

## Zur Sonderbewetterung bei staubintensiven Arbeiten

## Quelle des Beitrags

Kegenhoff, J. (2022): Zur Sonderbewetterung bei staubintensiven Arbeiten. GeoResources Zeitschrift (2-2022), S. 33–38.  
Online: <https://www.georesources.net/download/GeoResources-Zeitschrift-2-2022.pdf>

# Zur Sonderbewetterung bei staubintensiven Arbeiten

Dipl.-Ing. (FH) Jens Kegenhoff, Korfmann Lufttechnik GmbH, Witten, Deutschland

Für eine professionelle Reinigung staubhaltiger Luft sind viele technische Zusammenhänge und Parameter zu beachten. Um die Staubfracht aus der Luft zu filtern, muss sie mit Ventilatoren in Bewegung gebracht werden, um die Filter passieren zu können. Für maschinelle oder bergmännische Tunnelvortriebe müssen Belüftung und Entstaubung gut abgestimmt werden. In der Sonderbewetterung müssen für den Staubabtransport und saubere Luft viele Parameter und Zusammenhänge berücksichtigt werden.

**Tunnelbau • Entstaubung • Bewetterung • Arbeitssicherheit • Baubetrieb**

## Einleitung

Mit dem Einsatz von Geräten zur Staubminimierung und Niederschlag ist oftmals für die Beteiligten der Arbeitsprozess zur Entstaubung abgeschlossen. Für die Tunnelmineure und Bergleute in der Praxis ist dies jedoch nur der erste Schritt. Ihnen steht nun ein Werkzeug zur Verfügung, das richtig einzustellen und einzusetzen ist. Der technische Prozess der Staubbekämpfung ist komplex und besteht nicht nur aus der Abreinigungsfunktion des Filters. Der Entstauber muss innerhalb seiner Betriebsparameter betrieben werden. Dies bedingt ein funktionierendes Gesamtsystem. Nur die vor Ort tätigen Bergleute und Mineure können sicherstellen, dass die Staubbekämpfungsmaßnahmen ständig den Betriebsverhältnissen richtig angepasst werden, um die korrekte Funktionalität zu gewährleisten. Im Folgenden wird am Beispiel eines Fräskopfvortriebs die Staubbekämpfung unter solchen Randbedingungen betrachtet, indem die relevanten Einzelaspekte in den Systemzusammenhang gebracht werden. Zwei Teile sind zu unterscheiden:

- ▶ **Teil A:** Trockenentstaubungseinheit hinter der Ortsbrust
- ▶ **Teil B:** Zuluftbewetterung zur Ortsbrust

## Betrachtetes System – Vortrieb mit Baggerfräskopf

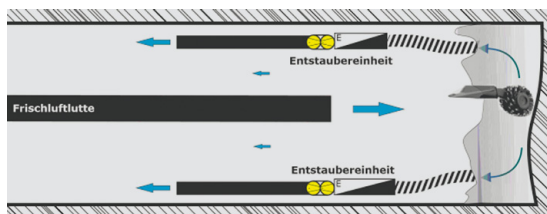
Das Bewetterungsprinzip eines Vortriebs mit Baggerfräskopf (**Bild 1**) und Ortsbrustentstaubung beruht auf zwei grundlegenden Maßnahmen (**Bilder 2 und 3**). Zum einen wird mit einer Frischwetterlutte in blasierender Ausführung Luft zur Ortsbrust zugeführt. Zum anderen werden an der Ortsbrust zwei Absaugleitungen

eingesetzt, um den Staub direkt zu erfassen und über einen Entstauber hinter der Frischwetterlutte wieder gereinigt abzugeben. Somit wird eine klare rückwärtsgerichtete Führung der Abwetter gewährleistet.

Dieses Prinzip bedarf einiger Durchführungsregeln, um die Funktionalität zu gewährleisten und die Filtrierung innerhalb der zulässigen Parameter zu halten. Die



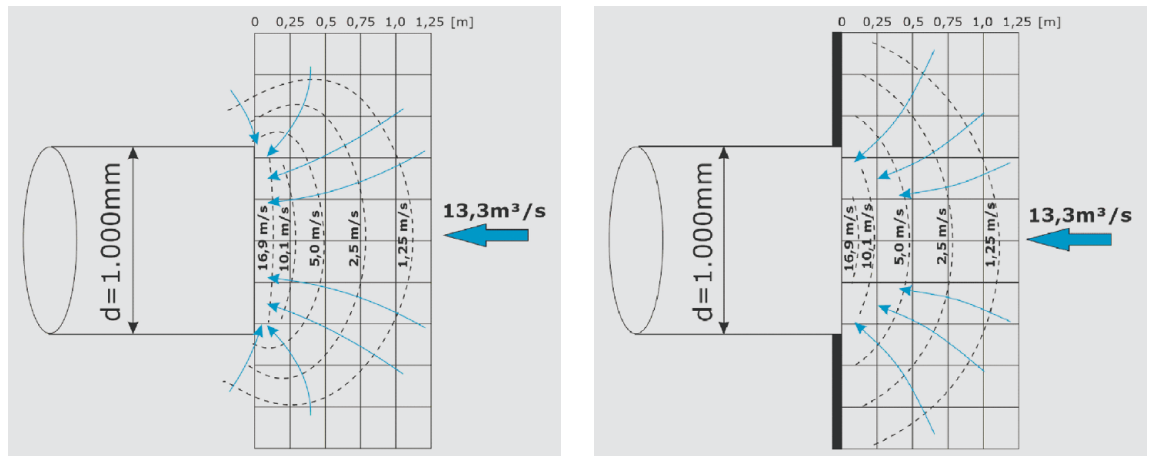
**Bild 1:** Vortrieb mit Baggerfräskopf



**Bild 2:** Grundprinzip der Bewetterung in der Draufsicht



**Bild 3:** Rückblick von der Ortsbrust in Richtung Tunnel auf die Frischluftlutte und die Absaugeinrichtungen



**Bild 4:** Saugglocke – links mit freiem Rohrende und rechts mit Scheibe am Rohrende

wettertechnischen Zusammenhänge in den einzelnen Anlagenteilen spielen für die Wirksamkeit des Gesamtsystems eine große Rolle.

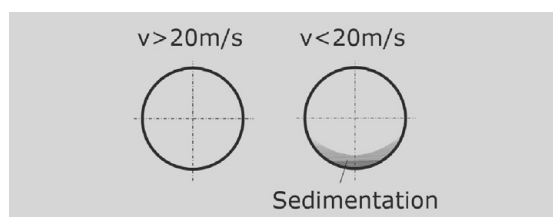
Ein beweglicher Fräskopf (**Bild 1**) wandert an der Ortsbrust über den gesamten Querschnitt und erzeugt unterschiedlich konzentriert verschiedene Mengen Staub. Die verwendeten parallel gesetzten Entstaubungseinheiten saugen von der Ortsbrust über Leitungen die staubbelastete Luft an. Hierbei ist die Positionierung zur Staubentstehung wichtig. Eine gleichmäßige Absaugung soll optimal beidseitig auf etwa ein Drittel der Tunnelhöhe positioniert werden.

Um den Staub sauber über den Querschnitt zu erfassen und nicht in den rückwärtigen Bereich zu entlassen, muss die Wettertechnik eine „stabile“ Staubwand an der Ortsbrust erzeugen. Diese Grenze zwischen Frischluft und Staubausbreitung am Absaugbereich wird durch eine optimale Abstimmung der Absaugmenge und gleichmäßiger Frischluftzufuhr erhalten. Der durch die physikalischen Bedingungen definierte Übergang zwischen Über- und Unterdruck ist die Grenze zwischen staubfreien und staubbelasteten Bereichen.

Ein rein saugendes Bewetterungssystem von der Ortsbrust kann nicht die gleiche Symmetrie der Strömung erreichen wie eine rein örtliche Absaugung in Kombination mit Frischluftzufuhr über eine Sekundärbewetterung. Dies wird deutlich, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten der Ansaugleitungen betrachtet werden.

## Ansaugung

Physikalisch ist klar, dass die Stäube durch den erzeugten Unterdruck angesaugt werden. Eine möglichst gleich-



**Bild 5:** Sedimentation bei kleinen Geschwindigkeiten

mäßige bzw. nah an der Staubentstehungsstelle positionierte Ansaugvorrichtung führt zu höherer Effizienz. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass eine Teileinhausung, wie beispielsweise im **Bild 4** rechts mit Scheibe dargestellt, immense Vorteile für das System bringt. Der Druckausgleich und die Geschwindigkeiten werden verzögert, aber der Einfluss und die Effektivität gesteigert.

Durch den ständig wachsenden Vortrieb ist eine Teilmobilität der Entstaubungsanlagen erforderlich. Da im direkten Vortriebsbereich jegliche Ausrüstung stört, ist eine Verbindungsleitung von der Ortsbrust bis zum Filter notwendig. Diese Saugleitung muss so ausgelegt sein, dass der wirkende Unterdruck nicht die Stabilität gefährdet. Gleichzeitig ist jedoch eine Luftgeschwindigkeit innerhalb der Leitung anzustreben, bei der die Staubpartikel zum Filter transportiert werden kann. Im Saugkanal sollten Luftgeschwindigkeiten von etwa  $20 \text{ m/s}$  erzielt werden. Jegliche Querschnittsänderungen in der Leitungsführung verändern die Luftgeschwindigkeiten im Saugrohr.

Bei Unterschreitung der Mindestgeschwindigkeiten zum Partikeltransport kommt es zur Sedimentation in den Kanälen. Grobe Partikel setzen sich ab (**Bild 5**). Bei der Sedimentation wird ein Zustand erreicht, an dem im Rohr ein Ausgleich zwischen Ablagerung und Luftgeschwindigkeit stattfindet. Als Resultat wird weniger Luft bei höherem Energieverbrauch für die Ventilation transportiert. Die Luftmenge an der Ortsbrust kann möglicherweise nicht mehr ausreichen, um das System stabil zu halten. Ist die Geschwindigkeit im Saugrohr zu hoch, ist mit einem erhöhten Verschleiß und größerer Abrasion zu rechnen. Weiterhin haben die oftmals im Einsatz befindlichen Spirallutten eine physikalische Grenze, an welcher der Innendruck die Spiralen zusammenlegt. Infolgedessen wird der Querschnitt stark verringert, und abhängig davon verändern sich die Luftmenge und Leistung.

## Filtereinheit

Veränderte Luftmengen und -geschwindigkeiten haben ebenfalls Auswirkungen auf den Entstauber. Der Trockenentstauber mit Kompaktfiltelementen (**Bild 6**)



verzeiht dem Anwender zwar einige Abweichungen des Nennvolumenstroms, trotzdem sind auch hier Grenzen gesetzt. Die Überschreitung dieser Grenzen hat lufttechnische Konsequenzen.

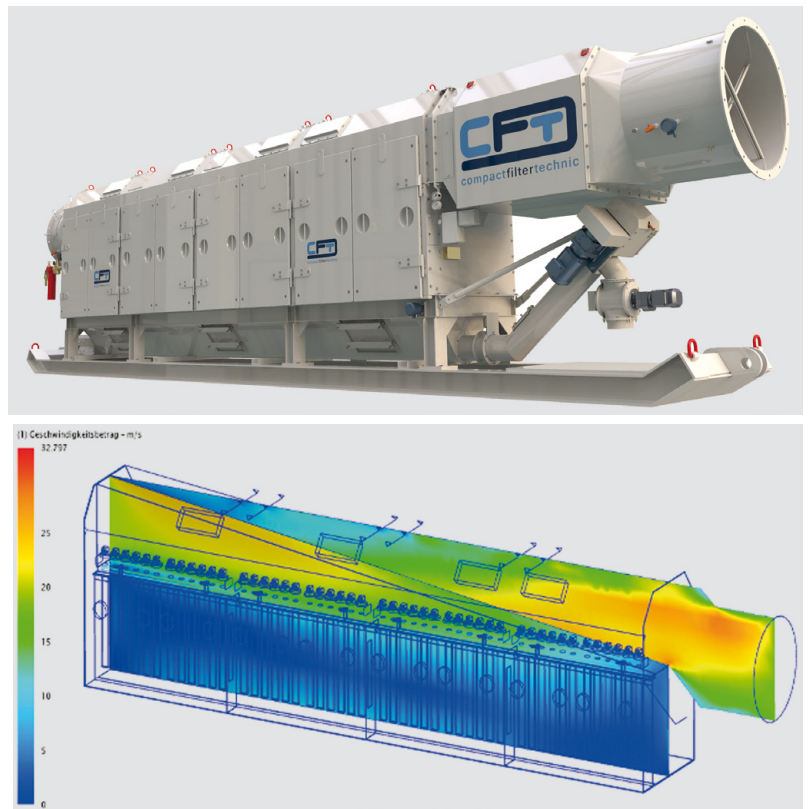
Mit einer Erhöhung des Luftvolumens über die Nominalmenge des Filters steigen der Druckwiderstand sowie die Luftgeschwindigkeiten in den Kanälen überproportional. Mit den höheren Geschwindigkeiten steigt der Materialverschleiß in Abhängigkeit der Staubkorneigenschaften. Treffen Partikel mit übermäßiger Geschwindigkeit direkt auf das Filtermaterial, wird es nach und nach beschädigt. Günstigerweise kann eine hohe Druckdifferenz dem eigentlichen Filtermaterial fast nichts anhaben. Dennoch bedeutet ein hoher Widerstand durch Filter und Filterkuchen eine Reduktion der Abreinigungsfunktion. Die stoßweise Abreinigung mit Druckluft könnte den Flächendruck nicht überwinden und die Reinigungsleistung reduzieren. Dies ist oftmals nicht offensichtlich für den Anwender, da die Druckluft mit einem Betriebsdruck von etwa 4,5 bar ansteht (Bild 7).

Durch Freigabe und Expansion über das gesamte Filter reduziert sich der Druckwert in der Fläche, sodass bei einem Gesamtwiderstand von 5 bis 6 kPa keine sorgfältige Abreinigung möglich ist. Daraus folgen eine Luftvolumenabnahme und der Zusammenbruch des gesamten Wettersystems.

Weiterhin ist bei Trockenfilterelementen jeglicher Wassereintrag zu vermeiden. Denn mit Feuchtigkeit verliert das Material seine Stütz- und Filterstruktur. Gleichzeitig kann der Filterkuchen nicht mehr sauber abgereinigt werden. Der Kuchen verdickt sich, und das Filtersystem weist weniger Durchlässigkeit auf.

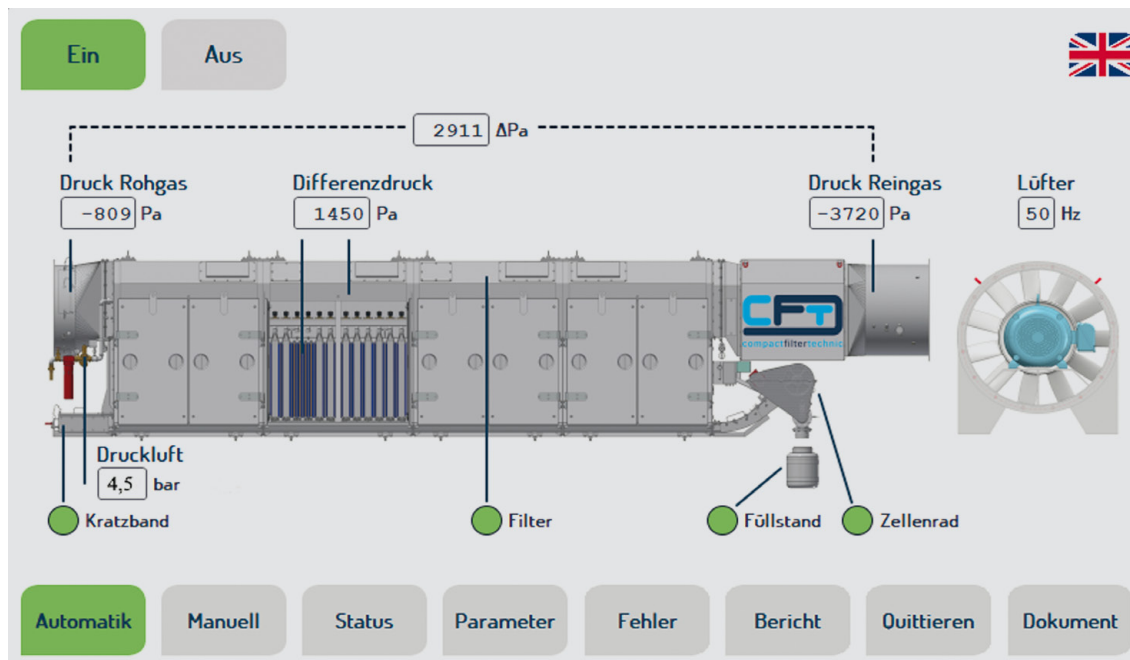
### Ventilator

Bei einem sorgfältig betriebenen System und einer Filtereinheit, deren Abreinigung den Grenzwerten

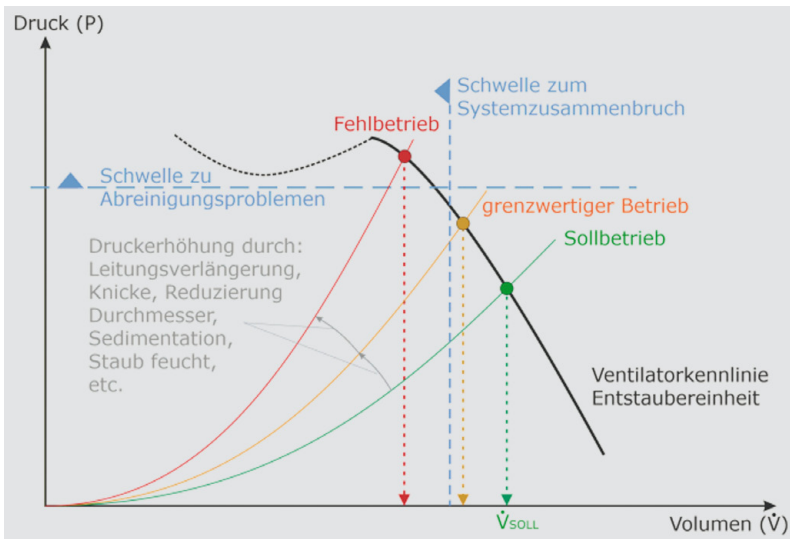


**Bild 6:** System Trockenentstauber mit Kompaktelementen – patentiertes neues System CFT

entspricht, ist der Betrieb der Ventilatoreinheit unproblematisch, sofern dieser korrekt spezifiziert wurde. Natürlich sind bei Auswahl des Ventilators nicht nur die Strömungswiderstände der einzelnen Filter, sondern auch die Zu-, und Abluftleitungen im Gesamtwiderstand zu berücksichtigen. Entsprechend muss das Gesamtsystem bei der Auslegung bereits mit den be-



**Bild 7:** Betriebsdaten der Filtereinheit



**Bild 8:** Ventilatorcharakteristik



**Bild 9:** Flügelrad bei Staubförderung



**Bild 10:** Verschleiß durch Staub



**Bild 11:** Oberflächenoptimiertes Flügelrad gegen Staubablagerungen

trieblichen Abläufen richtig abgestimmt sein. Eine Verlängerung der Saugleitung oder eine Reduzierung der Rohrdurchmesser im Nachhinein führen zu einem anderen Betriebspunkt und zu Luftmengenveränderungen im System mit den zuvor beschriebenen Konsequenzen. Es sind insbesondere die Schwellenüberschreitungen zu verhindern, welche zum Bewitterungszusammenbruch bzw. zu einzelnen Problemen führen können. Als Beispiel ist die Geschwindigkeitsminimierung im Überlappungsbereich zu nennen. Das Diagramm im **Bild 8** fasst die Zusammenhänge zusammen.

Wenn ein Ventilator entweder vor der Filtereinheit eingesetzt wird bzw. durch falsche Filtration staubbelastet ist, kann dies zu erheblichen Problemen am Lüfter führen. Staubpartikel führen besonders an den Bauteilen mit hohen Umgebungsgeschwindigkeiten, wie den Flügelspitzen, zum abrasiven Verschleiß, (**Bilder 9 und 10**). Eine Formänderung des Flügelprofils führt zu Ablösungen und zu inhomogenen Strömungen mit verminderter Leistung. Die Standzeit des Flügels reduziert sich extrem. Diese Betriebsart führt zu hohen Wartungs- und Ersatzteilkosten.

Bei feuchtem bzw. adhäsivem Staub besteht zusätzlich die Gefahr von Anbackungen. Diese sind durch die Rotationsbewegung des Flügelrads zuerst gleichmäßig. Mit zunehmender Dicke besteht die Gefahr von teilweisen Abplatzungen, welche zu Unwuchten des Rads führen. Mittelfristig werden dadurch Lagerschäden herbeigeführt. Sollte der Ventilator nicht in bergbaugerechter Ausführung (**Bild 11**) ausgebildet sein, sind weitere Schäden durch eintretenden Staub in die Elektrik, zu geringe Materialstärken und viele unregelmäßige Absetzungen des Staubs auf Rotationsflächen wesentlich frühzeitiger möglich. Auch ein kompletter Flügelbruch ist nicht auszuschließen.

## Zuluftsystem

Nach der Betrachtung der Entstaubungskomponenten wird deutlich, dass die Entstaubung mit dem Gesamtsystem der Frischwetterzufuhr in absoluter Abhängigkeit steht. Am Beispiel des beweglichen Fräskopfs ist die Sicherstellung der stabilen Staubwand systemrelevant. Aus den Erfahrungen im Tunnelbau und aus Untersuchungen unter explosiven Gasbedingungen im Bergbau haben sich Positionierungsregeln der Komponenten ergeben, welche die Funktionalität sicherstellen (**Bild 12**).

Da die strömungsbedingten Druckverluste sehr vom Streckenprofil abhängig sind, errechnen sich die Abstandsmaße entsprechend aus der Wurzel des Querschnitts. Die Staubwand bildet sich von der Ortsbrust bei optimaler Mengenauslegung des Absaugvolumens (abhängig von der Schnittfläche und Vortriebsart) bei etwa kleiner  $\frac{1}{4} \cdot \sqrt{A}$ . Der nachfolgende Abstand zur Ausblaslutte der Frischluftzufuhr ist mit mindestens  $10 \cdot \sqrt{A}$  so gewählt, dass der austretende Luftstrahl expandiert und sich eine gleichmäßigere Strömung über den Gesamtquerschnitt ausbreitet. Die austretende Ge-



schwindigkeit des Kernstrahls kann durch stoß- bzw. firstnahe Montage die Reichweite beeinflussen. Wandnahe Montage vergrößert die Reichweite. Sie kann aber durch ungünstige Oberflächenbeschaffenheit frühzeitig abgelenkt werden. Hier ist zu beachten, dass eine hohe Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe umliegende Stäube aufwirbeln kann. Die Kernstrahlgeschwindigkeit selbst muss vor der Staubwand bereits soweit abgeflaut sein, dass die Geschwindigkeitsvektoren im Gesamtquerschnitt relativ gleichmäßig sind. Eine ungleichmäßige Verteilung würde die Staubwand partiell aufreißen, destabilisieren und eine vollständige Stauberfassung unmöglich machen. Dieses Problem kann durch einen axialen Verschluss am Luttenende bei gleichzeitig radialen Öffnungen in den letzten Luttenendstücken z. B. durch eine Lochlutte realisiert werden. In der Praxis wird hierbei oft ein Hybridsystem, bestehend aus einer Absperrklappe und nachfolgenden Loch- bzw. Wirbellutten eingesetzt. Dieses System bietet hohe Flexibilität in der Anwendung. Mit einer axial geöffneten Klappe kann der Kernstrahl bis zur Ortsbrust gelangen und die volle Luftvolumenmenge in die Strecke geführt werden (Bild 13). Insbesondere bei Arbeiten, bei denen kein Staub freigesetzt wird, kann so der Vortrieb ohne den Einsatz der saugenden Entstaubung bewerteter werden. Für staubintensive Arbeiten wird das Gesamtsystem in Betrieb genommen, die Klappe der Ausblaslutte geschlossen, und die Wetter strömen über die radialen Öffnungen gleichmäßig über die Strecke zur Ortsbrust. Die Staubwand wird nicht irritiert und bleibt stabil.

Praktisch ist es fast unmöglich, zwischen Ausblasende der Lutte und Ortsbrust eine gleichmäßig profilierte Durchströmung des Tunnelquerschnitts zu erreichen. Betriebsbedingt kann es Örtlichkeiten geben, die nicht ausreichend lufttechnisch ausgetauscht werden. Dazu gehört auch der Überlappungsbereich zwischen Ausblasende der Lutte und Ausblasende der Entstaubungseinheit. Diese Überlappung sollte möglichst klein sein, aber dennoch ausreichend groß, damit die Wetterführung sich überhaupt wie gewünscht einstellt. Eine möglichst kurze Überlappung sollte realisiert werden, da die Wettergeschwindigkeit in diesem Teil des Tunnelquerschnitts nur aus der Differenz der ankommenden und der absaugenden Wetter besteht. Aufgrund wirtschaftlicher Interessen und physikalischer Grenzen werden die Luftmengen für diesen Bereich meist nicht zusätzlich gesteigert. Diese minimale Luftmenge darf teilweise vorgegebene Mindestluftgeschwindigkeiten nur dann unterschreiten, wenn sichergestellt ist, dass der Querschnitt vollumfänglich gespült wird. Das ist mit den beschriebenen konventionellen Maßnahmen, oft nicht erreichbar. MAK-Überschreitungen (MAK: Maximale Arbeitsplatz-Konzentration) sind möglich. Das ist insbesondere dann problematisch, wenn der Vortrieb unter Gaseintritt steht. Explosive Gasnester müssen vermieden werden.

Eine Lösung wurde in der deutschen Kohlenindustrie entwickelt. Die gelochte bzw. radial geöffnete Frischwetterlutte wurde am Ausblasende durch eine sogenann-

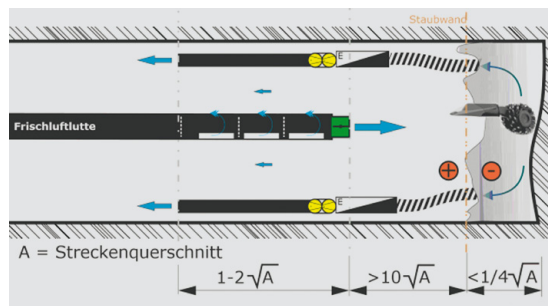


Bild 12: Systembedingte Abstände

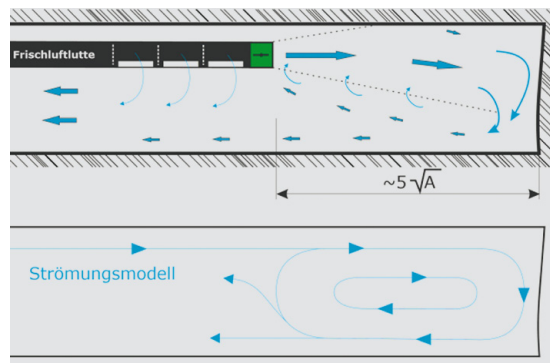


Bild 13: Strömungsmodell Ausblaslutte bei geöffneter Klappe

te „Wirbellutte“ oder auch „Coandälutte“ getauscht (Bilder 14 bis 16). Der bei diesem System ausgenutzte physikalische Coandä-Effekt erzeugt eine radiale Drehströmung an der äußeren Luttenwand. Durch einen genau abgestimmten Längsschlitz in der Lutte und gleichzeitig axialen Luttenverschluss durch eine Klappe strömen die Wetter tangential aus. Die erzeugte Drallströmung spült den gesamten Querschnitt besser als eine gelochte Lutte und verhindert die örtliche Bildung von Schadstoffnestern bzw. Gasansammlungen. Der Luftaustausch wird gewährleistet. Gleichzeitig werden die Frischwetter relativ gleichmäßig zur Ortsbrust und Absaugung geführt. Die Staubwand wird nicht durch hohe dynamische Stromfäden aufgebrochen und bleibt nachhaltig stabil.

## Fazit

Das wirksame Entstaubungskonzept beruht auf abgestimmten Komponenten, die gemäß Spezifikation und

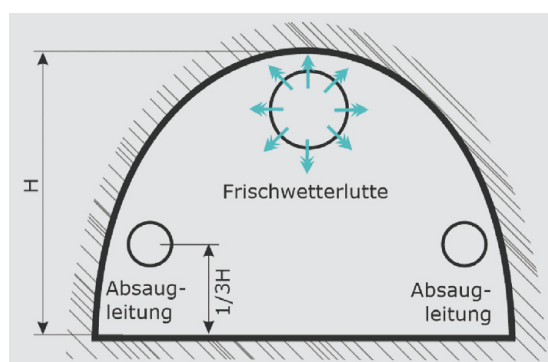
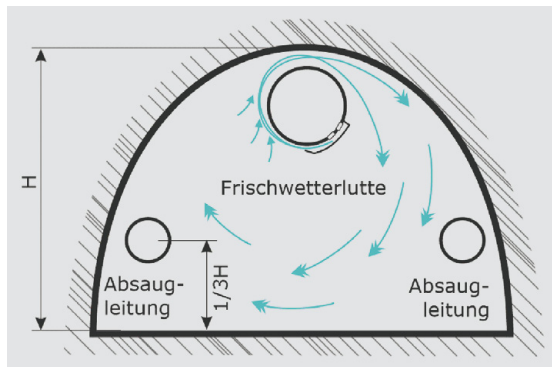


Bild 14: Gelochte Frischwetterlutte

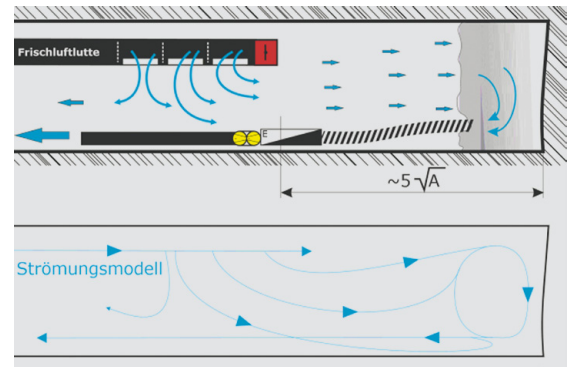


**Bild 15:** Wirkung mit Wirbellutte

Betriebsablauf betrieben werden müssen, um die Funktionalität zu gewährleisten. Neben den zuvor beschriebenen möglichen Problematiken sind viele weitere technische Aspekte vom Anwender zu berücksichtigen bzw. zu kontrollieren. Beispielsweise sind zu nennen:

- ▶ Eine schadstofffreie Frischwetterzufuhr ist zu gewährleisten.
- ▶ Lutten und Wetterleitungen sind leckagefrei zu halten und auf Beschädigung zu prüfen.
- ▶ Abgefilterter Staub ist gefähderungsgerecht abzutransportieren und zu entsorgen.
- ▶ Anlagenteile sind den Herstellervorschriften entsprechend zu warten und ggf. sogar den eigenen Betriebsabläufen anzupassen.
- ▶ Weitere gefährdete Arbeitsstellen sind zusätzlich zu schützen, beispielsweise durch gefilterte Kabinen des Maschinenführers.
- ▶ Auspuffrohre des Fuhrparks dürfen nicht zum Boden hinführen.
- ▶ Weitere Maschinen im Vortriebsbereich können den Luftaustausch örtlich beeinflussen. Eine Erweiterung der Bewetterungsmaßnahmen beispielsweise durch Luftstrahldüsen kann erforderlich werden.
- ▶ Notwendige Wetterkühlmaschinen benötigen eine noch genauere Abstimmung des Konzepts, da die Klimaberechnung genau mit den Wettermengen und Temperaturen korrespondieren muss.
- ▶ Vortriebe unter explosionsgefährdeter Umgebung benötigen zusätzliche Wetterszenarien, wie Wetterumkehr oder Spülung nach Gaseintritt. Dies erfordert weitere Maßnahmen innerhalb der Wetterleitungen mit einer noch höheren Betriebssicherheit der Komponenten.

Nach den heute geltenden Staubvorschriften und Grenzwerten ist eine ordentliche Konzeptplanung absolut erforderlich, um den Gesundheitsschutz bei gleich-



**Bild 16:** Strömungsmodell mit Wirbellutte

zeitig wirtschaftlichem Vortrieb einzuhalten. Hierzu sind nicht nur Entstaubungskomponenten erforderlich, die einem hohen technischen Standard entsprechen, sondern auch geschultes Personal. Dieses kennt die Zusammenhänge und kann nach Gefährdungsbeurteilung handeln sowie die ständige Wirksamkeit überprüfen.

## Literaturverzeichnis

Der Artikel basiert auf einem Vortrag beim 5. Internationalen Freiburger Fachkolloquium, Stäube und Staubbekämpfung:

Kegenhoff, J.: Zusammenhänge der Sonderbewetterung mit staubintensiven Arbeiten. In: Mischo, H., und Krichler, T. Beiträge zum 5. Internationalen Freiburger Fachkolloquium, Stäube und Staubbekämpfung, Freiberg, 2021

- [1] Graumann, K.; Düpre, G. (1978): Die Bewetterung im Bereich von Vortriebsmaschinen mit Entstaubungsanlagen. Bergbau 6/1978
- [2] Schweizer Ingenieur- und Architekten-Verein (1998): SiA196 Baulüftung im Untertagebau
- [3] BauIndustrie / Bauen Agrar Umwelt / BG Bau (2019): Branchenlösung Staubminimierung im Tunnelbau
- [4] Reuther (1989): Lehrbuch der Bergbaukunde. 11. Auflage, Verlag Glückauf

### Dipl.-Ing. (FH) Jens Kegenhoff

Geschäftsführer, Korfmann  
Lufttechnik GmbH, Witten,  
Deutschland



#### Kontakt:

jens.kegenhoff@korfmann.com