902. // Bild 6. Abschiedsbrief eines nach der Explosion im Bergwerk Fraterville in Tennessee im Jahr 1902 eingeschlossenen Bergmanns. Photo/Foto: MSHA

Little if any research has been done to investigate the psychological effects of being sheltered or trapped in a refuge chamber. There are accounts of miners who wrote letters to their loved ones, knowing they might die underground. Figure 6 shows as example a letter saying good-bye to his family, written by miner Jacob Vowell to his wife, Ellen. Vowell and his son Elbert were among 216 miners who died in the Fraterville/Tennessee coal mine explosion in 1902.

One can hardly imagine the agony that miners experience waiting for rescue in a refuge chamber, not knowing if they will be found within the 96 h of life support that the chamber provides. Research is urgently needed to help mine operators and regulators better understand the decision making process of whether to escape or to shelter. Also, researchers need to work on understanding the mental stresses miners experience when they are inside a refuge, awaiting rescue.

Summary and Conclusions

Mine refuge chambers have been mandated in US coal mines since 2009. The 2006 MINER Act (10) included provisions for the NIOSH to conduct research on refuge chambers. This research which revealed a potential for heat build-up inside the chambers in mines with higher ambient temperatures as well as risks of air contamination through incomplete purging of the airlock chamber. The required resistance to fires and explosions has not yet been researched, as the US lack a facility to conduct full scale explosion testing. Research is only beginning on the psychological questions of making the decision whether to shelter or to escape and the mental stresses of staying in a chamber for up to 96 h.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Steadman, R. G.: The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. 1979. *J. Appl. Meteor.*, 18, pp 861-873.
- (2) Page, N. G.; Watkins, T. R.; Caudill, S. D.; Cripps, D. R.; Godsey, J. F.; Maggard, C. J.; Moore, A. D.; Morley, T. A.; Phillipson, S. E.; Sherer, H. E.; Steffey, D. A.; Stephan, C. R.; Stoltz, R. T.; Vance, J. W.; Brown, A. L.: Report of Investigation, Fatal Underground Mine Explosion, April 5, 2010, Upper Big Branch Mine-South, Performance Coal Company, Montcoal, Raleigh County, West Virginia, ID No. 46-08436, Mine Safety and Health Administration, Arlington, VA, 2011, 965 pp.
- (3) Bauer, E. R.; Matty, T. J.; Thimons, E. D.: Investigation of Purging and Airlock Contamination of Mobile Refuge Alternatives. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2014-116, RI 9694, 2014. Pittsburgh, PA, 61 p.
- (4) Brune, J. F.: Dissipating the heat inside mine refuge chambers, Proceedings, 14th North American Mine Ventilation Symposium, The University of Utah, Salt Lake City, UT, June 2012, pp 297-304.
- (5) Bauer, E. R.; Kohler, J. L.: Update on Refuge Alternatives: Research, Recommendations, and Underground Deployment, SME Annual Meeting and Exhibit, February 22-25, Denver, Colorado, preprint 09-013. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2009; 7p.
- (6) Yantek, D. S.: Investigation of Temperature Rise in Mobile Refuge Alternatives. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2014-117, RI 9695, 2014. Pittsburgh, PA, 73 p.

zeigt einen Abschiedsbrief von Jacob (Jake) Vowell, der mit seinem Sohn Elbert und 214 weiteren Bergleuten in der Explosion der Grube Fraterville ums Leben kam.

Man kann sich nur schwer die furchtvolle Gedankenwelt eingeschlossener Bergleute vorstellen, die in einer Fluchtkammer ausharren, ohne Gewissheit, ob sie innerhalb von 96 h gefunden und gerettet werden können. Weitere Forschungsarbeit ist dringend nötig, damit Bergwerksbetreiber und Bergbehörden bessere Informationen über den Entscheidungsprozess erhalten, ob Selbstrettung oder Warten in der Fluchtkammer richtig sind. Forscher sollten dabei insbesondere auch die psychologischen Aspekte des Aufenthalts in einer Fluchtkammer berücksichtigen.

Zusammenfassung und Ergebnisse

Fluchtkammern sind seit dem Jahr 2009 in allen Kohlegruben der USA vorgeschrieben. Das MINER-Act-Gesetz aus dem Jahr 2006 schreibt Forschung zur Entwicklung und Verbesserung von Fluchtkammern für das NIOSH vor. Diese Forschung hat bislang gezeigt, dass es in Fluchtkammern zu übermäßiger Wärmeentwicklung kommen kann, wenn die Umgebungstemperatur der Kammer zu hoch ist. Darüber hinaus besteht das Risiko, dass die Luftschleusen der Fluchtkammern bei CO-Gehalten über 400 ppm nicht ausreichend freigespült werden können. Die gesetzlich geforderte Widerstandsfähigkeit gegen Brandhitze und Explosionsdruck konnte bisher experimentell nicht nachgewiesen werden, da derzeit in den USA keine geeignete Explosionsversuchsstrecke zur Verfügung steht. Die Forschung zur Beurteilung der psychologischen Belastung von für einen Zeitraum von mehr als 96 h in einer Fluchtkammer eingeschlossenen Bergleuten und deren Entscheidungsprozesse steht noch am Anfang.

- (7) Weiss, E. S.; Cashdollar, K. L.; Harteis, S. P.; Shemon, G. J.; Beiter, D. A.; Urosek, J. E.: Explosion Effects on Mine Ventilation Stoppings. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2009-002, RI 9676, 2008. Pittsburgh, PA, November 2008. 117 p.
- (8) Brnich, Jr., M. J.; Vaught, C.; Kowalski-Trakofler, K. M.: Man Mountain's Refuge: Refuge Chamber Training Instructor's Guide and Trainee's Problem Book. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2011-195, RI 9685, 2011. Pittsburgh, PA, 38p.
- (9) Trackemas, J. D.; Thimons, E. D.; Bauer, E. R.; Sapko, M. J.; Zipf, R. K.; Schall, J.; Rubinstein, E.; Finfinger, G. L.; Patts, L. D.; LaBranche, N.: Facilitating the use of built-in-place refuge alternatives in mines. US Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2015-114, RI 9698, 2015. Pittsburgh, PA, 92p.
- (10) 30 CFR: United States Code of Federal Regulations, Title 30, US Government Printing Office, Washington DC, 2016.

Author / Autor

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Brune, Colorado School of Mines, Golden/USA