

Hazard Analysis on Underground Mine Fires in Collieries

Since the mid sixties, there were over 200 spontaneous combustion fires in German collieries, with more than a dozen cases of CH₄ ignitions. It should be agreeable that the related mine rescue work for the prevention of damage to property should not be more hazardous than ordinary underground work. This claim requires a regular check of safety regulations for the fighting of fire types which include the potential danger of an explosion. The paper points out the experiences of the German coal mining industry gathered on ignition hazards related to spontaneous combustion fires:

- development of spontaneous combustion;
- preventive measures;
- ignition hazards and related safety regulations;
- goaf inertization;
- fighting concealed fires with injection measures;
- coal production in case of fire;
- full space inertization.

The article is a revised version of the author's presentation at the 7th conference of the International Mine Rescue Body (IMRB), Hanover/Germany, 9th September 2015 (1).

Zur Gefährdungsanalyse bei Grubenbränden im Kohlebergbau

Seit Mitte der 1960er Jahre haben sich in deutschen Kohlebergwerken mehr als 200 Selbstentzündungsbrände ereignet. Dabei kam es mehr als ein Dutzend Mal zu einer Entzündung von CH₄. Es dürfte Einvernehmen darüber zu erzielen sein, dass dabei die Arbeit der Grubenwehr, die bei solchen Ereignissen vor allem den Sachwertschutz zum Ziel hat, nicht risikobehafteter als gewöhnliche Arbeit unter Tage sein soll. Diese Zielsetzung erfordert eine regelmäßige Überprüfung und Fortschreibung der Sicherheitsregeln für explosionsgefährliche Brände. Der Beitrag beschreibt die Erfahrungen, die in deutschen Kohlebergwerken im Zusammenhang mit dem Explosionsrisiko durch Selbstentzündungsbrände gewonnen und für die betriebliche Praxis nutzbar gemacht werden konnten:

- Entstehung von Selbstentzündungsbränden,
- vorbeugende Maßnahmen,
- Zündgefahren und Sicherheitsregeln,
- Objektivinertisierung,
- Bekämpfung verdeckter Brände mithilfe von Injektionsverfahren,
- Aufrechterhaltung der Förderung im Brandfall,
- Rauminertisierung.

Bei dem Beitrag handelt es sich um die überarbeitete Fassung eines Vortrags des Verfassers auf der 7. Konferenz des International Mine Rescue Body (IMRB) in Hannover am 9. September 2015 (1).

1 Development of spontaneous combustion (2)

According to experience, most bituminous, respectively coking coal seams are prone to spontaneous ignition as soon as loose residual coal in the goaf area is exposed to a sufficient oxygen supply as a result of stray ventilation air leakages. This also applies to almost any type of coal when top coal is left to stand, or in the case of an extraction with a nearby rider seam. In longwall panels, spontaneous combustion fires typically occur in the following places (Figure 1) :

- at the face starting line;
- in the face salvaging position;
- at residual pillars;
- when residual coal must be left back at geological faults;
- with top coal left to stand, or with a rider seam in a vertical distance of less than 10 m.

1 Entstehung von Selbstentzündungsbränden (2)

Erfahrungsgemäß neigen vor allem Fett- bzw. Kokskohlenflöze zur Selbstentzündung, sobald aufgelockerte Restkohle im Alten Mann durch Schleichwetter in geeignetem Maße mit Sauerstoff versorgt wird. Für fast jede Kohlenart trifft diese Gefährdung ferner zu, wenn man bei der Gewinnung Topkohle stehen lässt, oder im Fall eines abbaunahen hangenden Begleitflözes. In einer Strebbaufäche ereignen sich Selbstentzündungsbrände vor allem an den folgenden Stellen (Bild 1) :

- im Bereich des ehemaligen Aufhauens,
- in der Raubstellung,
- an stehengebliebenen Restpfeilern,
- wenn Restkohle beim Durchörteren geologischer Störungen zurückgelassen werden muss,
- beim Anbau von Topkohle, oder mit einem hangenden Begleitflöz in weniger als 10 m Abstand.

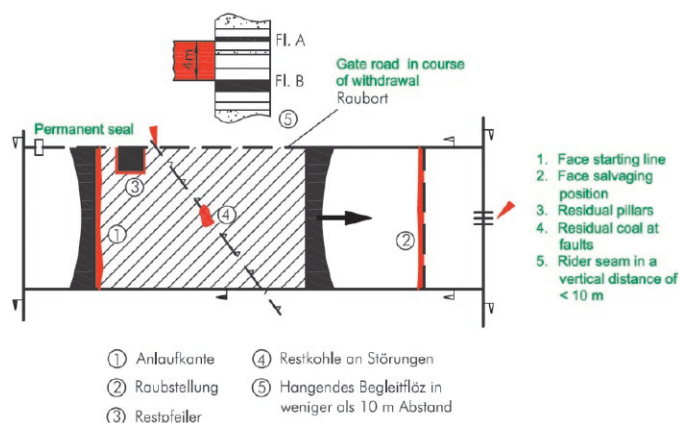


Fig. 1. Main areas of spontaneous combustion.
Bild 1. Schwerpunkte der Selbstentzündung.

When driving through a geological fault with a coal face, residual top coal is especially prone to later spontaneous ignition in the goaf, see cross-section above in fig. 2. Therefore, the face opening should always be steered in a way that only bottom coal is left in such a situation, as shown below in figure 2.

2 Preventive measures

For safe control of the methane make and to allow for effective methane drainage, positive Y ventilation has largely replaced U ventilation and retreat longwall mining in German collieries. However, the advantage of retreat mining, to avoid air leakage flows and thus to reduce the risk of spontaneous combustion in the goaf, can only be maintained by carefully carrying out preventive measures when mining coal seams prone to spon com in a positive Y ventilation scheme:

- Sealing of seam cuts in roadways and of testing and de-stressing drill holes for rock burst prevention during development;
- tightening of residual pillars, incl. treatment with reaction inhibiting agents;
- sealing of the face starting line;
- tight roadside packs and roadway seals;
- measures for preservation of roadway cross section, e.g. dinting, to achieve a low ventilation pressure drop across the goaf area;
- quick removal of the equipment and sealing of the panel after the end of production.

Figure 3 shows an example of a tight roadside pack after the passage of the face, built in three steps:

- A row of fast supporting Bullflex concrete pillars is erected immediately behind the face line;
- the residual volume of the pack is then lined with cloth and filled with hydraulically processed building material;
- a final concrete lining serves for tightening a larger area of the roadway shell which is last of all shotcreted.

Packs should be checked following a face line progress of 200 m and, if necessary, resealed again by shotcreting and re-backfilling of the roadway shell. The face starting line must be sealed with building material in a similar manner, in case one or both gate roadways are kept open behind the face.

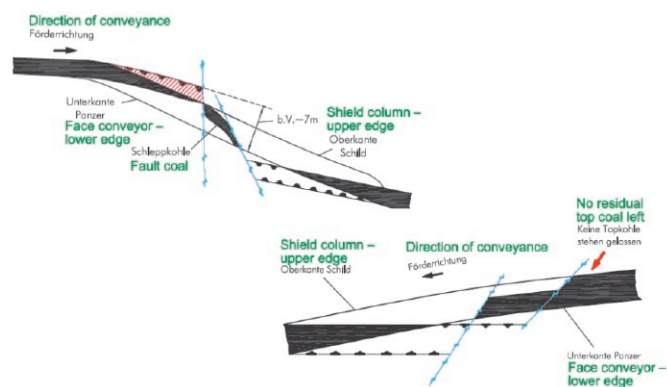


Fig. 2. Residual coal in longwall mining.
Bild 2. Restkohle im Strebbau.

Beim Durchörter einer Störung ist es vor allem in den Bruch gebaute Hangendkohle, die sich später gern selbst entzündet, wie in Bild 2 im oberen Schnitt dargestellt. Daher sollte die Lage der Streböffnung zum Flöz möglichst so eingestellt werden, dass in einer solchen Situation nur Liegendkohle in unaufgelockerter Form zurückbleibt, wie in Bild 2 unten zu sehen ist.

2 Vorbeugende Maßnahmen

Im Interesse einer sicheren Grubengasbeherrschung und um in gasreichen Flözen eine wirkungsvolle Gasabsaugung betreiben zu können, ist im deutschen Steinkohlenbergbau die U-Bewetterung von Streben nahezu vollständig durch positive Y-Bewetterung abgelöst worden. Ein wesentlicher Vorteil der U-Bewetterung liegt jedoch in ihren geringen Schleichwetterströmen im Alten Mann, verbunden mit einem geringen Selbstentzündungsrisiko. Um diesen Vorteil auch bei positiver Y-Bewetterung noch ansatzweise zu realisieren, ist eine Reihe sorgfältig ausgeführter vorbeugender Maßnahmen erforderlich:

- Versiegelung von Flözanschnitten sowie von Test- und Entspannungsböhlern im Streckenvortrieb,
- Abdichtung von Restpfeilern, ggf. verbunden mit der Injektion reaktionshemmender Lösungen,
- Anlaufkantensicherung,
- dichte Streckenbegleitdämme und Abschlussdämme,
- Maßnahmen zur Erhaltung des Abbaustreckenquerschnitts, z.B. durch Senkarbeit, um das Wetterdruckgefälle im Alten Mann niedrig zu halten,
- schnelles Ausrauben und Abdämmen nach Abschluss der Gewinnungsarbeit.

Bild 3 zeigt, wie nach Strebdurchgang in drei Arbeitsschritten ein besonders dichter Streckenbegleitdamm errichtet werden kann:

- Eine Reihe frühtragender Bullflex-Pfeiler wird unmittelbar hinter dem Streb errichtet,
- der verbliebene Dammraum wird mit Gewebematten verschlagen und hydromechanisch mit Baustoff verfüllt,
- eine weitere dünne Baustoffinnenschale dient der großflächigen Abdichtung des strebseitigen Streckenmantels, der abschließend noch einmal übertorkretiert wird.

A remarkable number of all hidden fires occur during the salvaging phase. This applies in particular if it is intended to keep the abandonment line open for an extended period, e.g. whilst waiting for a direct removal of the shield support to a subsequent panel. In such a case, the shield column can be backfilled with a rigid foam injection after the withdrawal lane has been prepared (Figure 4). A positive side effect is a significantly improved stability of the caved material at the withdrawal point.

3 Ignition hazards and related safety regulations (3, 4)

The most fundamental safety rule when fighting spontaneous combustion fires in the goaf is to agree on a safe boundary value for retreat, respectively for the last possible opportunity to start a goaf or full space inertization. Based on the analysis of the ignition events in Germany, it has proven to be reasonable to set this boundary value at a fuel concentration of 50 to 60 % of the lower explosive limit (LEL) in the stray ventilation air leaking from the fire zone in the goaf. This air current is tested and analyzed via sniffing pipes which penetrate through the roadside pack into the goaf (Figure 5). That means that organized work in mine workings close to the seat of the fire in the goaf is possible only as long as the methane (CH_4) concentration of the gases leaking from that fire zone in the goaf is lower than 2.5 to 3 vol.-percent CH_4 .

Alternatively, the oxygen concentration in the air leakages can be kept at a safety margin of two percent-points below the nose limit of the explosive triangle for the respective gas mixture, by a timely preparation and operation of a goaf inertization. Figure 6 shows a Coward-diagram for CH_4 , with the safety threshold (red interrupted line) for mine rescue work in the vicinity of a goaf area with an active spon com fire. Below of approximately 10 vol.-% of oxygen, the CH_4 concentration is irrelevant. But, if in addition noteworthy concentrations of hydrogen (H_2) and carbon monoxide (CO) appear in the combustion gasses, Coward-Diagrams for gas mixtures with several combustible components must be used for the evaluation mentioned above to individually reset the boundary values.



Fig. 4. Tightening the shield column with phenolic resin foam.
Bild 4. Abdichten der Schildsäule mit Phenolharz-Hartschaum.



Fig. 3. Tight roadside pack.
Bild 3. Dichter Streckenbegleitdamm.

Streckenbegleitdämme sollten nach rund 200 m Abbaufortschritt nochmals auf Dichtheit geprüft und erforderlichenfalls durch Hinterfüllen und/oder Anspritzen des Streckenmantels nachgedichtet werden. In ähnlicher Weise muss die Anlaufkante mit Baustoff verschlossen werden, falls die jeweilige Abbaubegleitstrecke hinter dem Streb offen bleiben soll.

Eine nennenswerte Anzahl an Selbstentzündungsbränden ereignet sich während der Raubphase, insbesondere dann, wenn die Einstelllinie über einen längeren Zeitraum offen bleiben soll, um zum Beispiel den Direktumzug des Schildausbaus in eine Folgebauhöhe abzuwarten. In einem solchen Fall kann man die Schildsäule nach Herstellung der Raubgasse mit Hartschaum zum Alten Mann hin abdichten (Bild 4). Der wertvolle Nebeneffekt einer solchen Abdichtung besteht in einer verbesserten Stabilität der Bruchberge an der Raubstelle des jeweiligen Schilds.

3 Zündgefahren und Sicherheitsregeln (3, 4)

Als wichtigste Sicherheitsregel bei der Bekämpfung eines Selbstentzündungsbrands gilt es, einen Grenzwert für den Rückzug der in der Nähe arbeitenden Mannschaft bzw. für den letztmöglichen Zeitpunkt zum Einschalten einer Inertisierung zu definieren. Abgeleitet aus der Analyse von Zündereignissen in Deutschland hat es sich als sinnvoll erwiesen, diesen Grenzwert bei einer Brennstoffkonzentration von 50 bis 60 % der Unteren Explosionsgrenze (UEG) in denjenigen Schleichwetterströmen festzulegen, die den Alten Mann aus Richtung des vermuteten Brandherds verlassen. Diese Schleichwetterströme werden mithilfe von Schnüffelrohren überwacht, die durch den Streckenbegleitdamm hindurch in den Alten Mann reichen (Bild 5). Dies bedeutet mit anderen Worten, dass Arbeiten in Grubenbauen, die in der Nähe des Brandherds im Alten Mann liegen, nur erlaubt sind, solange die Methan (CH_4)-Konzentration in den von dort her zuströmenden Schleichwettern geringer als 2,5 bis 3 Vol.-% bleibt.

Alternativ ist es aber auch möglich, durch rechtzeitige Inbetriebnahme einer Objektinertisierung den Sauerstoffgehalt der Schleichwetter so weit abzusenken, dass er im Coward-Diagramm rund zwei Prozentpunkte unterhalb der sogenannten Spitzengrenze des Explosionsdreiecks für das jeweilige Gasgemisch liegt. Bild 6 zeigt ein solches Coward-Diagramm für CH_4 , mit eingetragener Sicherheitsgrenze (rote unterbrochene Linie) für Grubenwehrarbeit in der Nähe eines Alten Manns mit einem aktiven Selbstentzündungsbrand. Unterhalb von rd. 10 Vol.-% Sauerstoff ist in diesem Fall der CH_4 -Gehalt irrelevant. Wenn al-

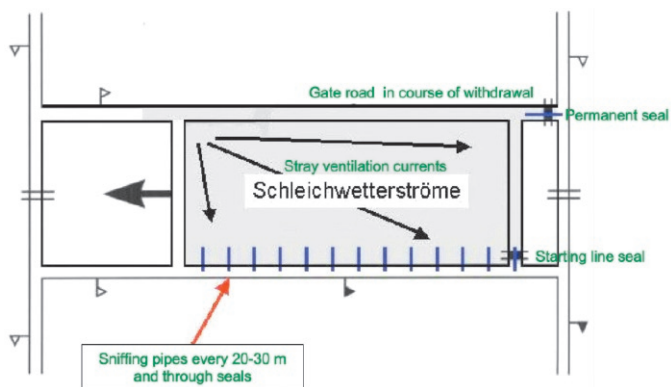


Fig. 5. Sniffing pipe monitoring of the goaf stray ventilation currents.
Bild 5. Schnüffelrohrüberwachung der Schleichwetterströme im Alten Mann.

4 Goaf inertization

A goaf inertization serves to reduce explosion hazards originating from the goaf area as well as to support roadway- and/ or face-tightening and grout-injection measures aiding for suffocating the smoldering fire zone. Air leakages, respectively stray vent currents in the goaf area are then replaced by nitrogen via injection lances, drill holes and "lost tubes" – as a rule in a flow by volume of about 20 to 50 m³/min. Hence, with a goaf inertization, roadway and face ventilation currents remain unaffected and are continued as usual. Figure 7 shows a typical goaf inertization ar-

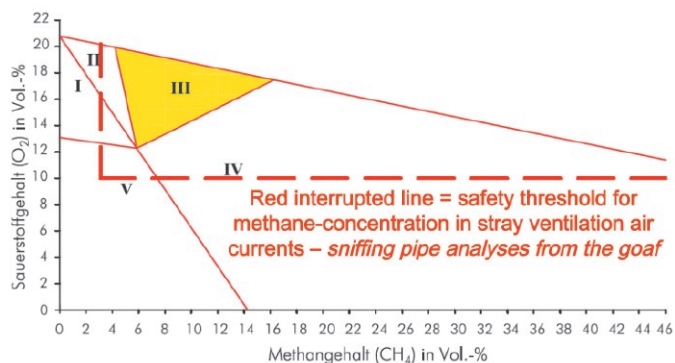


Fig. 6. Coward-diagram for CH₄ with safety thresholds for mine rescue work.

Bild 6. Coward-Diagramm für CH₄ mit Grenzwerten für die Arbeit der Grubenwehr.

lerdings zusätzlich zu CH₄ auch nennenswerte Anteile an Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO) im Brandgas auftauchen, so muss ein sicherer Grenzwert anhand von Coward-Diagrammen für mehrere brennbare Bestandteile jeweils individuell neu kalkuliert werden.

4 Objektivierung

Eine Objektivierung dient zur Verminderung der Explosionsgefahr im Alten Mann und gleichzeitig zur Unterstützung von Abdichtungs- und Injektionsarbeiten, die die endgültige Erstückung

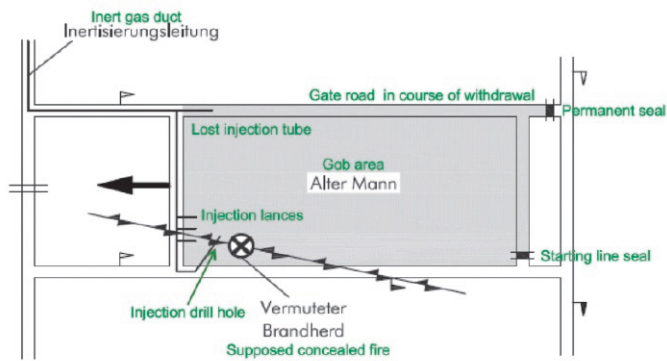
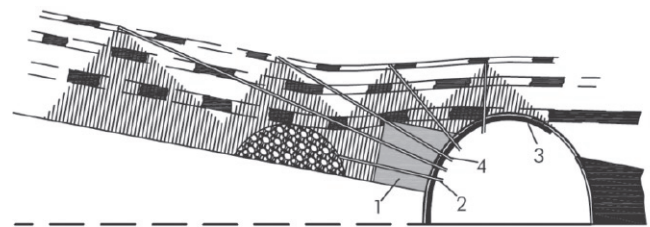


Fig. 7. Goaf inertization.
Bild 7. Objektinertisierung.



- | | |
|------------------|----------------------------------|
| 1 Begleitdamm | 2 Trockenhinterfüllung |
| 3 Spritzbeton | 4 Nassverpressung |
| 1 Gate side pack | 2 Dry backfilling – filter ashes |
| 3 Shotcreting | 4 Mortar matter injection |

Fig. 8. Re-tightening a gate side pack.
Bild 8. Nachdichten eines Streckenbegleitdamm.

ray with a lost injection pipe in the upper gate road, which is in course of withdrawal, injection lances between the shield supports, and an injection drill hole from the main gate road. On the long-term average, 3 million m³ of nitrogen were used in German collieries per goaf inertization.

5 Fighting concealed fires with injection methods (5)

Historical procedures of spon com fire fighting which are today widely out of use were conventional sealing off, ventilation pressure balancing or digging out. Remaining exceptions are: removing glow from shields, when salvaging the face line for fighting a fire site close to the face, or digging out fires in drift seam cuts and re-sealing the cavities. Flooding of fires is more or less out of use, too, with the exception of full flooding as a last resort, e.g. because of a lack of inert gas or in case of exceptional fire size. An important principle, in this context, is by no means to use pure water instead of sedimenting matter in goaf areas, because water injection just forms new air leakage paths.

Current procedures of spontaneous combustion fire fighting comprise air leakage tightening measures, e.g. shotcreting and re-backfilling of gate side pack and roadway shell and re-tightening of the face starting line, adjoining roadway seals and gate roads in course of withdrawal (Figure 8). Injection of the supposed fire zone within the goaf area with different types of sedimenting matter serves for direct fire fighting, by means of individual drill holes for mortar matter injection or of so-called “building material wedges”. Goaf inertization must be provided as a mandatory supporting measure for explosion prevention. The selection of the respective most favorable grouting method depends on the technology, available within the mine for building material processing, as well as on the type and quantity of the available building material and residual materials, but also on the legal basis for their use and the necessary work safety measures.

Together with the inertization and roadway sealing for fighting a spontaneous ignition fire, it should be tried as a rule to explore a suspected source of fire in the goaf area by means of bores, and to cover it with building material for its final extinction, so as not to have to maintain the inertization for the entire operational runtime of the panel. As mentioned above, this can be done by means of individual bores or by building material wedges driven systematically into the abandoned workings. In case of the method with individual bores (Figure 9), it is attempted to explore the

des Glimmbrands zum Ziel haben. Die Wetterkurzschlüsse bzw. die Schleichwetterströme im Alten Mann werden dabei mit Hilfe von Injektionslanzen, Bohrlöchern oder sogenannten verlorenen Rohrleitungen durch Stickstoff ersetzt – gewöhnlich mit einer Aufgaberrate von rd. 20 bis 50 m³/min. Insofern ist der betriebliche Wetterstrom durch die Abbaustrecken und den Streb von einer Objektinertisierung nicht betroffen und wird wie gewohnt aufrechterhalten. Bild 7 zeigt eine typische Anordnung zur Objektinertisierung mit einer verlorenen Rohrleitung im Raubort der Kopfstrecke, Injektionslanzen zwischen den Schilden und einem Bohrloch aus der Kohlenabfuhrstrecke. Im langjährigen Durchschnitt wurden in Deutschland je Objektinertisierung rd. 3 Mio. m³ Stickstoff verbraucht.

5 Bekämpfung verdeckter Brände mithilfe von Injektionsverfahren (5)

Historisch wurden Selbstentzündungsbrände mit heute kaum noch üblichen Verfahren bekämpft, z.B. durch konventionelles Abdämmen, durch Wetterdruck-Ausgleichsverfahren oder durch bergmännisches Ausgraben. Verbliebene Ausnahmen sind das Abräumen der Glut vom Schildausbau, wenn dieser zur Bekämpfung eines strebnahen Brands geraubt werden muss, oder das Ausgraben von Glutnestern aus Flözanschnitten im Streckenvortrieb, mit anschließendem Verfüllen der entstandenen Hohlräume. Auch das Fluten von Brandfeldern kommt kaum noch vor, es sei denn als letzte Möglichkeit bei einem Mangel an Inertgas oder bei außergewöhnlich großen Bränden. In diesem Zusammenhang sei aber angemerkt, dass für Injektionsmaßnahmen im Alten Mann niemals auf Wasser anstelle sedimentierender Medien zurückgegriffen werden sollte, da hierdurch höchstens neue Schleichwetterwege freigespült werden.

Man nutzt heute zur Bekämpfung von Selbstentzündungsbränden vor allem Abdichtungsmaßnahmen gegen Schleichwetter, z.B. das Nachdichten von Streckenbegleitdamm, Streckenmantel und Anlaufkante sowie von wettertechnisch verbundenen Abschlussdämmen und Raubörtern (Bild 8). Zur direkten Brandbekämpfung wird die vermutete Zone des Glimmbrands im Alten Mann mit sedimentierendem Material injiziert, entweder mithilfe einzelner Bohrlöcher zur Baustoffaufgabe oder durch sogenannte „Baustoffspieße“. Bei allen diesen Arbeiten sollte immer eine Objektinertisierung als unterstützende Explosionsschutzmaßnahme verfügbar sein. Die Auswahl des Verfüllmaterials hängt

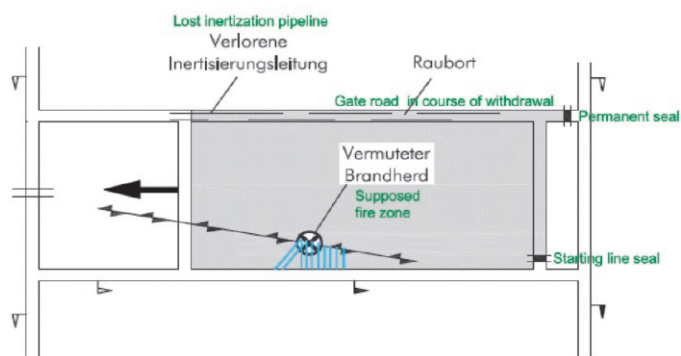


Fig. 9. Individual injection drillholes.
Bild 9. Einzelne Injektionsbohrungen.

abandoned workings in a short time and in a fan-shaped fashion and, if high CO values are found within the drill steel, to apply building material or nitrogen by means of piping or directly via the drill steel.

Figure 10 shows a so-called building material wedge: after setting and sealing of a short standpipe, the same borehole is repeatedly drilled open until the respective next cavity is reached and then backfilled with building material. In this way, building material is driven into the abandoned workings after the fashion of a bar with dimensions that are not exactly defined. In addition to the possibility that in doing so the source of the fire will be hit, this bar also represents at the same time an effective barrier against air leakages in the goaf area. The building material wedge thus will even meet a fire fighting purpose, if the source of the fire is not hit directly. For drilling in the goaf area a standard gas drilling unit is used. For the backfilling of the abandoned workings and for advancing building material wedges, as a rule low-cost late load-bearing building materials are used that are based on fly ash with a cement content of up to 20 weight-%. As a measure against building material ingress into the roadway during the preparation of building material wedges, a continuous re-sealing of the roadway shell with shotcrete is indispensable. Fire fighting by means of individual bores or building material wedges requires on average 3,000 to 5,000 t of building material per goaf fire.

As a rule, the operationally available building material infrastructure of the mine is used for fire fighting. If there is no such infrastructure, it is also possible to fit a hydraulic remote conveyance ad hoc within approximately 24 h. Such a remote conveyance of building material for mine rescue brigade operations is based on the hydrostatic pressure in the shaft column, using sufficiently pressure-resistant hose and pipelines. According to experience, standard mortar delivery hoses with an internal diameter of 50 mm can be used at depths of down to more than 1,000 m and for horizontal press-paths of up to 5,000 m. The minimum output of building material is approximately 6 m³/h, due to the minimum flow speed required in order to prevent sedimentation within the line. In any case, options for flushing water disposal and building material disposal as well as flushing points for troubleshooting along the line must be provided for. Silo installation, hook-in attachment of the shaft line and horizontal laying work may be paralleled here. At the same time that the hose is installed, the processing points on site are equipped

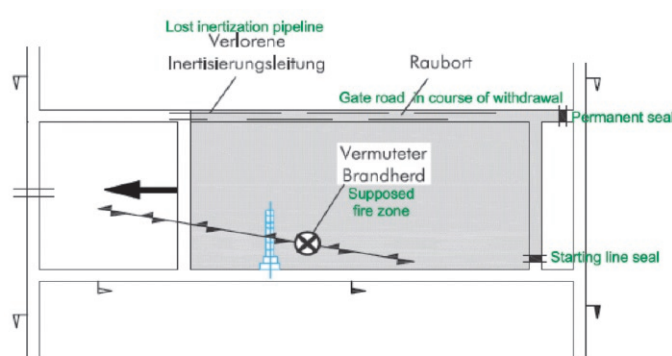


Fig. 10. Building material wedge.
Bild 10. Baustoffspieß.

ab von der Baustoffinfrastruktur des jeweiligen Bergwerks, aber auch von der kurzfristig verfügbaren Menge an Baustoffen und geeigneten Reststoffen sowie den örtlich gültigen gesetzlichen Regeln für deren sichere und umweltgerechte Verwendung.

In Kombination mit der Objektinertisierung und Streckenabdichtung sollte in der Regel angestrebt werden, die Glimmbrandzone im Alten Mann mit Bohrungen zu erkunden und zwecks endgültiger Erstückung mit Baustoff zu überdecken, um die Inertisierung nicht über die gesamte Laufzeit des Betriebs aufrecht-erhalten zu müssen. Dies kann wie bereits angesprochen mittels einzelner Bohrungen oder in Form systematisch in den Alten Mann vorgetriebener Baustoffspieße erfolgen. Einzelbohrungen (Bild 9) zielen darauf ab, das Bruchfeld in kurzer Zeit fächerartig zu erkunden. Sobald am Bohrgestänge hohe CO-Konzentrationen festgestellt werden, injiziert man Baustoff oder Stickstoff, entweder durch eine im Bohrloch eingebrachte Verrohrung oder aber direkt durch das Bohrgestänge hindurch.

Bild 10 zeigt einen Baustoffspieß: nach dem Einzementieren eines kurzen Standrohrs wird das immer gleiche Bohrloch wiederholt bis jeweils zum Antreffen von Hohlraum aufgebohrt und dann wieder mit Baustoff verpresst. Auf diese Weise wird Baustoff in Form eines Keils mit nicht genau definierten Abmessungen in das Bruchfeld hinein vorgetrieben. Neben der Möglichkeit, hiermit den Brandherd zu treffen, baut ein solcher Spieß gleichzeitig einen Widerstand gegen Schleichwetterbewegung im Alten Mann auf. Somit erfüllt er auch dann einen Zweck hinsichtlich der Brandbekämpfung, wenn die Glimmbrandzone nicht gleich beim ersten Versuch getroffen wird. Zur Bohrarbeit im Alten Mann wird in der Regel gewöhnliche Gasbohrausrüstung verwendet. Als Füllmaterial und zum Vorantreiben von Baustoffspießen nutzt man preisgünstige, spättragende Mörtel mit einem Zementanteil bis zu rd. 20 Gew.-%. Damit hiervon nicht zu viel aus dem Bruchfeld in die Strecke zurückflutet, muss der Streckenmantel vor allem bei der Herstellung von Baustoffspießen kontinuierlich mit Spritzbeton dicht gehalten werden. Eine Brandbekämpfung mithilfe einzelner Bohrungen oder mit Baustoffspießen erfordert je Brand bis zum Erfolg erfahrungsgemäß einen Baustoffeinsatz von 3.000 bis 5.000 t.

In aller Regel wird die betriebliche Baustoffinfrastruktur des Bergwerks auch zur Brandbekämpfung genutzt. Sofern eine solche nicht vorhanden ist, lässt sich eine provisorische Baustoffversorgung ad hoc innerhalb von rd. 24 Stunden einrichten. Eine

with boarding or sealing material, a water glass supply – addition of 3 to 5 weight-% for shotcreting work – as well as the necessary drills, pressure grouting and water glass pumps, volume distributors, spray fittings, compressed air and water connections, air and water glass hoses.

Whilst building material is predominantly used for fire fighting in the depth of a goaf area behind the longwall, for some years now phenolic resin rigid foam is also increasingly used for sealing work close to the longwall and roadway. When sealing the roadway shell against the goaf, with a possible high variation width, the specific consumption volume in operations reaches on average up to approximately 5 m³ of rigid foam per roadway meter and, when sealing the shield column in the longwall, up to some 10 m³ of rigid foam per meter of longwall. The maximum supply distance of the individual components in an unmixed condition is approximately 600 to 800 m from the pump station.

6 Coal production in case of fire (4)

If, besides the boundary values mentioned above, a number of further safety criteria are met, production can safely be resumed even when the fire is still going on and is not yet fully extinguished. These rules include a. o.:

- The location of the hidden fire is known or can be estimated with sufficient precision.
- The goaf is separated from the open mine workings and sealed by roadside packs which are constructed from solidly setting mortar matter.
- Continuous monitoring of the stray ventilation within the goaf via sniffing pipes proves that there are no explosive gas mixtures leaking from the goaf area around the suspected fire zone. A sufficient distance from the explosive limits must be kept at all times (Figure 6).
- Graham's Ratio – which does not apply during inertization – and the CO generation do not show a tendency to rise. The CO generation remains on an acceptable level, commonly below of 100 l/min.
- Goaf inertization is applied if this is necessary to meet the requirements described above.

It must be kept in mind that the rules mentioned above were in their full extend drawn up for goaf fires close to the longwall/ roadway area, which are known to have caused ignitions in the past, due to their proximity to unventilated, which means methane loaded cavities in the goaf. Therefore a precise knowledge or an educated guess regarding the location of the fire is not always necessary, if nothing points to proximity of the event in the goaf to the longwall or to a roadway – e.g. benzene/benzol-smell – i. e. if the fire zone has definitely no connection to goaf cavities close to the longwall or to a roadway. If the distance from the face exceeds 300 m, experience tells that no possible pathways for ignition do exist in the goaf.

7 Full space inertization (6)

For occasionally emerging unexpected or sudden explosion hazards, a full space inertization from a safe distance is available as a preceding intermediate step. The affected mine workings are then completely locked against the remaining mine and, instead

solche für Grubenwehrzwecke ausgelegte hydromechanische Fernförderung nutzt den hydrostatischen Druck in der Schachtsäule unter Verwendung ausreichend druckfester Rohr- und Schlauchleitungen. Erfahrungsgemäß können Mörtelförderschläuche mit einem Innendurchmesser von 50 mm hierzu für Teufen größer 1.000 m und für horizontale Presswege bis zu rd. 5.000 m Länge eingesetzt werden. Aufgrund einer notwendigen Mindestfließgeschwindigkeit zur Vermeidung von Sedimentationen in der Leitung beträgt der minimale Durchsatz rd. 6 m³/h. Entlang des Presswegs müssen Spülstellen für den Fall von Leitungsverstopfungen sowie Möglichkeiten zur Spülwasser- und Baustoffentsorgung vorgesehen werden. Siloaufbau, Einhängen der Schachtleitung und Auslegen der söhligen Leitung können parallelisiert werden. Gleichzeitig werden die vorgesehenen Verarbeitungsstellen vor Ort mit Verschlagmaterial, einer Wasserglasversorgung (Zugabe von 3 bis 5 Gew.-% bei Torkretierarbeiten) sowie dem benötigten Bohrgezühe, Mörtel- und Wasserglas-pumpen, Verteilern, Spritzgarnituren sowie einer Wasser- und Druckluftversorgung ausgerüstet.

Während Baustoff überwiegend zur Brandbekämpfung in der Tiefe eines Bruchfelds verwendet wird, kommt für Abdichtungsarbeiten in Streb- und Streckennähe seit einigen Jahren vermehrt Phenolharz-Hartschaum zum Einsatz. Der Harzverbrauch zum Abdichten einer Abbaustrecke gegen den Alten Mann beträgt – mit einer gewissen Spannweite – im Mittel 5 m³ aufgeschäumtes Harz je Meter Strecke. Zum Abdichten der Schildsäule werden einige 10 m³ Harz je Meter Streb benötigt. Die maximale Förderentfernung der Harzkomponenten im unvermischten Zustand beträgt 600 bis 800 m.

6 Aufrechterhaltung der Förderung im Brandfall (4)

Wenn neben der Einhaltung der bereits behandelten Explosionsgrenzwerte eine Reihe weiterer Kriterien erfüllt ist, kann die Produktion bereits wieder aufgenommen werden, während der Glimmbrand noch aktiv und nicht vollständig gelöscht ist. Diese Kriterien umfassen u.a.:

- Die Lage des verdeckten Brands ist bekannt oder kann mit hinreichender Genauigkeit eingeschätzt werden.
- Der Alte Mann ist gegen das offene Grubengebäude durch Streckenbegleitdämme aus abbindendem Baustoff abgetrennt.
- Kontinuierliche Überwachung der Schleichwetter im Alten Mann mithilfe von Schnüffelrohren weist nach, dass aus dem Bereich der vermuteten Glimmbrandzone keine zündfähigen Gasgemische abströmen. Dabei ist ein ausreichender Sicherheitsabstand zum zündfähigen Bereich zu gewährleisten (Bild 6).
- Die Brandkennziffer, welche bei laufender Inertisierung nicht anwendbar ist, und die CO-Produktion weisen keine steigende Tendenz auf. Die CO-Produktion verläuft in akzeptablem Rahmen, gemeinhin unter rd. 100 l/min.
- Zur Einhaltung und Steuerung der beschriebenen Randbedingungen wird erforderlichenfalls eine Objektinertisierung betrieben.

Es muss jedoch erwähnt werden, dass die o.a. Regeln streng genommen für streb- und abbaustreckennahe Brände aufgestellt worden sind, die sich aufgrund ihrer Nachbarschaft zu unbewet-

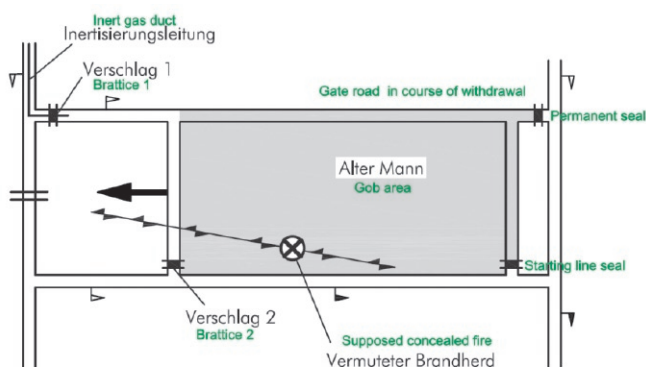


Fig. 11. Full space inertization – concealed fire.
Bild 11. Rauminertisierung – verdeckter Brand.

of ventilation air, injected with inert gas – if applicable mixed with fresh air. In the first approach, the maximum residual oxygen concentration of the mixture should not exceed 10 vol.-%, which is sufficiently low for extinguishing an open fire, or preventing a CH₄ ignition.

Criteria which suggest that, with a concealed fire, a full space inertization is necessary are:

- Together with a developing fire in the goaf, a rapid exceedance of the safety thresholds discussed above;
- the presence of indicators pointing to a goaf fire existing already prior to an occurred deflagration or explosion – then repeated ignitions are possible, maybe in intervals;
- CO concentrations which do not drop back to the original value after a deflagration or explosion – here as well, repeated ignitions are possible.

To save costs, it is advisable therefore to have a goaf inertization system operational early within the course of a starting CO-development before safety relevant boundary values are exceeded. This way, the expensive and potentially dangerous intermediate step “full space inertization” can be omitted.

It must be stressed that the full space inertization with a concealed fire (Figure 11) does not require explosion-proof seals, rather light brattices are entirely sufficient. The explosion protection is provided by the nitrogen together with sufficient safety distances. Brattice 1, from where nitrogen injection starts, should be at a safe distance from the spot at which a potential explosion would be extinguished by a close by water barrier. A network of such barriers therefore is a precondition for the described approach. Brattice 2 would only be erected, after the section, including the goaf area, has been flushed with nitrogen several times.

With an open fire, a full space inertization is recommended,

- if it cannot be fought manually due to its size and/or radiant heat;
- if dangers caused by a gas drainage pipeline within the range of the fire cannot be eliminated immediately;
- if a gas fire at the coal face propagates into the gob area and cannot be reached by direct means of fire fighting;
- if a fire occurs in a gassy roadway drivage, with simultaneous shut-off of the auxiliary ventilation.

terten, d.h. CH₄-führenden Hohlräumen im Alten Mann in der Vergangenheit als besonders zündgefährlich erwiesen haben. Daher ist eine genaue Kenntnis oder zumindest eine nachvollziehbare Abschätzung der Lage des Brandherds nicht unbedingt erforderlich, wenn es keine Hinweise auf dessen Nähe zu Streb oder Strecke gibt – z.B. Benzin-/Benzolgeruch – d.h., wenn die Glimmbrandzone offensichtlich keine Verbindung zu streb- und streckennahen Hohlräumen im Bruchfeld hat. Bei mehr als 300 m Abstand vom Streb kommt es erfahrungsgemäß nicht mehr zu Zünddurchschlägen im Alten Mann.

7 Rauminertisierung (6)

Für unerwartet oder plötzlich auftretende Explosionsgefährdungen steht im Notfall das Verfahren der Rauminertisierung als vorgeschalteter Zwischenschritt zur Verfügung. Dabei werden die betroffenen Grubenbaue vollständig gegen das restliche Grubengebäude abgeschlossen und anstelle der Frischwetter mit Stickstoff beschickt – ggf. gemischt mit Luft. In erster Näherung darf der Sauerstoffgehalt einer solchen Mischung 10 Vol.-% nicht überschreiten, was ausreichend niedrig zum Löschen eines offenen Grubenbrands oder zur Unterdrückung einer CH₄-Zündung ist.

Bei einem verdeckten Brand lassen folgende Kriterien eine Rauminertisierung ratsam erscheinen:

- Rasche Überschreitung der bereits weiter oben diskutierten Grenzwerte im Zuge einer Brandentstehung im Alten Mann,
- Hinweise darauf, dass vor einer stattgefundenen Abflammung oder Explosion bereits ein Brandherd im Alten Mann vorhanden war – dann kann es zu Nachexplosionen kommen, möglicherweise sogar wiederholt in Abständen,
- CO-Konzentrationen, die nach einer unerwarteten Abflammung oder Explosion nicht wieder auf den Ausgangswert vor dem Ereignis zurückfallen – auch hier können Nachexplosionen nicht ausgeschlossen werden.

Zwecks Kostenersparnis ist es daher in jedem Fall ratsam, im Zuge einer beginnenden CO-Entwicklung eine Objekinertisierung schnell einsatzbereit zu haben, bevor es zu einer Überschreitung sicherheitsrelevanter Grenzwerte kommt. Auf diese Art lässt sich der teure und risikoreichere Zwischenschritt einer Rauminertisierung umgehen.

Es muss herausgestellt werden, dass man bei einer Rauminertisierung bei einem verdeckten Brand (Bild 11) nicht zwangsläufig explosionsfeste Dämme benötigt. Vielmehr reichen hier leichte Verschlüsse aus, denn der erforderliche Explosionsschutz wird durch den Stickstoff selbst sowie durch das Einhalten ausreichender Sicherheitsabstände bewirkt. Verschlag Nr. 1, von dem aus die Stickstoffaufgabe beginnt, muss sich daher in sicherer Entfernung von demjenigen Ort befinden, an dem eine potentielle Explosion von der nächstgelegenen Wassertrogsperrung gelöscht werden würde. Insofern ist eine flächendeckende Ausrüstung des Grubenbaues mit Wassertrogsperrungen eine zwingende Voraussetzung für den hier beschriebenen Ansatz zur Inertisierung. Verschlag Nr. 2 wird hingegen erst errichtet, wenn das Abbauevier einschließlich des Alten Manns bereits mehrfach mit Stickstoff durchgespült worden ist.

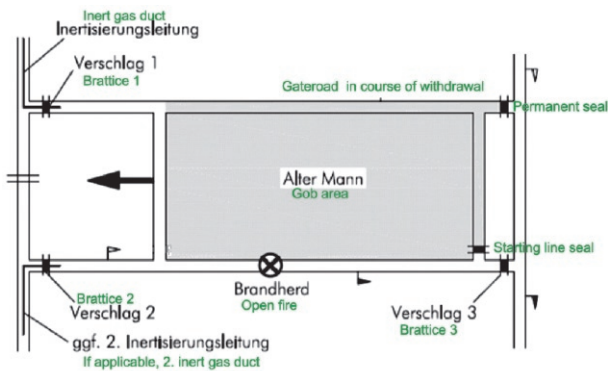


Fig. 12. Full space inertization – open fire.
Bild 12. Rauminertisierung – offener Brand.

Figure 12 shows the arrangement for inertizing an open fire, the intake brattices 1 and 2 being in safe distance from the event. The return brattice 3 is again only erected later, under the protection of nitrogen flowing from brattices 1 and 2. Brattices should be equipped with 2 seal pipes each for air-locking and future ventilating. Thus, if it becomes necessary to fully render the danger area inert from a safe distance due to a considerable risk of explosion, it has proven to be of advantage to improve the existing rule for conventionally sealing off parts of the mine workings – construction of explosion proof seals around the affected area and subsequent simultaneous closing – by a stepwise approach, and reduce the risk even further.

A full (200 l/m²) water explosion barrier must be in place between the endangered area and each brattice site, and a roadway length of approximately 1,000 m must exist between this barrier and the brattices – for allowing the pressure wave of to die down after the barrier having extinguished an explosion occurring during preparation work.

As a rule, a heated vaporizer allows for a rate of 100 to 250 m³ gaseous nitrogen/min. The permitted air leakage through brattice(s) must be smaller than the nitrogen injection rate – resulting in an inert gas-air stream with less than 10 vol.-% of oxygen. The workings affected and the goaf must be flushed three to five times with this nitrogen-air-mixture. Hereafter, a gas measurement is performed on the downwind side. The explosion risk is averted, if there is less than 10 vol.-% of oxygen in the return air from the inertized workings. The brattices in the return airflow from the fire can be installed under breathing protection as close to the fire as possible, because they are being constructed when the oxygen concentration has dropped to a safe level.

After a full space inertization is installed and operational, the nitrogen flow can be minimized, depending on downwind gas monitoring results – based on overall CO-make and on Coward diagram safety margin. If applicable, brattice sites can be constricted to allow easier approach to the fire zone, and residual glow in inertized mine workings can be fought under breathing protection. With a goaf fire, a goaf inertization must be installed and started under breathing protection as well. With this goaf inertization operative, the fire area can be re-opened: a so-called ventilation trial. With no sustainable CO-rise re-occurring, the full space inertization can then be stopped, and, if applicable, fire-

Bei einem offenen Brand ist eine Rauminertisierung ratsam,

- wenn er aufgrund seines Umfangs oder seiner Strahlungswärme nicht mehr manuell bekämpft werden kann,
- wenn Gefährdungen durch eine Gasleitung im betroffenen Bereich nicht sofort abgestellt werden können,
- wenn ein Gasbrand im Streb sich in das Bruchfeld hinein entwickelt und daher nicht mehr manuell erreichbar ist,
- wenn es bei einem Brand in einem gasreichen Streckenvortrieb zu einem Ausfall der Sonderbewetterung kommt.

Bild 12 zeigt die Rauminertisierung eines offenen Brands. Auch hier befinden sich die frischwetterseitigen Verschlüsse Nr. 1 und 2 in sicherer Entfernung vom Brandherd. Der ausziehseitige Verschlag Nr. 3 wird wiederum erst später unter dem Schutz des von den Verschlüssen 1 und 2 her aufgegebenen Stickstoffs errichtet. Die Verschlüsse sollten im übrigen mit jeweils zwei Dammrohren zum Einschleusen der Grubenwehr bzw. zum späteren Wiederherstellen der durchgehenden Bewetterung versehen sein. Somit hat es sich bei Notwendigkeit einer Rauminertisierung aus sicherer Entfernung als zweckmäßig erwiesen, die hergebrachte Grundregel für konventionelles Abdämmen – allseitiges Errichten von Dämmen um den betroffenen Bereich und nachfolgendes gleichzeitiges Schließen – durch ein schrittweises Vorgehen zu ersetzen, und das Verfahren hierdurch noch sicherer zu gestalten.

Zwischen dem zündgefährdeten Bereich und jeder Verschlagbaustelle muss eine vollständige Wassertrogsperr (200 l/m²) vorhanden sein und zwischen dieser und den Verschlüssen wiederum eine Entfernung von rd. 1.000 m, damit nach dem Löschen einer potentiellen Explosion durch die Sperre ausreichend Raum für ein Abklingen der Druckwelle zur Verfügung steht.

Öl- oder gasbeheizte Verdampferanlagen sind in der Regel für eine Stickstoffaufgaberate von 100 bis 250 m³/min gasförmigem Stickstoff ausgelegt. Die zulässige Wetterleckage von Verschlüssen, durch die hindurch Stickstoff injiziert wird, muss geringer als der jeweils aufzugebene Stickstoffvolumenstrom sein, dann ergibt sich ein Stickstoff-Luft-Gemisch mit weniger als 10 Vol.-% Sauerstoff. Die betroffenen Grubenbaue werden sodann drei- bis fünfmal mit diesem Stickstoff-Luft-Gemisch durchgespült. Danach wird auf der Abwetterseite eine Gasmessung durchgeführt. Ergibt auch diese eine Sauerstoffkonzentration kleiner als 10 Vol.-% im ausziehenden Wetterstrom, so ist das Explosionsrisiko abgewendet. Die Verschlüsse im Ausziehstrom können nunmehr unter Atemschutzgerät so nah wie möglich am Brandherd errichtet werden, da ihr Bau ja erst erfolgt, nachdem der Sauerstoffgehalt auf einen sicheren Wert abgesenkt worden ist.

Nach Einrichtung und Inbetriebnahme der Rauminertisierung kann der Stickstoff-Volumenstrom sodann in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Gasmessungen auf der Ausziehseite minimiert werden – ausschlaggebend sind hier der weitere Verlauf der CO-Entwicklung und die Einhaltung der Sicherheitsgrenzen im Coward-Diagramm. Ggf. können die Verschlüsse vorverlegt werden, um einen kürzeren Zugang zum Brandbereich zu erhalten, und verbleibende Glutnester in den inertisierten Grubenbauen können unter Atemschutz gelöscht werden. Im Fall eines verdeckten Brands muss ggf. eine Objektinertisierung eingebaut und unter Atemschutz in Betrieb genommen werden. Sobald diese Objektinertisierung läuft, kann das Brandfeld im Rahmen eines

fighting in the gob area with suitable direct injection means can be continued under goaf inertization.

Thus, the only way to make sure whether a fire has burned out or has been extinguished or contained via full space inertization is to restore the ventilation in the area, which was rendered inert, on a trial basis. This ventilation trial requires preparations to immediately reseal the opened brattices (seal pipes) and to immediately restart the full space inertization if the fire surges up again. For such a ventilation trial the area around the affected zone should be cordoned off in ample distance. All activities are undertaken by the mine rescue brigade under breathing and flame protection. If the ventilation trial must be aborted because the fire surges up again, the subsequent procedure and time scheme are the same as for a new full space inertization.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Hermülheim, W.: Safe Control of Spontaneous Combustion Goaf Fires in Longwall Mining. 7th International Mine Rescue Body Conference (IMRB), Hanover, 6th to 10th September 2015.
- (2) Hermülheim, W. et al: Handbuch für das Grubenrettungswesen im Steinkohlenbergbau (Colliery Mine Rescue Handbook). Essen, VGE-Verlag, 2007.
- (3) Plan für das Grubenrettungswesen (Colliery Mine Rescue Directives). Edited by the RAG Mine Rescue Center, Herne, Edition: Sept. 2012.
- (4) Hermülheim, W.; Betka, A.: Cutting down Production Loss after Mine Fires and Explosions. Glückauf Mining Reporter I, April 2010, pp 31 – 34.

sogenannten Belüftungsversuchs wieder geöffnet werden. Wenn es danach nicht zu einer erneuten Zunahme der CO-Produktion kommt, kann die Rauminertisierung wieder eingestellt und ggf. die Brandbekämpfung im Alten Mann mithilfe von Injektionsmaßnahmen im Schutz der Objektinertisierung fortgesetzt werden.

Sicherheit darüber, ob ein Brand erloschen oder mittels einer Inertisierung unter Kontrolle gebracht worden ist, lässt sich somit nur durch ein versuchsweises Wiederherstellen der Wetterführung in der zuvor inertisierten Abteilung erzielen. Hierbei sind Vorkehrungen zu treffen, um die zum Lüften geöffneten Verschlüsse sofort wieder schließen und die Rauminertisierung wieder einschalten zu können, falls der Brand erneut auflebt. Bei einem Lüftungsversuch muss der betroffene Teil des Grubengebäudes weiträumig abgesperrt werden. Alle nötigen Arbeiten werden von der Grubenwehr unter Atem- und Flammenschutz durchgeführt. Im Falle eines Wiederauflebens des Brands sind Vorgehensweise und Abfolge im Wesentlichen gleich wie bei der erstmaligen Inbetriebnahme einer Rauminertisierung.

- (5) Hermülheim, W.; Bolesta, M.: Examples of Grouting Techniques in Operational Applications. 6th Int. Symposium on Rock Bolting in Mining & Injection Technology and Roadway Support Systems, Aachen, RWTH, 2008, pp 205 – 224.
- (6) Hermülheim, W.; Beck, K.-D.: Inertization as Means for Reducing Down-Time and the Explosion Risk in Cases of Spontaneous Combustion. 6th Int. Mine Ventilation Congress, Pittsburgh, PA, 1997, pp 299 – 303.

Author / Autor

Dr.-Ing. Walter Hermülheim, Honorary Professor, Institute of Mining, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld/Germany