Safety and Health in Mining

Safe and healthy jobs in mining, worldwide: that is the aim of the International Section of the ISSA on Prevention in the Mining Industry, in short ISSA Mining. As a not-for-profit organization, ISSA Mining unites operators, sector associations, experts and regulators to improve occupational safety and health as well as emergency response by means of international exchange on good practice, proven strategies and training concepts. ISSA Mining is one of thirteen prevention sections of the Social Security Association, headquarters in Geneva.

In this section of Mining Reporter we will regularly introduce innovations, new findings and trends from an international point of view, helping to design mining work safer and health supporting.

Do you know of more efficient examples? We are looking forward to your advice as well as your feedback on this section. Send an e-mail to helmut.ehnes@issa-mining.org.

Sicherheit und Gesundheit im Bergbau

Sichere und gesunde Arbeitsplätze im Bergbau, weltweit: das ist das Ziel der International Section of the ISSA on Prevention in the Mining Industry, kurz ISSA Mining. Als Non Profit-Organisation vereint ISSA Mining Unternehmen, Branchenverbände, Experten sowie Regelsetzer, um durch den internationalen Austausch von Guter Praxis, bewährten Strategien und Ausbildungskonzepten den Arbeitsschutz und das Rettungswesen zu verbessern. ISSA Mining ist eine von dreizehn Sektionen für Prävention unter dem Dach der International Social Security Association mit Sitz in Genf.

In dieser Rubrik stellen wir Ihnen regelmäßig Innovationen, neue Erkenntnisse und Trends aus dem internationalen Umfeld vor, die dabei helfen, die Arbeit im Bergbau sicherer und gesundheitsgerecht zu gestalten.

Kennen Sie weitere wirksame Beispiele aus der Praxis? Über Ihre Hinweise freuen wir uns ebenso wie über Rückmeldungen zu dieser Rubrik. Senden Sie eine E-Mail an: helmut.ehnes@issa-mining.org.

Felix Lehnen

Technical Considerations for the Rescue of Miners Trapped at Great Depth

Long-lasting entrapments are a rare but serious issue in mine rescue. Especially at great depth, such scenarios lead to complex rescue missions, even in modern mining. The first challenge is to locate the trapped miners and to establish communication. Depths of more than 1,500 m go beyond technological feasibility and thus require alternative approaches. With respect to drilling technology, the depth of trapped miners defines the overall duration of the mission. To physically and mentally survive such a long-lasting entrapment also requires innovative provisions underground. Thus, this paper provides assessments of great depths' constraints on relevant mine rescue technology and will discuss possible solutions for a worst case situation of miners being trapped underground.

Technische Überlegungen zur Rettung verschütteter Bergleute in großen Teufen

Langandauernde Verschüttungen von Bergleuten unter Tage sind eine eher seltene, aber dennoch ernstzunehmende Problemstellung. Besonders in großen Teufen führen solche Szenarien zu komplexen Rettungsmissionen, die selbst im modernen Bergbau eine technische Herausforderung darstellen. Die ersten Maßnahmen hierbei gelten der Ortung der eingeschlossenen Personen und der Herstellung eines Kommunikationswegs. Große Teufen von mehr als 1.500 m überschreiten die Grenzen der technischen Machbarkeit und erfordern daher alternative Ansätze. Die nach der Ortung eingesetzte Bohrtechnik zur Rettung der Bergleute definiert schlussendlich die gesamte Dauer der Rettungsarbeiten. Das physische und psychische Überleben unter Tage über einen solch langen Zeitraum erfordert auf Seiten der Verschütteten ebenfalls neue technische Ansätze und Vorkehrungen. Die vorliegende Arbeit bietet eine Bewertung der technologischen Beschränkungen, die große Teufen für die Grubenrettung mit sich bringen, und diskutiert darüber hinaus Lösungen für das betrachtete Worst-Case Szenario verschütteter Bergleute.

1 Introduction

Mine rescue teams world-wide are facing various challenges and are prepared for diverse tasks (1, 2). Regular duties are first aid, fire-fighting, or the work in hazardous atmospheres. Out of this variety of duties, this paper deals with the scenario of long-lasting entrapments. Such incidents have occurred and have been solved over decades. However, more than 95 % of such cases took place not deeper than 1,500 m. Mining in the 21st century goes deeper. Great depths make the scenario of trapped miners a major and even more complex rescue mission than ever before. That is especially the case for a considered worst case which would be a total blockage of any access to the underground.

The European I²Mine project has faced this overall challenge of great depth and developed "Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future". Here, great depth has been defined as deeper than 1,500 m. Throughout five years, research in various fields of mining engineering and technology has been conducted by a multi-national network. One task focused on the scenario of miners trapped underground at great depth. This task of "deep mine rescue" was conducted at RWTH Aachen University in cooperation with Sweden's TU Lulea and Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck/Germany.

This paper addresses the question whether today's mine rescue technology is applicable at great depth. The according assessments will focus on the key technologies during a rescue of trapped miners. The first challenge would be to locate the trapped miners and to establish a means of communication to them. To ensure the physical and psychological survival over an extended period of time, the supply of nutrition, materials, medicine etc. is then of outmost importance. Both supply and rescue of the miners may rely on deep drilling operations which define the total duration of the rescue mission.

Having identified technical borders due to great depth, this paper presents feasible updates as well as organizational alternatives to critical technology. Recommendations are provided for an effective application. Furthermore, clear recommendations for further research and development activities are given with respect to the overall scenario of miners trapped underground. Thus, this paper contributes to improved preparedness for a major mine rescue mission in Europe and abroad.

1.1 Entrapments

The rescue of trapped miners is a rather rare mission for mine rescue teams. However, these incidents can lead to complex and long-lasting missions. The "miracle of Lengede" (1963) is still present to a lot of people in Germany. The rescue of the 33 miners in Chile (San José 2010) even got world-attention. Long-lasting rescue missions of this type are shown in red colour in Figure 1. In contrast, the yellow and green coloured scenarios are more of routine character to mine rescue teams.

Especially major roof collapses and inundations can cause such entrapments. These incidents can destroy or block miners' escape-ways underground. If that affects the only means of escape, miners can become trapped underground. Although modern mining operations follow the general principle of providing a second means of escape, dead-end situations still have to be

1 Einführung

Das Grubenrettungswesen steht weltweit vor einer Reihe von Herausforderungen und ist für eine Vielzahl von Aufgaben ausgerüstet (1, 2). Regelmäßige Aufgabenstellungen umfassen Erste Hilfe, Brandbekämpfung oder die Arbeit unter Atemschutz. Aus dieser Vielzahl von Aufgabenstellungen heraus befasst sich die vorliegende Arbeit mit dem Szenario langandauernder Verschüttungen. Solche Vorkommnisse beschäftigen das Grubenrettungswesen seit Jahrzehnten. Allerdings fanden 95 % der bekannten Erfolgsgeschichten in weniger als 1.500 m Teufe statt. Solche Teufen werden aber im modernen Bergbau zunehmend überschritten. Insbesondere für den betrachteten Worst-Case von großräumigen Streckenbrüchen sind große Teufen ein Faktor, der die Rettung erheblich verkompliziert.

Das europäische I²Mine-Projekt hat sich mit den Herausforderungen dieser großen Teufen auseinandergesetzt und entwickelte „Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future". Große Teufen wurden hier als größer 1.500 m definiert. Während der letzten fünf Jahre wurde entsprechende Forschung in einer Reihe von Bereichen der Bergbautechnik von einem internationalen Netzwerk durchgeführt. Eine der Aufgabenstellungen befasste sich mit dem Szenario von unter Tage verschütteten Personen. Dieser Themenkomplex „Deep Mine Rescue" wurde von der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen in Zusammenarbeit mit der schwedischen TU Lulea und der Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck, bearbeitet.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, inwiefern heutige Grubenrettungstechnologien hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in großer Teufe Grenzen aufweisen. Die entsprechenden technischen Untersuchungen konzentrieren sich hierbei auf die Schlüsseltechnologien zur Rettung verschütteter Bergleute. Die erste Herausforderung ist die Ortung der Verschütteten unter Tage und die Herstellung eines Kommunikationswegs. Um die physische und psychische Durchhaltefähigkeit der Bergleute über einen ausgedehnten Zeitraum sicherzustellen, ist die Versorgung mit Nahrungsmitteln, Ausrüstung und Medizin von herausragender Bedeutung. Sowohl die Versorgung als auch die Rettung der Bergleute hängen stark von der Durchführung der notwendigen Bohrungen ab, deren Dauer den entscheidenden Einfluss auf die Gesamtdauer der Rettungsmission darstellt.

In Bezug auf identifizierte technologische Grenzen in großer Teufe werden in der vorliegenden Arbeit sowohl mögliche Verbesserungen an bestehendem Gerät aufgezeigt als auch organisatorische Alternativen abgeleitet. Weiterhin werden Empfehlungen für eine effektive Anwendung von Schlüsseltechnologien gegeben. Neben der Identifikation weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfs trägt die vorliegende Arbeit so dazu bei, die Vorbereitung auf Grubenunglücke großer Dimension weiter zu verbessern.

1.1 Einschluss von Bergleuten unter Tage

Die Rettung von verschütteten Bergleuten ist eine eher seltene Aufgabe für Grubenwehren. Trotzdem stellen Zwischenfälle dieser Art komplexe Problemstellungen dar und können langwierige Rettungsmissionen erfordern. Das „Wunder von Lengede" im Jahr 1963 ist insbesondere in Deutschland vielen Menschen im Gedächtnis geblieben und die Rettung von 33 eingeschlossenen

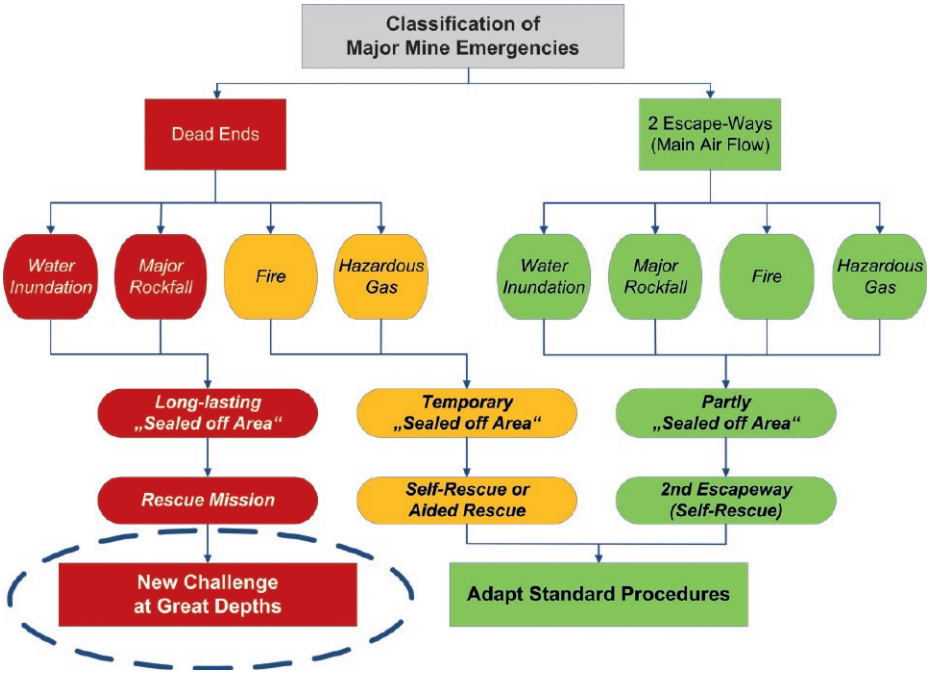

Fig. 1. Classification system for major mine rescue missions (after 3).
Bild 1. Klassifizierungsschema für großangelegte Grubenwehreinsätze (nach 3).

considered (3). Especially the classic mine development work in road-heading poses that situation by its very nature.

Mine development work is an integral part of every underground mining operation. Especially exploration drifts may form long dead-ends without any alternative escape-way. Furthermore, certain modern mining operations apply single drifts for preparing or under- and over-cutting defined parts of the deposit. Such drifts in sub-level caving or stoping operations are shorter than the aforementioned exploration drifts but still pose the hazard of a dead-end.

1.2 Great Depth

Increasing depth is a global trend in mining. World-wide, the deepest mines operate at 4,000 m in South Africa whereas Canada is mining at 3,000 m (4). Europe's deepest mines (4)are Ibbenbüren (hard coal, Germany), Pyhäsalmi (copper/zinc, Finland), and Sigmundshall (potash, Germany). They currently operate at about 1,500 m. When mines expand into greater depth, the complexity of their underground workings rises. A more complex human-nature system also holds increased uncertainty regarding H&S-related variables such as fire-loads, escape-ways or ventilation networks.

Taking the introduced scenario of miners trapped underground into consideration, especially the expected increase of the overall mission duration poses new dimensions to mine rescue. Figure 2 compiles the influence of great depth on the complexity of mine rescue. It can be seen that great depths create significant challenges which go beyond today's state of the art in mine rescue technology and strategies.

1.3 Worst Case Consideration

Mine rescue drilling from surface has to be seen as the worst case for scenarios at great depth due to their long and life-critical duration. In such situations, the depth of the trapped miners directly influences the necessary technical approaches during the rescue mission. Thus, mine rescue teams try to use any safe access to go underground whenever possible. Starting a rescue mission

Bergleuten in San José (Chile) zog im Jahr 2010 weltweite Aufmerksamkeit auf sich. Bild 1 zeigt solche langandauernden Rettungsmissionen in roter Farbe. Die grün und gelb hinterlegten Szenarien können hingegen eher als Routineaufgaben von Grubenwehren angesehen werden.

Konkret können Streckenbrüche und Wassereinbrüche die Fluchtwege von Bergleuten für lange Zeit unpassierbar machen. Obwohl in modernen Bergwerken grundsätzlich mindestens zwei Fluchtwege vorgesehen sind, müssen beispielsweise im Streckenvortrieb Situationen berücksichtigt werden, in denen nur ein Fluchtweg zur Verfügung steht (3).

Der Streckenvortrieb ist ein unverzichtbarer Teil jedes untertägigen Bergwerks. Insbesondere Explorationsstrecken können lange Abschnitte ohne zweite Fluchtmöglichkeit erzeugen. Darüber hinaus werden für einige moderne Abbaumethoden Lagerstättenteile durch Teilsohlen vorgerichtet. Diese Teilsohlen finden sich beispielsweise im Bruch- oder Weitungsbau und sind weit weniger lang als in der Exploration, jedoch bergen sie immer noch das Risiko mangelnder Fluchtwegalternativen.

1.2 Große Teufen

Weltweit verlagert sich die Rohstoffgewinnung in immer größere Teufen. Das tiefste Bergwerk in Südafrika arbeitet in einer Teufe von mehr als 4.000 m, während in Kanada 3.000 m erreicht werden (4). Die tiefsten Bergwerke Europas (4), Ibbenbüren (Anthrazitkohle, Deutschland), Pyhäsalmi (Kupfer/Zink, Finnland) und Sigmundshall (Kalisalz, Deutschland) bauen auf etwa 1.500 m ab. In größer werdenden Teufen nimmt grundsätzlich die Komplexität der Grubenbaue zu. Die komplexe Interaktion von Mensch und Natur führt zu einer geringeren Beherrschbarkeit von Einflüssen auf die Arbeitssicherheit, beispielsweise die Brandlast der Grubenbauten, die Verfügbarkeit von Fluchtwegen oder die Frischwetterversorgung.

Insbesondere in Bezug auf die Rettung von verschütteten Bergleuten stellen die zunehmende Teufe und die hieraus resultierende erhöhte Dauer der Rettungsmaßnahmen die Gruben-

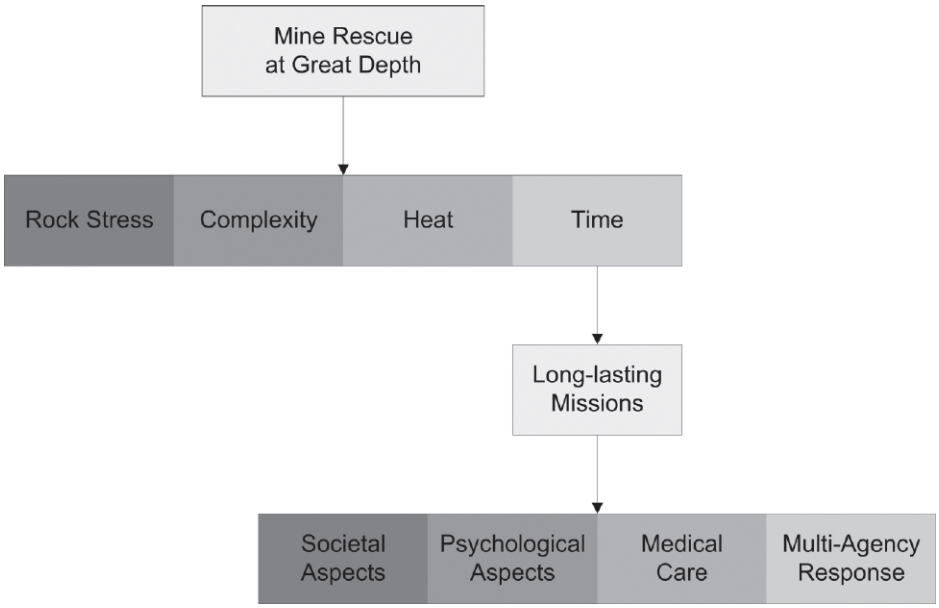

Fig. 2. New dimensions for mine rescue as a result of great depth (after 4).
Bild 2: Einfluss großer Teufen auf die Komplexität von Grubenwehreinsätzen (nach 4).

like drilling underground instead of on surface can save valuable time. European underground mines commonly provide at least two independent connections (shafts, adits, ramps) to the surface. These act as independent means of escape for the miners and as emergency access points for mine rescue teams.

If safe and accessible, going underground would also be the first rescue strategy with respect to entrapments. This option makes the rescue almost independent from the actual depth. E.g. if only one sublevel collapses, neighbouring sublevels might be the closest access points for mine rescue teams underground. The vertical distance of sublevels within European caving and stoping operations usually is about 20 to 40 m (4). An alternative to vertical drilling is horizontal road heading, e.g. re-driving a collapsed roadway. However, the following considerations focus on the worst case assumption of a rescue mission starting on surface.

2 Mine Rescue Technology

Major mine rescue missions rely on several technical steps (Figure 3). First, the trapped miners have to be located and communication to them has to be established. Having identified their location, drill holes are prepared to first supply and second rescue the trapped miners. While waiting for communication and supplies, the trapped miners have to sustain underground. Their survival might be supported by special rescue chambers as a preventive measure.

2.1 Location and Communication

Major mine emergencies generate significant demand for information. The mine rescue management on surface needs to know whether critical mine infrastructure is still running, what kind of hazardous gases occur or if rock stability is affected. Whenever

Fig. 3. Major technical steps during a rescue of trapped miners.
Bild 3: Technische Hauptmaßnahmen zur Rettung verschütteter Bergleute.

wehren vor neue Herausforderungen. Bild 2 setzt die Einflüsse von großen Teufen auf die Komplexität von Grubenwehreinsätzen in Zusammenhang. Es ist festzuhalten, dass große Teufen das Grubenrettungswesen vor signifikante Herausforderungen stellt, die über den gegenwärtigen Stand der Technik hinausgehen.

1.3 Betrachtung der Worst-Case Situation

Als Worst Case-Situation wird eine notwendige Rettungsbohrung von über Tage angesehen. In einer solchen Situation beeinflusst die Teufe der Verschütteten direkt die technologischen Voraussetzungen für eine Rettungsmission. Aufgrund der Relevanz des Zeitfaktors für das Überleben der Verschütteten werden zunächst aber für die Rettungsmaßnahmen alle zur Verfügung stehenden sicheren Zugänge nach unter Tage in Betracht gezogen. Eine unter Tage angesetzte Bohrung kann wertvolle Zeit sparen, die für das Überleben der Verschütteten entscheidend sein kann. Europäische Bergwerke verfügen in aller Regel über zwei unabhängige Verbindungen – Schächte, Rampen, Wendeln – nach über Tage. Diese dienen u.a. als unabhängige Fluchtmöglichkeiten und als Notfallzugang für Grubenwehrtrupps.

Falls möglich starten Rettungsmissionen also von unter Tage aus in Richtung verschütteter Personen. Diese Option macht die Rettungsarbeiten nahezu unabhängig von der tatsächlichen Teufe der Verschüttung. Beispielsweise ist im Fall des Zusammenbruchs nur einer Teilsohle üblicherweise die benachbarte Teilsohle der nächstgelegene Zugangs- und Ansatzpunkt. In europäischen Bergwerken bewegt sich die vertikale Distanz zweier Teilsohlen im Weitungs- oder Bruchbau gewöhnlich im Bereich von 20 bis 40 m (4). Eine Alternative zum vertikalen Bohren bietet unter Tage auch die horizontale Bohrung entlang oder das Wiederaufwältigen einer zusammengestürzten Strecke. Nichtsdestotrotz fokussieren sich die nachfolgenden Abhandlungen auf die Worst Case-Annahme, dass eine Rettungsmission ohne Zugang nach unter Tage gelingen muss.

2 Technische Rettungsansätze

Langandauernde Grubenrettungsmissionen bauen auf mehreren technischen Schritten auf (Bild 3). Zunächst müssen die verschüt-

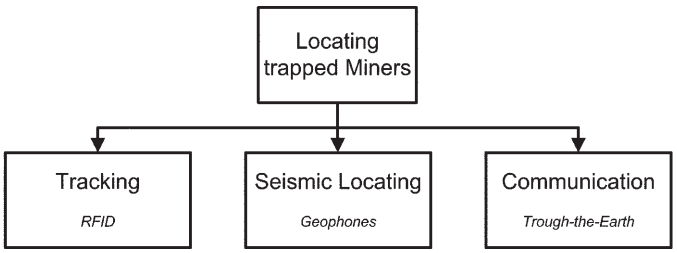

Fig. 4. Technical options to locate miners trapped underground (after 4).
Bild 4. Technische Ansätze zur Ortung verschütteter Bergleute (nach 4).

miners are still underground, the most crucial information would be the exact location of those trapped miners. In a second step, a means of communication has to be established to those miners. Within this paper, these two important technological challenges of locating and communicating are regarded as one major technical step, since considerable overlapping can be seen in the related technological challenges and solutions.

Figure 4 distinguishes three principal ways of locating trapped miners. The easiest way would be a direct communication like telephone or radio calls. The required infrastructure may however be destroyed by the initial event which leads to the need for special through-the-earth (TTE) emergency communication. Without any voice communication, the detection of seismic signals from the trapped miners may remain as the classic way of locating miners. An alternative approach is tracking of miners during their regular work as it can be achieved by modern, wireless technology.

Under the impression of fatal mine accidents in the U.S. 2006, the so-called Miner Act led to American research efforts in mine safety, also with a particular focus on tracking and two-way communication systems. A clear need for research has been identified but still remains in that stage of recommendations since then (5). The approach within I²Mine was to specify that need for research after an assessment of the state of the art against the global challenge of great depth. In addition, Figure 4 represents the derived recommendation to apply parallel tactics and opportunities to locate miners trapped underground whenever possible. In the following, the three main strategies of tracking, seismicity and communication are described and assessed in more detail.

2.1.1 Tracking

Information technology (IT) is rapidly changing, in everyday life as in underground mines. Underground, wireless point-to-point and mesh networks are currently replacing leaky feeder and cable-based networks (6). Such existing networks of mines' infrastructure can also be used for a real-time tracking of machinery and personnel: Radio frequency identification (RFID) tags or Wifi-applications send ultra-high frequency (UHF) signals to several readers. That allows a relatively accurate tracking and location when such data is projected on mine plans.

To send the short signal, the tags need a source of energy which might be taken from the cap lamp's battery. The range of such mobile RFID units is about 100 m (7). The signals are received by a fix mesh network of nodes and modems. While the transmission of the signal from point to point is wireless, the power

teten Bergleute geortet und Möglichkeiten zur Kommunikation mit ihnen geschaffen werden. Ist die Position ermittelt, so werden Bohrungen niedergebracht, die zunächst die Versorgung der Bergleute mit lebenswichtigen Gütern sicherstellen sollen und später der eigentlichen Rettung dienen. Um die Überlebenschancen der Bergleute während des Abteufens der Kommunikations- und Versorgungsbohrungen zu steigern, können präventiv spezielle Rettungskammern eingerichtet werden.

2.1 Ortung und Kommunikation

Im Falle eines Grubenunglücks ist die Beschaffung von Informationen ausschlaggebend zur Einleitung geeigneter Maßnahmen. Die Leitung der Rettungsmission benötigt verschiedenste Informationen, beispielsweise ob die essentielle Infrastruktur des Bergwerks funktionstüchtig ist, ob es zu Austritten giftigen Grubengases kommt oder ob die Standfestigkeit des Gebirges beeinträchtigt ist. Sind überlebende Bergleute unter Tage eingeschlossen, so ist die wichtigste Information die exakte Position der Verschüttung. In einem zweiten Schritt muss die Kommunikation mit den eingeschlossenen Personen aufgenommen werden. In der vorliegenden Arbeit werden diese beiden Notwendigkeiten der Ortung und der Kommunikation als eine gemeinsame zentrale Aufgabe betrachtet, da sich beide Problemstellungen in ihren technischen Anforderungen weitgehend überschneiden.

Bild 4 unterscheidet prinzipiell drei Wege der Ortung verschütteter Bergleute. Die einfachste Maßnahme wäre direkte Kommunikation mittels Telefon oder Funk. Die hierfür benötigte Infrastruktur könnte jedoch beschädigt sein, sodass spezielle through-the-earth (TTE) Kommunikation benötigt würde. Steht eine vergleichbare Sprachkommunikation nicht zur Verfügung, kann die Detektion von seismischen Wellen, die von den verschütteten Bergleuten ausgelöst werden, als Ortungsverfahren dienen. Eine weitere Alternative bietet das Tracking der Bergleute während ihrer regulären Arbeit, das durch moderne Drahtlostechnologien gewährleistet werden kann.

Unter dem Eindruck tödlicher Grubenunglücke in den USA im Jahr 2006 führte der sogenannte Miner Act zu verstärkten Bemühungen in der amerikanischen Forschung zur Sicherheit im Bergbau, insbesondere mit Augenmerk auf Tracking und Kommunikation. Der Bedarf an Forschung wurde erkannt und benannt, befindet sich jedoch seitdem immer noch weitestgehend im Status dringender Empfehlungen (5). Der Ansatz innerhalb des I²Mine-Projekts ist es, diesen Bedarf nach einem Abgleich von Technik und dem globalen Trend großer Teufen zu konkretisieren. Darüber hinaus kann aus Bild 4 die Empfehlung abgeleitet werden, möglichst mehrere Verfahren zur Ortung parallel durchzuführen. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Strategien – Tracking, Seismik und direkte Kommunikation – im Detail beschrieben und bewertet.

2.1.1 Tracking

Die Informationstechnologie (IT) verändert sich rasant, sowohl im täglichen Leben als auch im Bergbau. Unter Tage werden „leaky feeder"-Kabelsysteme durch moderne drahtlose Punkt-zu-Punkt- und Maschennetzwerke ersetzt (6). Diese in der Bergwerksinfrastruktur vorhandenen Netzwerke können für das Echtzeit-Tracking von Maschinen und Personal genutzt werden. RFID (radio

supply of the needed transceiver – a combination of transponder and receiver – is often relying on power cables. An innovative approach in underground tracking technology is reverse RFID. Here, the miners carry small, more expensive mobile readers which communicate to fixed tags (8).

Cable connections and IT might be interrupted or destroyed after major incidents. However, a log on surface will be able to show the lastly stored data when needed. This last known location of miners underground would be valuable information for mine rescue teams on surface. However, tracking of people in their day-to-day work is sometimes criticized as surveillance. But "use only in case of emergency" mechanisms would be feasible. Tracking data might be separately stored and only un-locked by a workers' representative in case of emergency. When not needed, such personal data could be deleted after a short period of time without any interpretation.

2.1.2 Seismic Locating

Seismic location systems are based on the surface detection of signals sent by the miners trapped underground. The resulting seismic waves can be detected by geophones and the evaluation of time differences can then be processed to locate the trapped miners. A high number and distribution of geophones on surface increase the chance and the accuracy of location. Even if the strength or reception of signals does not allow an exact location, detecting signals can at least provide a proof of survival and thus motivate further mine rescue efforts and strategies.

Experimental research indicates that the maximum detectible depth for such seismic signals from the underground to surface ranges from 600 m (9) to 800 m (10). This distance might be increased from surface by placing geophones in boreholes (11). Besides depth, seismic location systems are of limited use in scenarios of dead or severely injured miners who are physically not able to send any signals to surface.

2.1.3 Communication

Communicating with miners trapped underground is the most obvious way to locate them. Furthermore, means of communications are again of importance after the location and until the final rescue. One can distinguish two general types of technical mine communication systems. The primary systems comprise conventional ultra-high frequency (UHF; 150 MHz to 6 GHz) radio handhelds which are based on leaky feeders or node-to-node networks (12). Secondary communication provides alternatives for emergencies by non-wearable large antennas using medium frequency (MF; 300 kHz to 3 MHz) or TTE systems at very low frequencies (VLF; 10 Hz to 5 kHz) (12).

Primary communication systems like radio and telephone are mandatory infrastructure in today's underground mines. They all rely at some point on cables or wire. To increase stability and survivability it might be thinkable to place phone cables under the floor of mine road ways and to protect telephones by solid boxes or refuge chambers (13). Leaky feeder systems use "coaxial cables that are able to emit, i.e. leak, and receive, i.e. feed radio signals" (14). They have the advantage of being used by normal hand-held radios which on the other hand again rely on a source of power, e.g. a limited battery.

frequency identification) Transponder oder WLAN-Geräte senden UHF-Signale (ultra high frequency) zu verschiedenen Lesegeräten. Hierdurch wird ein relativ genaues Tracking ermöglicht.

Um Signale senden zu können, benötigen die Transponder eine Energiequelle, beispielsweise die Batterien des Geleuchts. Die Signale der mobilen RFID-Einheit mit einer Reichweite von etwa 100 m (7) werden von einem installierten Maschennetz aus Knoten und Modems empfangen. Während die Übertragung des Signals vom mobilen Transponder zu fest installierten Transceivern – eine Kombination von Transponder und Empfänger – drahtlos erfolgt, benötigt der Transceiver eine stationäre Energieversorgung über ein Stromkabel. Ein innovativer Ansatz im untertägigen Tracking ist Reverse-RFID, bei welcher der Bergmann einen kleinen, mobilen Empfänger mit sich trägt, der mit festen Transpondern kommuniziert (8).

Obwohl Kabelverbindungen und IT durch einen Zwischenfall beeinträchtigt und unterbrochen werden können, ist es möglich, die unmittelbar vor dem Ereignis empfangenen Daten über Tage zu speichern. Die letzte bekannte Position der Bergleute unter Tage ist eine wichtige Information für die Planung von Rettungsarbeiten. Bedenken hinsichtlich der permanenten Mitarbeiter-Überwachung könnte durch eine „Nur im Notfall"-Regelung begegnet werden. Gespeicherte Daten würden dann nur im Fall eines Notfalls abgerufen und ansonsten nach einer gewissen Zeitspanne ohne weitere Nutzung gelöscht.

2.1.2 Seismik

Seismische Ortungsverfahren basieren auf der Detektion von seismischen Wellen, die von den Verschütteten verursacht werden. Diese werden von Geophonen aufgenommen und erlauben nach Auswertung der Zeitabstände Rückschlüsse auf die Position der Bergleute. Eine höhere Anzahl von Geophonen über Tage vergrößert die Genauigkeit der Ortung. Selbst wenn die seismischen Wellen keine exakte Ortung erlauben sollten, liefern sie doch den Beweis für Überlebende unter Tage und legitimieren so weitere Rettungsbemühungen.

Erfahrungen aus experimenteller Forschung deuten darauf hin, dass die maximale Teufe, die die Detektion dieser Art seismischer Wellen zulässt, zwischen 600 m (9) und 800 m (10) liegt. Diese Distanz ließe sich vom Tage her durch die Platzierung von Geophonen in Bohrlöchern vergrößern (11). Neben der Teufe ist der Einsatz von Geophonen in Szenarien limitiert, in denen tote oder schwer verletzte Personen nicht in der Lage sind, Signale zu senden.

2.1.3 Kommunikation

Die Kommunikation mit eingeschlossenen Bergleuten ist der naheliegende Weg zu ihrer Ortung. Darüber hinaus ist die Kommunikation auch über die Lokalisierung hinaus bis zur tatsächlichen Rettung von herausragender Bedeutung. Hier ist grundsätzlich zwischen zwei Arten der Kommunikation in Bergwerken zu unterscheiden. Die Erste bilden konventionelle, tragbare UHF-Funkgeräte (150 MHz bis 6 Ghz), die beispielsweise auf „Leaky Feeder"-Systemen basieren (12). Bei der zweiten Kommunikationsmethode handelt es sich um stationäre MF-Antennen (medium frequency; 300 kHz bis 3 MHz) oder TTE-Systeme, die auf sehr niedrigen Frequenzen senden (VLF, very low frequency; 10 Hz bis 5 kHz) (12).

An arising trend in underground emergency communication is the use of Medium Frequency (MF). MF requires much less active radio elements than leaky feeders. Furthermore, a "parasitic propagation" allows the radio signal to propagate via broken power cables or other metallic parts of the remaining mine infrastructure. On the other hand, the needed radios and antennas are much heavier than normal radios and are therefore only usable as emergency sets, e.g. for the work in dead-ends (7). Both, parasitic propagation and also simple seismic signals could be facilitated by providing solid steel bars on the floor of dead-end drifts. They could be simply installed as a preventive measure during the development of a drift.

Direct wireless communication from surface teams to underground miners would solve both the communication and the location challenge. Such TTE communication can be achieved by extremely low electromagnetic waves or fields through the rock. Some hundred meters of rock can be penetrated with a loop antenna on surface and a power source of 1.5 kW (15). Since such an energy source cannot be considered as available in underground emergency situations, only one-way messaging (paging) can be seen as state of the art. Simple one-way text messaging is feasible using the personal emergency device (PED). The Canadian MineTrex emergency communication system allows mine rescue teams to connect to remaining infrastructure. VitalAlert's Canary system even enables two-way communication through up to 300 m of rock (4).

The antenna length is proportional to the systems' capability. Also lower frequencies allow greater distances but reduce the achievable quality and content of a message at the same time. The maximum vertical depth is 600 m reached by a Lockheed Martin prototype in the USA. The test focused on a simple text message via a digital large loop magnetic field (16). Besides distance (depth), also the conductivity of the rock type and different sources of electrical noise influence the performance of TTE. Thus, two-way TTE communication cannot be considered as feasible at the moment with respect to great depth. However, it is another option to be applied when sending signals through boreholes or to connect to undamaged parts of underground communication infrastructure. Special equipment would have to be kept by every miner working in a dead-end as a personal preventive measure.

2.1.4 Alternative Locating

Tracking, seismic location and communication are technical approaches to locate miners trapped underground. In addition, great depths, unforeseen events and the vulnerability of technical equipment require alternatives ready to use in emergency. Besides technical also organizational and personal (TOP) measures must be considered. Figure 5 transfers this general Health & Safety principle of TOP to the field of locating trapped miners:

hnology, also drilling has proven to be a successful location method. Drilling operations shall be prepared by considering organizational and personal search indicators as much as possible: Shift plans and recorded tracking data can be used to determine the most probable location of trapped miners. In case of inundation or hazardous gases, also survivable spots in inclining dead-ends, which can form air pockets, can be identified by mine

Primäre Kommunikationssysteme wie Funk und Telefon sind in modernen Bergwerken unverzichtbar. Beide Systeme benötigen in gewissem Maß eine stationäre Kabelinstallation, die im Fall von Gebirgsschlägen beschädigt werden kann. Als vorbeugende Maßnahme sind eine Verlegung der Verkabelung in der Strosse oder eine Verwendung von stabilen Telefonboxen oder Fluchtkammern zum Schutz der Geräte denkbar (13). Sogenannte Leaky Feeder-Systeme basieren auf unvollständig isolierten Kabeln (14), die in der Lage sind, über ihre Länge Funksignale auszusenden (leak) und zu empfangen (feed). Der Vorteil liegt hier in der Benutzung tragbarer Funkgeräte, die allerdings auf eine Energiequelle, beispielsweise eine Batterie, angewiesen sind.

Ein aufkommender Trend in untertägiger Notfallkommunikation ist die Nutzung von Mittelfrequenzen. Diese benötigen weit weniger aktive Bauteile als Leaky Feeder und können darüber hinaus Funksignale über metallische Strukturen in der verbleibenden, beschädigten Infrastruktur des Bergwerks übertragen („parasitäre Übertragung"). Durch das hohe Gewicht der benötigten Mittelfrequenzantennen sind diese jedoch nicht tragbar. Hier wäre die Nutzung als Notfallinstallation für die Arbeit in Streckenvortrieben denkbar (7). Sowohl die parasitäre Übertragung als auch die Übertragung von seismischen Signalen könnten durch die vorsorgliche Installation von massiven Metallschienen in der Strosse während des Streckenvortriebs unterstützt werden.

Eine unmittelbare, drahtlose Kommunikation zwischen Über- und Untertage würde sowohl das Problem der Ortung als auch das der Kommunikation lösen. Solche TTE-Kommunikation durch das Gebirge kann durch die Anwendung elektromagnetischer Wellen auf sehr niedrigen Frequenzen erfolgen. Mithilfe von Rahmenantennen können mehrere hundert Meter Gestein überwunden werden. Da die Antennen allerdings eine Energiequelle in der Größenordnung von 1,5 kW benötigen, ist die Nutzung vermutlich nur als Einwegkommunikation von der Tagesoberfläche nach Untertage realisierbar (15). Einseitige Textkommunikation ist durch die Nutzung von Pagern realisierbar. Das Notfallkommunikationssystem der kanadischen Firma MineTrex ermöglicht Grubenrettungsteams die Kommunikation über die verbliebene Bergwerksinfrastruktur. Das Canary-System der Firma VitaAlert ermöglicht sogar eine Zwei-Wege-Kommunikation durch bis zu 300 m Gestein (4).

Die Länge der benötigten Antenne ist proportional zur Leistungsfähigkeit des Systems. Niedrige Frequenzen ermöglichen zwar eine Kommunikation über größere Distanzen, sind jedoch in der Qualität und dem Inhalt der Nachrichten beschränkt. Ein Prototyp der Firma Lockheed Martin erreichte eine maximale vertikale Teufe von 600 m, wobei eine einfache Textnachricht digital durch ein großes magnetisches Feld versandt wurde (16). Neben der Tiefe sind die Leitfähigkeit des Gesteins und elektromagnetisches Rauschen Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit der TTE-Kommunikation, weshalb die Zwei-Wege-TTE gegenwärtig nicht als zuverlässiges Kommunikationsmittel für große Teufen betrachtet werden kann. Trotzdem könnte TTE bei der Kommunikation durch Bohrlöcher oder zur Anknüpfung an eine intakte Kommunikationsinfrastruktur des Bergwerks zur Anwendung kommen. Für die Arbeit in Streckenvortrieben wäre eine entsprechende Ausrüstung als Sicherheitsvorkehrung notwendig.

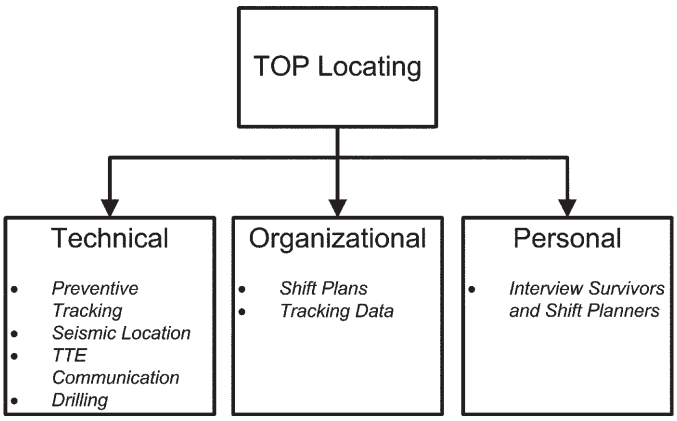

Fig. 5. Technical, organizational and personal approaches to locate trapped miners (4).
Bild 5. Technische, organisatorische und personelle Maßnahmen zur Ortung Verschütteter (4).

plans and local mining engineers. In Lengede, the trapped miners themselves used compressed air lines to create Morse signals on surface manometers by systematically opening and closing valves underground (4). Furthermore, survivors who have been able to escape the mine shall be interviewed as soon as possible to get further information regarding the situation and potential entrapments underground.

2.2 Mobile Rescue Chambers

When no escape-way is available, emergency provisions and a safe shelter are crucial preventive measures to safe miners' lifes while they have to wait for rescue. The previous scenario assessments have proven a risk for entrapments especially in dynamic road heading operations. Thus, considerations for innovative rescue chambers have been prepared and published at the AIMS 2015 conference in Aachen/Germany (17). The idea is that small and mobile chambers fit in typical cross-sections and do not disturb everyday work in road heading. Accordingly, they can be placed very close to the face and thus cover for the maximum range of the dead-end situation. Furthermore, they are mobile and easily follow the heading throughout the shifts.

As derived, long-duration rescue missions hold unknown dimensions. Regarding miners trapped underground, three important time frames are distinguished: The time until the first (communication) contact is achieved, the time until supplies can be delivered, and the time until the final rescue. Consequently, the second time frame is life-critical, since the miners have to physically survive it without any support from surface. The Xinqiao rescue (China, 2009) set a world-record of 25 days until first communication and supplies could be provided (3).

Being trapped underground causes immense stress by psychological, social and environmental (habitat) stressors and effects (18). Important know-how has been transferred from comparable isolation studies in research fields of long-duration space flight and Antarctic overwintering missions to prepare an innovative rescue chamber for psychological coping. Trapped miners as a team and the provision of communication from surface are crucial to fight the effects of isolation. Countermeasures against monotony – watching the same environment, tasting a small va-

2.1.4 Alternative Ortungsverfahren

Tracking, Seismik und direkte Kommunikation sind technische Ansätze zur Ortung verschütteter Bergleute. Zusätzlich erfordern große Teufen, unvorhersehbare Zwischenfälle und die Anfälligkeit technischer Ausrüstung im Notfall strategische Alternativen. Neben technischen müssen auch organisatorische und personelle (TOP) Maßnahmen in Betracht gezogen werden. In Bild 5 ist das generelle TOP-Prinzip aus dem Arbeitsschutz in Bezug auf die Ortung verschütteter Bergleute dargestellt.

Im technischen Bereich haben sich auch Suchbohrungen als aussichtsreiche Ortungsmethode erwiesen. Suchbohrungen werden unter Einbeziehung persönlicher und organisatorischer Ortungshinweise geplant und durchgeführt. Die wahrscheinlichste Position der eingeschlossenen Personen kann durch die Auswertung von Tracking-Daten und Schichtplänen eingegrenzt werden. Kommt es zu Überflutungen oder zum Austritt giftiger Grubengase, so können sich in ansteigenden Strecken Luftblasen bilden, in denen ein Überleben möglich ist. Diese Orte können durch Risswerke und ortskundige Bergingenieure identifiziert werden. In Lengede nutzten die eingeschlossenen Bergleute Druckluftleitungen, um durch systematisches Öffnen und Schließen von Ventilen Morsezeichen zu senden (4). Darüber hinaus können bereits gerettete Personen Auskunft darüber erteilen, ob und wo es möglicherweise Überlebende unter Tage geben könnte.

2.2 Mobile Rettungskammern

Wenn keine Fluchtwege zur Verfügung stehen, können vorbeugende Notfallmaßnahmen und sichere Zufluchtsorte ausschlaggebend sein für das Überleben von Verschütteten über die Dauer der Rettungsarbeiten hinweg. Die bisherigen Betrachtungen haben ein gesteigertes Risiko für den Einschluss von Personen im Streckenvortrieb gezeigt. Auf der AIMS-Konferenz 2015 in Aachen wurden Konzepte für innovative Rettungskammern vorgestellt (17). Kleine, mobile Rettungskammern können in den typischen Streckenquerschnitt integriert werden, ohne die tägliche Vortriebsarbeit zu behindern. Die Kammer sollte möglichst nah zur Ortsbrust platziert werden und dieser stetig folgen, sodass ein möglichst großer Abschnitt der „Sackgasse" abgedeckt wird.

Wie bereits gezeigt, bergen langandauernde Rettungsmissionen vielschichtige Ungewissheiten. In Bezug auf verschüttete Bergleute wird zwischen drei Zeitabschnitten unterschieden: Die Zeit, bis der erste Kontakt zu den Verschütteten hergestellt ist, die Zeit bis die Versorgung der Personen von über Tage ermöglicht ist und die Zeit bis zu ihrer endgültigen Rettung. Folglich ist der zweite Zeitraum besonders kritisch, da das physische Überleben der Verschütteten ohne äußere Unterstützung bis zur externen Versorgung gewährleistet sein muss. Die Rettung von Xinqiao (China 2009) stellte hierfür einen Weltrekord auf, als erst nach 25 Tagen die Kommunikation und Versorgung ermöglicht werden konnte (3).

Die Gefangenschaft unter Tage verursacht immensen Stress für die Betroffenen, ausgelöst durch psychologische, soziale und umgebungsbedingte Einflüsse (18). Aus vergleichbaren Situationen von Isolation, wie sie in der Raumfahrt oder bei Arktis-Überwinterungen anzutreffen sind, können wichtige Forschungsergebnisse und Know-how übertragen werden, welche die Ausgestaltung einer innovativen Rettungskammer entscheidend

riety of food, etc. for a long time – can be achieved by the chamber's design and provisions.

Thus, mobile rescue chambers can be modified and applied accordingly. The findings of integrated and innovative concepts for mobile rescue chambers can be found in the according paper (17). Table 1 compiles identified key design aspects. "Outer" features like mobility set requirements for the construction of the chamber. "Inner" design aspects describe features supporting nutrition and psychological issues. Taking these suggestions into account, re-designed and re-equipped mobile rescue chambers can provide cost-efficient support for miners trapped underground.

2.3 Small- and Large-Diameter Drilling

There are two types of mine rescue drilling operations: Small diameter (< 10 cm) pilot holes are drilled to locate, contact and support the trapped miners. Large diameter (> 40 cm) rescue drill-holes are prepared to actually free trapped miners. Drilling deeper than 2,000 m is – in general – technically feasible with both small and large diameters (4). The challenge with respect to the entrapment scenario arises with the corresponding drilling time: The time until first contact via the pilot drill hole is established is physically life-critical, since the trapped miners have to survive this time span without any external support. The drilling time of the large-diameter rescue hole determines the total duration of the overall rescue mission.

Industry provides a variety of drilling technologies available to conduct such rescue missions. Mine rescue can benefit from profit-oriented applications like oil and gas winning, geothermal energy, water wells and mineral exploration. These branches undergo ongoing research, development, and thus continuous improvement. Another trend is that some mining countries purchase special mine rescue drilling equipment for central use of their national or provincial mine rescue stations: South Africa chose American Schramm equipment that also succeeded in the rescue of the Chilean miners in 2010. Both the T685 WS for pilot holes and the T130 XD for rescue holes can be considered as best available technology (19). China purchased universal German Bauer mobile rigs that allow the application of all prevalent drilling techniques. Its maximum depth is stated as 3,000 m for

Outer design aspects	Inner design aspects
Slim shape	Emergency breathing masks
Increased mobility	250 l of water (including filters)
Location in advanced road-heading	75 military food rations
Capacity of 4 persons	Playing and reading material
Stability against pressure of 21 kPa	Instructions including exercising
Window and escape-hatch	Removable seats, hammocks and table
	Hygiene and first aid sets
	Chemical toilet and waste system
	Pale colours, wooden material

Table 1. Aspects in re-designing mobile rescue chambers (after 17).
Tabelle 1. Zusammenstellung anzupassender Design-Parameter für mobile Rettungskammern (nach 17).

verbessern. Durch das Design und die Ausstattung der Kammer kann das Empfinden von Monotonie, etwa durch die immer gleiche Umgebung oder den Konsum einer sehr kleinen Auswahl von Lebensmitteln, subjektiv verringert werden.

Vorschläge und Konzepte für entsprechend angepasste innovative Rettungskammern können dem entsprechenden Konferenzbeitrag entnommen werden (17). Die Tabelle 1 fasst Schlüsselaspekte für das Design einer solchen Kammer zusammen. Neben den äußeren Designaspekten – etwa die Stabilität und die Mobilität betreffend – werden innere Designaspekte aufgeführt, die insbesondere die Bedürfnisse der Insassen berücksichtigen. Unter Beachtung dieser Faktoren können entsprechend entworfene Rettungskammern eine kosteneffiziente Unterstützung für verschüttete Bergleute darstellen.

2.3 Klein- und großkalibrige Bohrungen

Es wird zwischen zwei Arten von Bohrungen unterschieden: Pilotbohrungen geringen Durchmessers (< 10 cm) dienen der Ortung, Kommunikation und Versorgung. Rettungsbohrungen großen Durchmessers (> 40 cm) dienen der eigentlichen Befreiung der Verschütteten. Bohrungen in große Teufen sind technisch sowohl mit großen als auch mit geringen Durchmessern realisierbar (4). Die Schwierigkeit in einem Verschüttungsszenario liegt in der korrelierenden Bohrzeit: Die Zeit bis zum ersten Kontakt und der ersten Versorgung durch die Pilotbohrung ist überlebenskritisch, da die eingeschlossenen Personen diese Zeitspanne ohne äußere Unterstützung überleben müssen. Die Bohrzeit der Rettungsbohrung bestimmt schlussendlich die Dauer der gesamten Rettungsmission.

Die Industrie bietet eine Reihe von Technologien für die Durchführung einer solchen Rettungsbohrung. Die Grubenrettung kann hier stets auf Entwicklungen aus der profitorientierten Anwendung der Bohrtechnik, z. B. Öl-, Gas- und Geothermiebohrungen, zurückgreifen. Diese Branchen unterliegen ständiger Forschung und daher technologischem Fortschritt. Darüber hinaus existiert der Trend, dass einige Bergbaunationen zentral Ausstattungen für Rettungsbohrungen erwerben und diese national oder regional für Notfälle vorhalten. Südafrika entschied sich hier für das amerikanische Schramm-System, das auch bei der Rettung der verschütteten Bergleute in Chile erfolgreich zum Einsatz kam. Sowohl das T685 WS für Pilotbohrungen als auch das T130 XD für Rettungsbohrungen können als die Beste zur Verfügung stehende Technologie betrachtet werden (19). China erwarb das universelle deutsche Bauer-System, das die Anwendung aller gängigen Bohrmethoden erlaubt. Die maximale Teufe ist mit 3.000 m für Pilotbohrungen und 1.500 m für Rettungsbohrungen angegeben. Solch mobile Bohrgeräte wären auch für eine europaweite Präventivmaßnahme denkbar.

Sowohl die Wahl des geeigneten Geräts als auch der erreichbare Bohrfortschritt sind von den geologischen Gegebenheiten am Einsatzort abhängig. Eine Analyse bisheriger Rettungsbohrungen ergab eine Spanne von 0,3 bis 33 m/h und einen durchschnittlichen Bohrfortschritt von 9,1 m/h (3). Die San José-Rettungsbohrung in Chile im Jahr 2010 ist die bis heute einzige Rettungsaktion, bei der in einer Teufe von mehreren hundert Metern eine Bohrung von der Tagesoberfläche die notwendige Strategie war. Hier stellte ein Bohrhammer mit Saugspülung nach 17 Tagen

pilot holes and 1,500 m for rescue holes. Such mobile drilling rigs would also be a suitable joint European preventive measure.

Both, the choice of the right equipment as well as the feasible drilling rate (speed) highly depend on the geological circumstances of the individual site. A performance analysis of past rescue missions shows a range of 0.3 to 33 m/h and an average drilling rate of 9.1 m/h (3). However, there is only one mine rescue mission in history which occurred at a depth of several 100 m and where mine rescue teams had to choose surface drilling as there only applicable strategy: the San José mine rescue in Chile 2010. At San José, a reverse circulation hammer enabled first contact after 17 days with a 14 cm borehole. The 71 cm rescue borehole was drilled by widening a pilot drillhole in two steps. Cuttings of about 700 t were removed by the trapped miners in shift work underground. This large diameter rescue drilling took another 34 days (3). Projecting the data of a 700 m rescue to a great depth of 2,000 m, first contact would be established in 49 days and the actual rescue would take another 97 days.

Besides geology, water as in a flooded mine creates another major challenge to mine rescue drilling. Trapped miners can survive in an air pocket that might build up in an inclined and sealed spot within the inundated mine. Consequently, this over-pressurized atmosphere has to be maintained during the drilling process since this natural barricade against the water level is essential for survival. After the rescue, a slow decompression process is necessary when the miners are finally lifted from this artificial atmosphere (20).

Since mine rescue drilling is life-critical and accordingly time-critical, certain lessons and principles (after 4) should be followed whenever this worst case scenario occurs:

- Experts, e.g. from the oil and gas industry, have to be involved immediately.
- One person should be assigned responsible and authorized for the management of all drilling operations.
- Identification of possible locations of the trapped miners and thus the drilling spots shall be based on technical, organizational, and personal (TOP) locating strategies.
- Preparation of the drilling site should already be finished when the drilling equipment arrives at the mine.
- The small-diameter pilot drill is life-critical and has thus top-priority for the entire mission.
- Geological and technical uncertainties require redundant drillings.
- Even with uncertain information, an early start of drilling has positive psychological effects for the trapped miners, since they can hear or feel that a search and rescue mission is conducted.
- Also the large-diameter drill can be started early to gain information and experience regarding drillability at the site's geology (21).
- In addition, misled rescue drillings can be used for mine rescue teams to gain access to intact parts of the underground mine (22).
- Pre-selection of possible drilling points and appropriate (and available) drilling equipment for the site-specific geology should be carried out by every mining company before any major mine accident occurs.

Bohrzeit den ersten Kontakt über ein 14 cm-Bohrloch her. Das 71 cm-Rettungsbohrloch wurde durch die zweifache Erweiterung einer Pilotbohrung hergestellt. Insgesamt 700 t Bohrklein der Erweiterungsbohrungen wurden von den verschütteten Bergleuten in Schichtarbeit unter Tage bewegt. Die Großbohrung nahm insgesamt 34 Tage in Anspruch (3). Linear hochgerechnet auf eine Rettungsbohrung in 2.000 m Teufe würde der erste Kontakt nach 49 Tagen hergestellt, während für die eigentliche Rettung 97 Tage benötigt würden.

Neben den geologischen Verhältnissen birgt Wasser in einem überfluteten Bergwerk die zweite große Herausforderung. Verschüttete Bergleute könnten in einer Luftblase überleben, die sich in einer ansteigenden Strecke bilden kann. In der Folge müsste diese Überdruckatmosphäre während der Bohrarbeiten erhalten bleiben, da diese als natürliche Barrikade gegen den Wasserzutritt überlebenswichtig ist. Nach der Rettung ist ein langsamer Druckabbau in einer Druckkammer erforderlich, wenn die Bergleute die künstliche Atmosphäre verlassen (20).

Da Rettungsbohrungen überlebenskritisch sind und deshalb unter Zeitdruck erfolgen, müssen einige Grundprinzipien (nach 4) im Worst Case befolgt werden:

- Experten, beispielsweise aus der Öl- und Gasindustrie, müssen sofort hinzugezogen werden.
- Während der Rettungsmission sollte eine Person für die Leitung der Bohrvorhaben autorisiert und verantwortlich sein.
- Die Identifizierung möglicher Aufenthaltsorte der Verschütteten und demzufolge die Bohransatzpunkte sollten anhand der TOP-Strategien erfolgen.
- Die Vorbereitungen für die Bohrung sollten bereits soweit wie möglich abgeschlossen sein, wenn die Bohrausrüstung vor Ort eintrifft.
- Die Pilotbohrung mit geringem Durchmesser ist überlebenswichtig und hat daher oberste Priorität.
- Geologische und technische Unsicherheiten erfordern parallele Bohrungen.
- Ein früher Start der Bohrarbeiten hat positive psychologische Effekte auf die Verschütteten, da diese die Rettungsbemühungen möglicherweise akustisch oder seismisch wahrnehmen können.
- Auch mit einer Großbohrung sollte früh begonnen werden, da diese Informationen über die Bohrbarkeit und den möglichen Bohrfortschritt liefert (21).
- Fehlgeleitete Rettungsbohrungen können Rettungsteams Zugang zu anderen Teilen des Bergwerks verschaffen (22).
- Die Vorauswahl möglicher Bohrplätze und geeigneter Bohrausrüstung sollte individuell getroffen und verfügbar sein, bevor es zu einem Zwischenfall kommt.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Langandauernde Verschüttungen sind eine seltene und schwierige Herausforderung des Grubenrettungswesens. Auch für zukünftige Bergbauprojekte müssen Verschüttungen in Betracht gezogen werden. Große Teufen können solche Szenarien in komplexe Rettungsmissionen unbekannter Dimension verwandeln. Langandauernde Rettungsaktionen führen zu physiologischer und psychologischer Belastung bis zur Rettung der Betroffenen.

3 Conclusion and outlook

Long-lasting scenarios are a rare and challenging scenario in mine rescue. Entrapments have to be considered even in future mining operations. Great depths can convert such scenarios into complex rescue missions of unknown dimensions. Long-lasting missions lead to psychological and physiological burdens regarding the survival of trapped miners until rescue. Technical measures are needed to locate the trapped miners, to communicate with them, and to finally free them. Furthermore, tracking and drilling technology have to meet the global challenge of great depth.

Technology assessments indicate clear boundaries of today's technology with respect to great depth. An urgent need for research can be seen in long-distance TTE communication and tracking as well as in fast, universal, and precise drilling technology. Parallelization and redundancy are of outmost importance whenever life-critical operations rely on certain technology. Alternatives such as the TOP principle have been introduced. A potential preventive measure is presented by a low-cost design concept for future mobile rescue chambers. They can support psychological and physical survival in entrapment situations that are most likely to occur in dynamic road heading operations.

Besides such technical considerations, the European I²Mine project has also put research efforts into organizational tools and management systems for such complex mine rescue missions. An online prototype has been built at RWTH Aachen University that shows the potential of a European Mine Rescue Platform (EMRP). EMRP would allow the European mining industry to cost-effectively share know-how and special equipment for rare incidents. Furthermore, the author has prepared his Ph.D. thesis on "Mine Rescue Management" (3). Based on case studies and disaster management approaches, a management concept and guideline has been developed to organizationally prepare and logistically manage a long-lasting rescue missions for miners trapped underground.

4 Acknowledgements

Research within the I²Mine project has partly been sponsored by the European Union's Framework Programme 7 (GA # NMP2-LA-2011-280855). I have to thank Prof. Dr.-Ing. Jürgen Brune, Colorado School of Mines, Prof. Dr.-Ing. Ludger Rattmann, THGA Bochum, and Prof. Dr.-Ing. Walter Hermülheim, TU Clausthal, for the creative discussions we shared. Prof. Dennis Pettersson, TU Lulea, invited me to arrange a design workshop on rescue chambers with Swedish students. Last but not least I would like to thank Prof. Dr.-Ing. Bernd Lottermoser, RWTH Aachen, for the critical review of this manuscript.

Es werden technische Maßnahmen benötigt, um die Verschütteten zu orten, die Kommunikation zu ihnen aufzubauen und sie schlussendlich zu befreien. Hierfür muss die Tracking- und Bohrtechnologie auf den globalen Trend zunehmender Teufen ausgerichtet werden.

Eine technologische Bewertung zeigt klare Grenzen der gegenwärtigen Rettungstechnologien in Bezug auf große Teufen auf. Es besteht Forschungsbedarf auf dem Gebiet von Ortung und TTE-Kommunikation über große Distanzen, sowie für schnelle, universelle und präzise Bohrtechnik. Parallele Strategien und Vorgehensweisen sind von großer Bedeutung, wenn überlebenswichtige Operationen von einzelnen Technologien abhängen. Alternativen wie das TOP-Prinzip wurden vorgestellt. Eine Form der Prävention stellen innovative, mobile Rettungskammern dar, die psychologisch und physisch das Überleben von Verschütteten, beispielsweise im Streckenvortrieb, unterstützen können.

Neben diesen technischen Betrachtungen hat das I²Mine-Projekt Forschung auf dem Feld der Organisations- und Managementsysteme für solche komplexen Rettungsmissionen ermöglicht. Von der RWTH Aachen wurde ein Online-Prototyp entworfen, der das Potential einer „European Mine Rescue Platform" (EMRP) aufzeigt. Eine EMRP würde es der europäischen Bergbauindustrie ermöglichen, kosteneffizient Know-how und Equipment für eher seltene Zwischenfälle zu teilen und vorzuhalten. Darüber hinaus hat der Autor seine Dissertationsschrift über „Mine Rescue Management" verfasst (3). Basierend auf Fallstudienanalysen und Ansätzen aus dem Katastrophenschutz wurde ein Konzept für die Organisation und logistische Vorbereitung einer langandauernden Rettungsmission für verschüttete Bergleute erarbeitet.

4 Danksagung

Die Forschung im Rahmen des I²Mine-Projekts wurde zu großen Teilen durch das 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union finanziert (GA # NMP2-LA-2011-280855). Ich danke Prof. Dr.-Ing. Jürgen Brune, Colorado School of Mines, Prof. Dr.-Ing. Ludger Rattmann, THGA Bochum, und Prof. Dr.-Ing. Walter Hermülheim, TU Clausthal, für die kreativen Diskussionen. Prof. Dennis Pettersson, TU Lulea, ermöglichte mir die Organisation eines Design-Workshops für Rettungskammern mit schwedischen Studierenden. Zu guter Letzt danke ich Prof. Dr. Bernd Lottermoser, RWTH Aachen, für die kritische Durchsicht dieses Manuskripts.

References / Quellenverzeichnis

(1) Hermülheim, W.; Bresser, G.; Fuchs, E.; Langer, G.; Ollesch, E. u. Junker, M.: Handbuch für das Grubenrettungswesen im Steinkohlenbergbau. VGE-Verlag Essen, 2007.
(2) Ramlu, M. A.: Mine disasters and mine rescue. Universities Press Hyderabad, 2007.
(3) Lehnen, F.: Mine Rescue Management. A Concept for Long-Lasting Missions based on Case Study Analysis and Disaster Management Approaches. Dissertation, Aachen 2016.
(4) Lehnen, F.: Concepts for deep mine rescue, Deliverable 6.7 of the European I²Mine Project, 2016.
(5) Robinson, B.: Mine Emergencies. Training and technology can prevent underground disasters. Mining, People and the Environment (2013) 2, S. 22.
(6) Buchsbaum, L.: Unhooking the cables. Mining Magazine (2014) 1, S. 26 – 28.
(7) Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking. Part 1: Technology Overview. NIOSH Mining Safety and Health Content, National Institute for Occupational Safety and Health, 2011.
(8) Reverse Implementation of Radio Frequency Identification (RFID) Technology for Personnel Tracking in Underground Mines. Technology News Nr. 543, National Institute for Occupational Safety and Health, 2011.
(9) Development of a Seismic System for Locating Trapped Miners. Final Technical Report. NIOSH Broad Agency Announcement (BAA) 2011-N-13046, Heasley, K. A., 2013.
(10) Opitz, P.: Erprobung von Systemen zur Ortung verschütteter und eingeschlossener Bergleute in Bergbaubetrieben der DDR. Neue Bergbautechnik 19 (1989) 5, S. 177 – 179.
(11) Jakeman, M.: Developments in self escape and aided rescue arising for the Moura No.2 Wardens Inquiry by the Joint Coal Industry Committee from Queensland and New South Wales. Coal Operators' Conference. Proceedings. 1998, S. 718 – 756.
(12) Waynert, J.: Communications, Tracking, & Data Integration. Research Priorities. Alpha Foundation Priorities Planning Meeting. Proceedings. 2012.
(13) The Sago Mine Disaster. A preliminary report to Governor Joe Manchin III, McAteer, J. D., Bethell, T. N., Monforton, C., Pavlovich, J. W., Roberts, D. C. u. Spence, B., Buckhannon 2006.
(14) Schafrik, S. J.; Dietrich, C. u. Harwood, C.: Geolocation for underground coal mining applications. Classification of systems. Mining Engineering 66 (2014) 4, S. 22 – 48.
(15) Markham, A. u. Trigoni, N.: Magneto-Inductive Networked Rescue System (MINERS). Taking Sensor Networks Underground. 2012 ACM/IEEE 11th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN). Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE 2012.
(16) Yenchek, M. R.; Homce, G. T.; Damiano, N. W. u. Srednicki, J. R.: NIOSH-Sponsored Research in Through-the-Earth Communications for Mines. A Status Report. IEEE Transactions on Industry Applications 48 (2012) 5, S. 1700 – 1707.
(17) Lehnen, F.; Rattmann, L. u. Martens, P. N.: Mobile Rescue Chamber Re-Design to Support Miners Trapped Underground. 5th International Symposium „Mineral Resources and Mine Development". Aachen International Mining Symposia (AIMS), Bd. 14. 2015, S. 235 – 246.
(18) Salam, A. P.: Exploration Class Missions on Earth: Lessons Learnt from Life in Extreme Antarctic Isolation and Confinement. In: Chouker, A. (Hrsg.): Stress Challenges and Immunity in Space. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, 2012, S. 425 – 439.
(19) Klerk, C. de: Improved Rescue Technologies at Mines Rescue Services. South Africa. 6th International Mines Rescue Body Conference. Conference Papers and Presentations. 2013.
(20) Frauendorf, H. u. Gelbrich, W.: Spezielle Probleme der Versorgung und Bergung bei bergmännischen Rettungsbohraktionen. Teil 3. Bergakademie 20 (1968) 2, S. 94 – 98.
(21) Hibbard, W. R.; Chambers, A.; Giel, B. G.; Hair, G.; Keller, G. V.; Lederer, J.; Maurer, W. C.; Talman, W. G.; Williamson, T. N. u. Meloy, G. E.: Mine Rescue and Survival. Final Report. National Academy of Engineering Washington D.C.,1970.
(22) Dittrich, R. u. Nemitz, R.: Bohrungen für den Bergbau zur Rettung von Menschenleben. Bergbau 19 (1968) 9, S. 229 – 238.

Author / Autor

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Felix Lehnen, Oberingenieur am Institute of Mineral Resources Engineering (MRE), RWTH Aachen University, Aachen/Germany