

7. Bewetterung durchschlägiger Grubenbaue – Hauptbewetterung

Durchschlägige Grubenbaue sind solche untertägigen Grubenräume, von denen aus wenigstens zwei getrennte und voneinander unabhängige Verbindungen zur Tagesoberfläche bestehen. Um solche Grubenbaue bewettert zu können, müssen sie somit mindestens zwei Tagesöffnungen besitzen. Durch die eine Tagesöffnung gelangen Frischwetter in das Bergwerk, während durch die andere Tagesöffnung Abwetter aus dem Bergwerk nach über Tage zurückströmen. Damit jedoch eine solche Wetterbewegung stattfinden kann, bedarf es einer hierfür erforderlichen treibenden Kraft in Form eines Druckgefälles.

Auf kleineren Bergwerken kann für das erforderliche Druckgefälle ein natürlicher Auftrieb sorgen. Wenn man mechanische Energiequellen – wie zum Beispiel tropfendes Wasser – hierbei zunächst einmal außer Betracht lässt, wird beim natürlichen Auftrieb das Druckgefälle insbesondere durch thermische Energie erzeugt. Dabei bewirkt die Erwärmung sowie die Wasserdampfaufnahme der Wetter eine Dichteänderung, die nicht durch den Teufenunterschied bedingt ist. Diese Dichteänderung verursacht ein Druckgefälle, den natürlichen Auftrieb.

Wenn der natürliche Auftrieb zur Bewetterung eines Bergwerks nicht ausreicht, verwendet man zur Erzeugung des erforderlichen Druckgefälles einen oder mehrere Ventilatoren.

7.1 Bewetterungsarten

7.1.1 Saugende beziehungsweise blasende Bewetterung

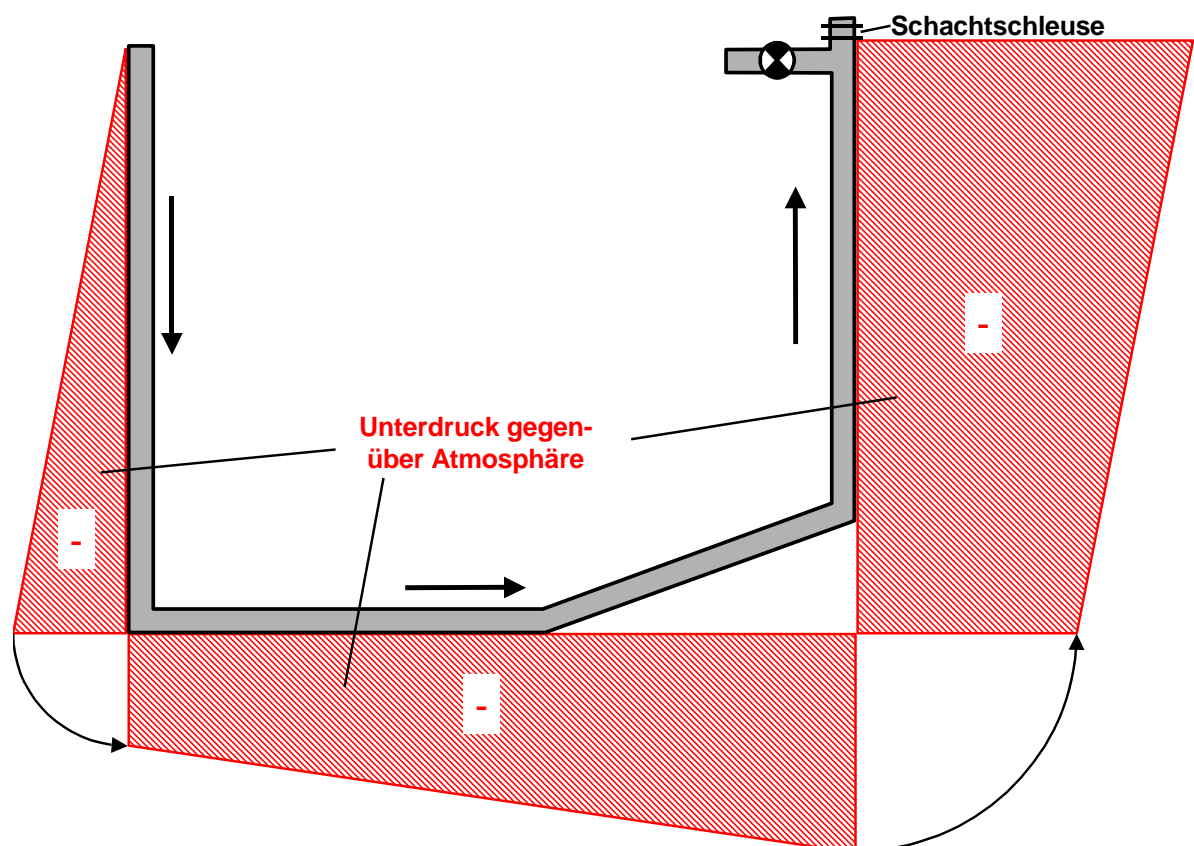


Bild 143: Saugende Bewetterung eines Bergwerks

Wenn der Ventilator nahe dem ausziehenden Tagesschacht errichtet ist, dann wird das

Bergwerk saugend bewettert. Das bedeutet, dass der atmosphärische Druck im Bergwerk gegenüber der ursprünglich unbeeinflussten Atmosphäre verringert wird und somit ein Druckgefälle von der Tagesoberfläche am Einziehschacht bis hin zum Ventilator am Ausziehschacht entsteht (Bild 143). Die Wetter folgen dabei bezüglich ihrer Richtung diesem Druckgefälle.

Wenn der Ventilator dagegen nahe dem einziehenden Tagesschacht errichtet ist, dann wird das Bergwerk blasend bewettert. Das bedeutet, dass der atmosphärische Druck im Bergwerk gegenüber der ursprünglich unbeeinflussten Atmosphäre erhöht wird und somit ein Druckgefälle vom Ventilator am Einziehschacht bis hin zur Tagesoberfläche am Ausziehschacht entsteht (Bild 144). Die Wetter folgen dabei bezüglich ihrer Richtung wiederum diesem Druckgefälle.

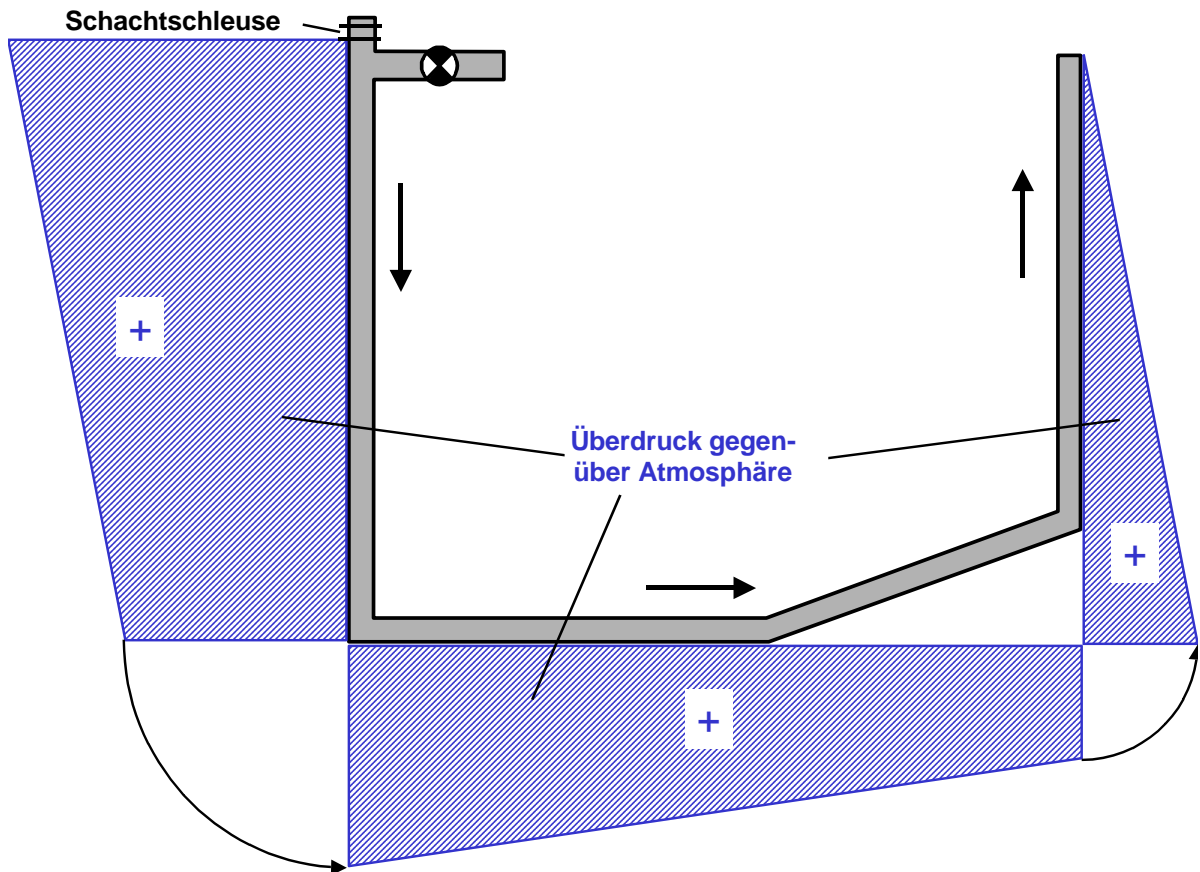


Bild 144: Blasende Bewetterung eines Bergwerks

Die Förderung gelangt allgemein zur tiefsten Sohle eines Bergwerks. In den meisten Fällen werden die Wetter jedoch von der tiefsten Sohle aufwärts zu den höher gelegenen Sohlen geführt. Der zu betreibende Aufwand ist gewiss bedeutend größer, wenn im Förderschacht ein Ventilator mit der damit notwendigerweise erforderlichen Schachtschleuse vorhanden ist. Dies ist ein praktischer Grund, weshalb die saugende Bewetterung deutlich verbreiteter ist als die blasende Bewetterung. Die blasende Bewetterungsart findet man allenfalls auf Stollenbergwerken.

Ein sicherheitlicher Grund, der für die saugende Bewetterung spricht, trifft insbesondere auf Grubengas führende Bergwerke zu. Wenn man unterstellt, dass die Bewetterung durch den Ausfall des Hauptgrubenventilators unterbrochen werden könnte, dann würde bei Anwendung der saugenden Bewetterung der atmosphärische Druck im Bergwerk ansteigen. Dieser plötzliche Druckanstieg würde das im Gebirge sowie in den abgedämmten Hohlräumen anstehende Grubengas zunächst zurückdrängen und aus dem offenen Grubengebäude fernhalten. Bei blasender Bewetterung würde dagegen bei einem entsprechenden Ereignis der atmosphärische Druck im Bergwerk fallen. Das bedeutet, dass nicht nur die zur Verdünnung und für den Abtransport des Grubengases erforderliche Wetterführung unterbrochen wäre,

sondern zusätzlich würde das im Gebirge sowie in den abgedämmten Hohlräumen anstehende Grubengas in das offene Grubengebäude zuströmen, wobei unter Umständen kritische Situationen entstehen könnten.

7.1.2 Aufwärtsführung beziehungsweise Abwärtsführung der Wetter

Wie bereits oben erwähnt, werden die Wetter überwiegend von der tiefsten Sohle aufwärts zu den höher gelegenen Sohlen geführt (Bild 145 links). Es kann aber auch durchaus vorteilhaft sein, die Wetter von der oberen Sohle abwärts zu den tiefer gelegenen Sohlen zu führen (Bild 145 rechts). Die jeweiligen Vor- und Nachteile werden nachfolgend diskutiert.

Aufwärtsführung der Wetter:

Abwärtsführung der Wetter:

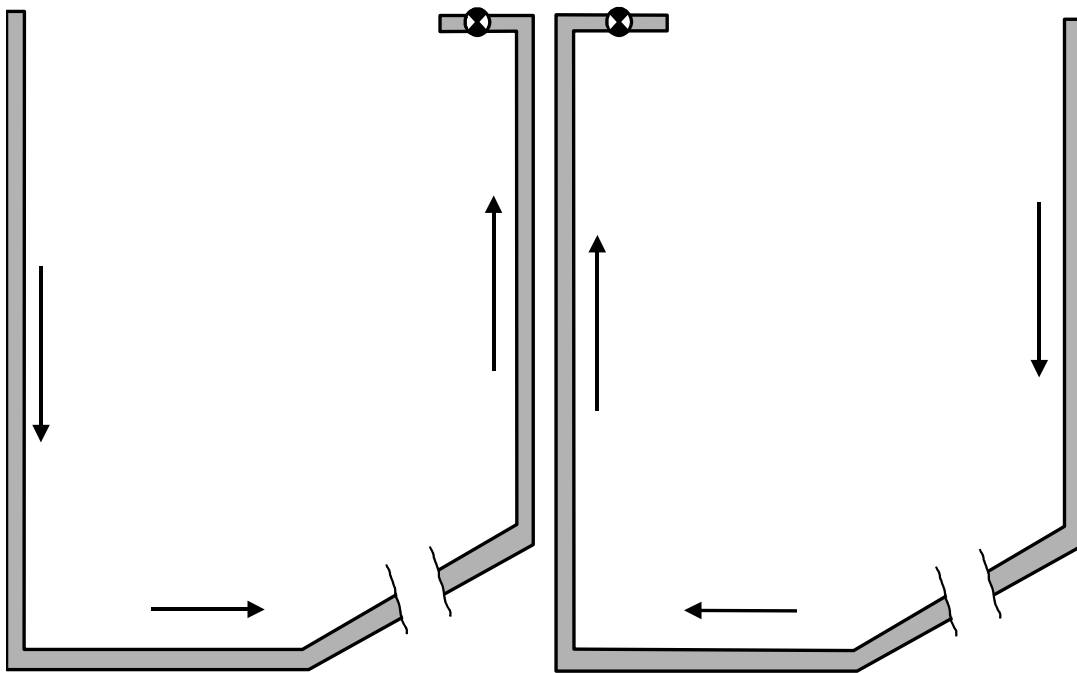


Bild 145: Auf- bzw. Abwärtsführung der Wetter

Ein wesentlicher sicherheitlicher Vorteil der Aufwärtsbewetterung ist im Zusammenhang mit einem möglichen Grubenbrand zu sehen. Die Brandschwaden würden dabei dem Abwetter-schacht und nicht dem Förderschacht zugeführt. Die vom Brandereignis betroffene Beleg-schaft könnte sich abwärts zur tiefsten Sohle in Richtung der unbelasteten Frischwetter zu-rückziehen. Der Förderschacht wäre zudem vom Brandereignis unberührt und könnte wei-terhin in seiner Funktion genutzt werden.

Ein Brand in einem geneigten Grubenraum bewirkt grundsätzlich eine Druckerzeugung und somit einen natürlichen Auftrieb. In einem abwärts bewetterten Grubenraum wirkt der natürli-che Auftrieb der planmäßigen Wetterrichtung entgegen. Je nach Höhe der durch einen Brand entstandenen Druckerzeugung kann es im abwärts bewetterten Grubenraum zu einer Ver-ringerung des ursprünglichen Wetterstromes, zu einem Wetterstillstand oder sogar zu einer Wetterumkehr kommen.

In einem aufwärts bewetterten Grubenraum dagegen wirkt bei einem Brand der natürliche Auftrieb in die gleiche Richtung wie die planmäßige Bewetterung. Die durch einen Brand ent-standene Druckerzeugung führt daher zu einer Verstärkung der Bewetterung im betroffenen Wetterweg. Es muss allerdings auch bedacht werden, dass ein Brand in einem aufwärts be-wetterten Grubenraum zu einer Schwächung der Bewetterungsstabilität in einem dazu pa-rallelen Wetterweg führen kann.

Ein wesentlicher Vorteil einer Abwärtsbewetterung ist gegenüber einer Aufwärtsbewetterung in klimatischer Hinsicht vorhanden. Hierbei gelangen die Frischwetter über die kühleren oberen Sohlen auf kurzen Wegen in die Abbaubetriebe. Die Frischwetter kommen dabei nicht mit dem Förderstrom in Berührung; dadurch kann auch keine Wärme und Wasserdampf aus der Förderung an die Frischwetter übertragen werden. Auf der tiefen Fördersohle treffen die Abwetter dann im Gleichstrom auf den Förderstrom. Die Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Wetterstrom und dem Förderstrom sind bei Gleichstrom geringer als bei Gegenstrom, was wiederum günstig hinsichtlich der Vermeidung von Staubentwicklungen ist.

Ein Nachteil der Abwärtsbewetterung kann bei Grubengas führenden Bergwerken dann auftreten, wenn die Frischwetter entlang alter, abgedämmter Grubenräume geführt werden. Hierbei kann es vorkommen, dass – insbesondere bei fallendem Luftdruck – Grubengas in den Frischwetterstrom gelangt und dies in den Abbaubetrieben zu einer Vorbelastung mit Grubengas führt.

7.2 Verteilung der Wetter in einem Bergwerk

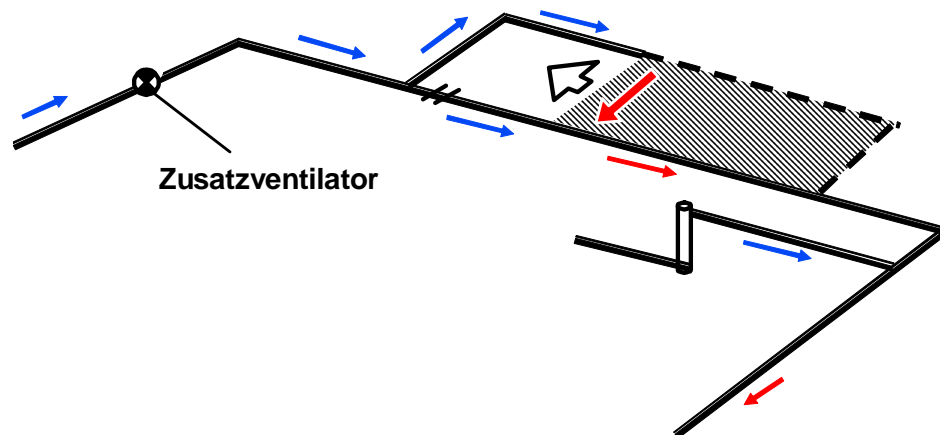
Ließe man in einem verzweigten Bergwerk das vom Hauptgrubenventilator erzeugte Druckgefälle ohne weitere Maßnahmen auf das Grubengebäude wirken, dann folgten die Wetter dem Weg des geringsten Widerstandes. Dabei bekämen Grubenräume mit kurzen und weiten Wetterwegen den Hauptanteil des Wetterstroms zugeführt, während Grubenräume mit langen und engen Wetterwegen nur mit einem geringen Anteil des Wetterstroms versorgt würden. Um alle Grubenräume – und hierbei insbesondere die häufig an der Peripherie liegenden Abbaubereiche, die oft ein geringes Wetterdruchlassvermögen haben – mit den erforderlichen Wetterströmen zu versorgen, muss regulierend in die Verteilung der Wetter eingegriffen werden. Das bedeutet, man muss dazu schwache Wetterströme stärken und starke Wetterströme schwächen. Obendrein ist es – insbesondere in Grubengas führenden Bergwerken – unbedingt erforderlich, die verschiedenen Wetterströme derart zu trennen, dass Abwetter aus einem Abbaubereich keinem anderen Abbaubetrieb mehr zugeführt werden.

7.2.1 Stärkung schwacher Wetterströme

Schwache Wetterströme stärkt man dadurch, dass man bei gegebenem Druckgefälle beispielsweise den Strömungswiderstand des betreffenden Wetterweges verringert. Dies geschieht entweder durch eine Vergrößerung der Querschnittsflächen wie zum Beispiel durch Senken der Streckensohle oder durch die Beseitigung unnötiger querschnittsversperrender Einbauten in den entsprechenden Wetterwegen. Eine Vergrößerung der Querschnittsflächen erreicht man aber auch dadurch, dass man parallele Wetterwege schafft. Schließlich kann man schwache Wetterströme durch den Einsatz von Zusatzventilatoren oder durch Strahlventilatoren stärken. Dabei wird der hohe Druckverbrauch in dem zu stärkenden Wetterstrom durch eine künstliche Druckquelle in Form eines Ventilators ausgeglichen.

Der Einsatz von Zusatzventilatoren ist sorgfältig zu planen, weil dadurch die Drucksituation im gesamten Grubengebäude beeinflusst werden kann. Ein Zusatzventilator wird in dem untertägigen Wetterweg installiert, dessen Wetterstrom zu stärken ist. (Bild 146 oben). Der Streckenabschnitt, in dem ein Zusatzventilator installiert werden soll, sollte sich möglichst in einem vom Abbau unbeeinflussten Bereich befinden, da ansonsten durch die vom Zusatzventilator entstehende Druckquelle unbeabsichtigte Schleichwetterströme entstehen würden. Bei Grubengas führenden Bergwerken ist zusätzlich darauf zu achten, dass der Zusatzventilator auf der Frischwetterseite eines Abbaubetriebes installiert wird, damit er nicht mit unzulässigen Grubengaskonzentrationen in Berührung kommen kann und dabei gegebenenfalls abgeschaltet werden muss. Der Druckunterschied zwischen der Saug- und der Druckseite eines Zusatzventilators stellt die künstlich erzeugte Druckquelle dar. Um diese Druckquelle nutzen zu können, muss zwischen der Saug- und der Druckseite eine möglichst dichte und mechanisch stabile Trennung vorhanden sein (Bild 146 unten). Um Transport am Zusatzven-

tilator vorbei zu ermöglichen, ist die Trennung zwischen Saug- und Druckseite in Form einer Wetterschleuse zu errichten.



Draufsicht:

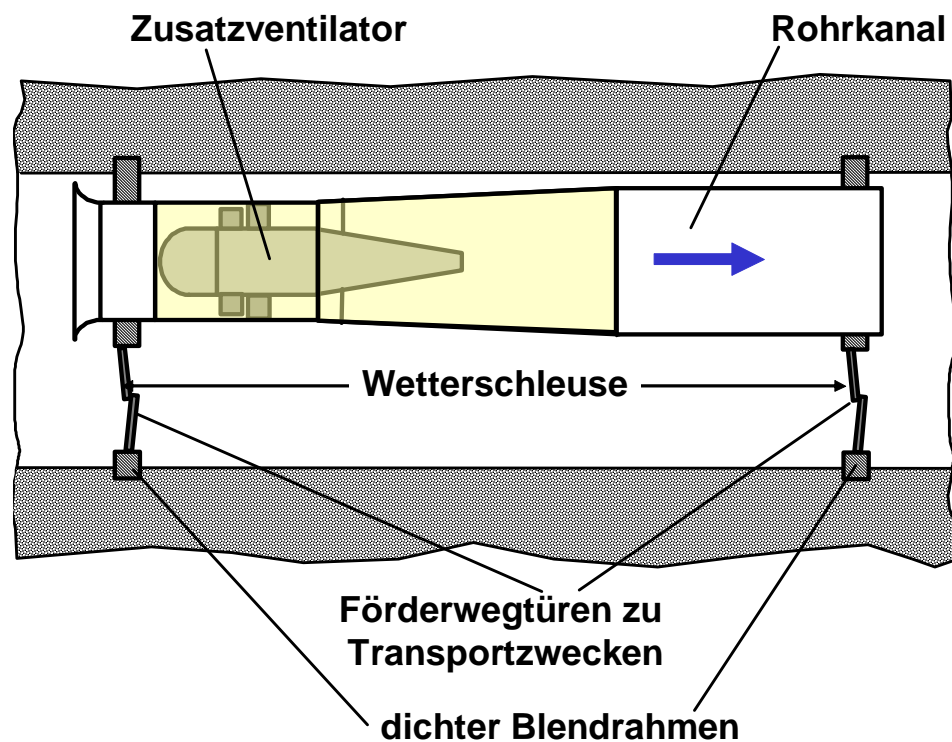


Bild 146: Stärkung eines schwachen Wetterstromes durch den Einsatz eines Zusatzventilators

Strahlventilatoren werden in dem untertägigen Wetterweg installiert, dessen Wetterstrom zu stärken ist. (Bild 147 oben). Dabei werden meist mehrere Strahlventilatoren in Abständen zueinander angeordnet. Bei Grubengas führenden Bergwerken ist darauf zu achten, dass Strahlventilatoren auf der Frischwetterseite eines Abbaubetriebes installiert werden, damit sie nicht mit unzulässigen Grubengaskonzentrationen in Berührung kommen können und dabei gegebenenfalls abgeschaltet werden müssen. Im Gegensatz zu einem Zusatzventilator ist bei einem Strahlventilator nicht der Druckunterschied zwischen der Saug- und der Druckseite als Druckquelle maßgeblich, sondern der Impuls der mit hoher Geschwindigkeit aus dem Ventilator austretenden Wetter. Dieser Impuls sorgt dafür, dass die umgebenden Wetter mitgerissen werden. Somit wird dem Wetterstrom seine erforderliche Stabilität aufgeprägt.

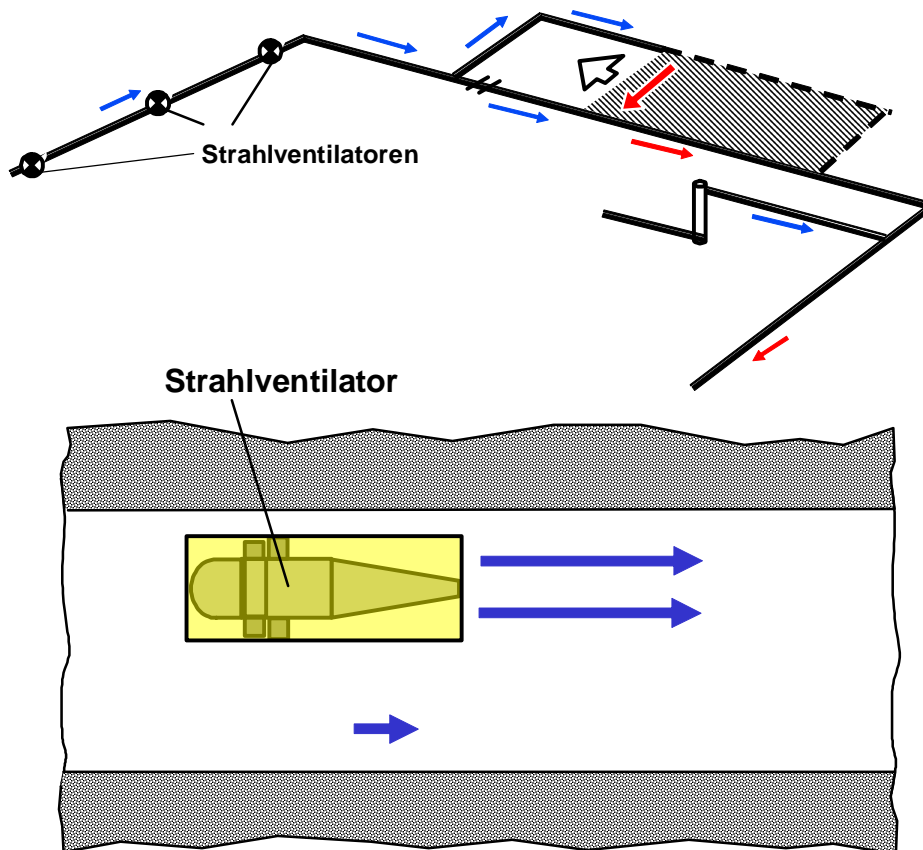


Bild 147: Stärkung eines schwachen Wetterstromes durch den Einsatz eines Strahlventilators (Impulsventilators)

Der Einsatz von Zusatz- oder Strahlventilatoren sollte sich grundsätzlich auf den Ausnahmefall beschränken, denn jeder zusätzlich im allgemeinen Grubengebäude betriebene, die Hauptbewetterung beeinflussende Ventilator, bedeutet nicht nur einen hohen Kosten- und Überwachungsaufwand, sondern stellt auch eine mögliche Fehlerquelle im Bewetterungssystem dar.

7.2.2 Schwächung starker Wetterströme

Üblicherweise legt man den Hauptgrubenventilator eines Bergwerks so aus, dass der Wetterweg mit dem höchsten Strömungswiderstand noch hinreichend bewettert wird. Dazu müssen allerdings die vorwiegend geringen Strömungswiderstände der starken Wetterströme in dem Maße beeinflusst werden, dass durch diese Wetterwege lediglich die geplanten und erforderlichen Wetterströme fließen. Dies geschieht durch den Einbau so genannter Wetterbauwerke in die Streckenquerschnitte der zu schwächenden Wetterwege. Wenn nur eine geringe Schwächung des Wetterstroms notwendig ist, dann genügt oft der Einbau einer oder mehrerer hintereinander angeordneter Wetterblenden. Wetterblenden sind stabile, meist gemauerte und mit dem Gebirge verzahnte Blendrahmen mit einer für den zu drosselnden Wetterstrom entsprechend dimensionierten Durchflussöffnung. Wetterbauwerke können jedoch auch abweichend hiervon konstruiert sein, sofern sie dem auf sie wirkenden Druckgefälle standhalten. Sind an dem Aufstellungsort eines Blendrahmens Konvergenzen zu erwarten, kann man dem durch den Einsatz nachgiebiger Baustoffe wie zum Beispiel durch Mineralwolle oder Holz im Bereich des Streckenumfangs vorbeugen oder man erstellt den Blendrahmen als verschiebbare Rahmenkonstruktion.

Wenn eine stärkere Schwächung des Wetterstroms notwendig ist oder wenn sogar eine Trennung zwischen Einziehstrom und Ausziehstrom vorgenommen werden soll, dann ist der Streckenquerschnitt im Bereich der Blendrahmen noch weiter einzuengen. Da der Streckenquerschnitt jedoch auch für die Fahrung und den Transport sowie gegebenenfalls für die För-

derung genutzt werden muss, ist es erforderlich, Fahrwegtüren, Förderwegtüren sowie gegebenenfalls Bandschleusen in die Blendrahmen einzubauen. In solchen Fällen verwendet man Wetterschleusen (Bild 148). Wetterschleusen bestehen aus mindestens zwei Blendrahmen mit entsprechenden Wettertüren beziehungsweise Bandschleusen. Damit soll sichergestellt werden, dass beim Durchfahren einer Wetterschleuse die Türen wenigstens eines kompletten Blendrahmens geschlossen bleiben und somit ein unbeabsichtigter Wetterkurzschluss weitgehend vermieden wird. Da die Fahrwegtüren in der Regel durch Körperkraft geöffnet werden müssen, kommen zur Druckentlastung anstelle einzelner Fahrwegtüren häufig Fahrwegschleusen in jedem einzelnen Blendrahmen zum Einsatz. Der planmäßige Wetterstrom in dem entsprechenden Wetterweg wird mit Hilfe einer einstellbaren Drosseleinrichtung wie zum Beispiel mit einer Schiebeluke in jedem Blendrahmen einzeln eingestellt.

Beim Einsatz schienengeführter Transporteinrichtungen ist die Länge einer Schleusen-kammer – und damit der Abstand der Blendrahmen untereinander – von der Länge einer Transporteinheit abhängig.

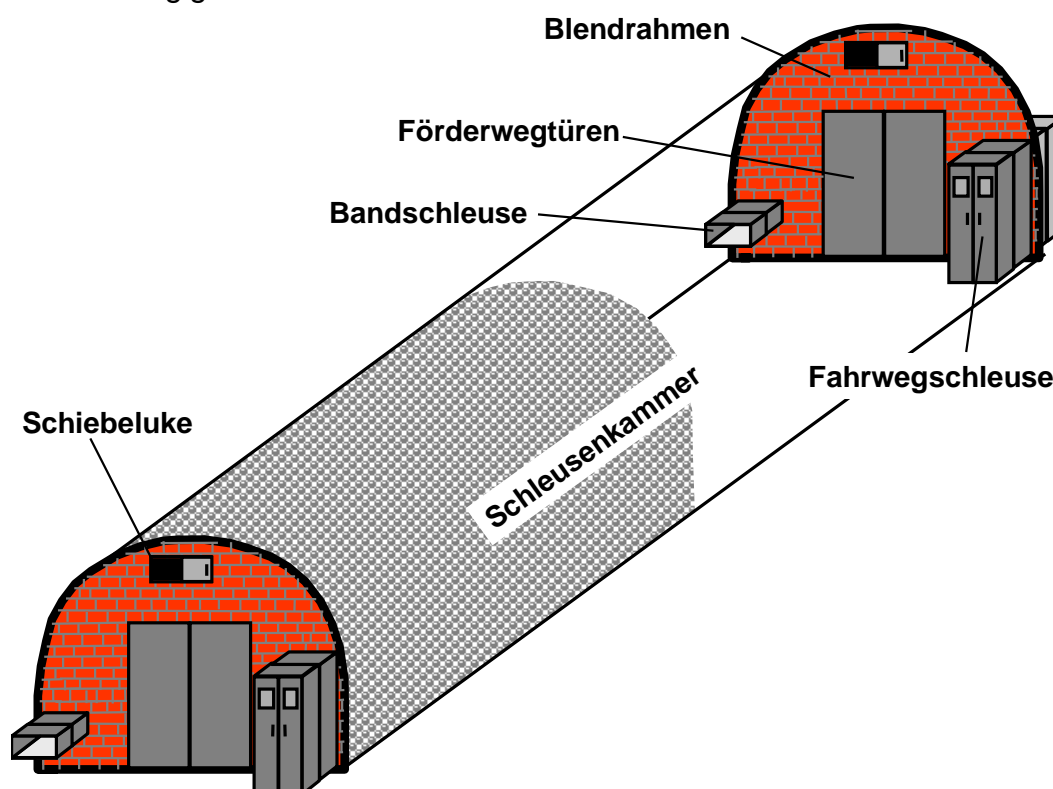


Bild 148: Schematische Darstellung einer Wetterschleuse

Das innerhalb eines Wetterweges auf eine Wetterschleuse wirkende Druckgefälle wirkt sich unmittelbar auf ihre Dichtheit aus. Wenn nur ein geringer Wetterstrom durch diesen Wetterweg fließen darf, dann sind die Anforderungen an eine solche Wetterschleuse besonders hoch. Dies wird am Beispiel eines Bergwerks mit rückläufiger Wetterführung (Bild 149 oben) deutlich. Da der Einzieh- und der Ausziehschacht hierbei unmittelbar nebeneinander angeordnet sind, besteht in dem farblich hervorgehobenen Wetterweg, der beide Schächte unmittelbar miteinander verbindet, ein sehr hohes Druckgefälle. Wenn die darin befindliche Wetterschleuse hinsichtlich ihrer Dichtheit nicht sehr hohen Ansprüchen genügen würde, wäre der Wetterkurzschluss hier derart groß, dass für das übrige Grubengebäude zu wenig Wetter zur Verfügung stünden. Bei rückläufiger Wetterführung ist in der Regel der Anteil derjenigen Wetterströme, die den Abbaubereichen nicht zur Verfügung gestellt werden können sondern als Wetterkurzschlüsse gewissermaßen ungenutzt dem Abwetter-schacht zugeführt werden, verhältnismäßig hoch. Das hat seinen Grund oft darin, dass schachtnahe Grubenräume gern zu Wartungszwecken oder zur Lagerung von Material gebraucht werden und sowohl von der Frischwetter- als auch von der Abwetterseite zugänglich sein sollen. Vielfach werden in Grubengas führenden Bergwerken derartige Grubenräume zur Aufstellung nicht

schlagwettergeschützter Betriebsmittel genutzt, sofern dies in unmittelbarer Nähe des Einziehschachtes erlaubt ist.

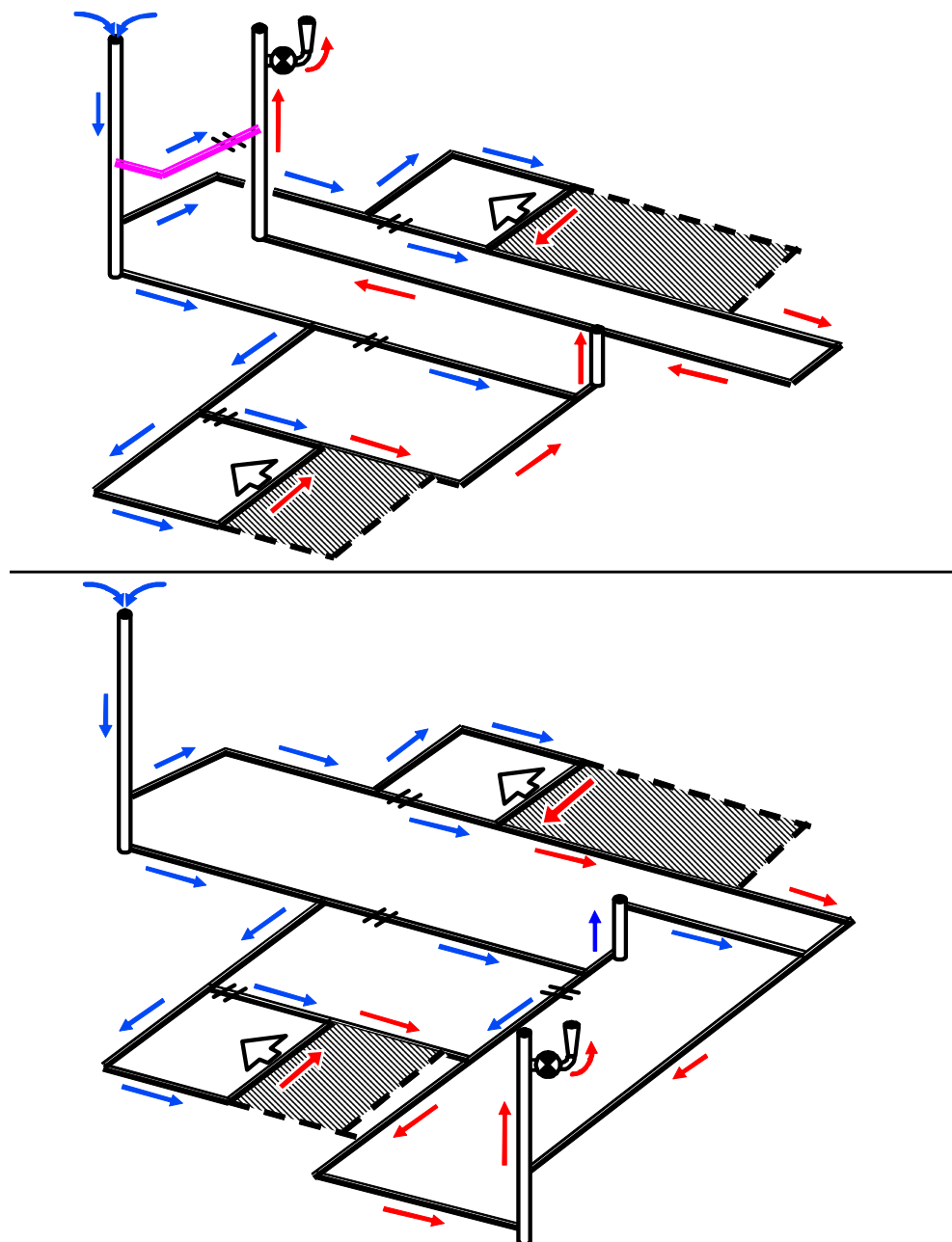


Bild 149: Rückläufige (oben) und grenzläufige (unten) Wetterführung

Bei grenzläufiger Bewetterung (Bild 149 unten) ist dagegen der Anteil derjenigen Wetterströme, die den Abbaubereichen nutzbar zur Verfügung gestellt werden können, vergleichsweise hoch. Allgemein sind die Kosten für die Bewetterung bei grenzläufiger Wetterführung deutlich geringer als bei rückläufiger Wetterführung.

7.3 Druckverlauf entlang eines Wetterweges

Es wird ein Wetterweg betrachtet, der aus den folgenden Abschnitten besteht (Bild 150):

- Einziehschacht (Abschnitt A – C)
- Fördersohle (Abschnitt C – D)
- Gesteinsberg (Abschnitt D – E)
- Ausziehschacht (Abschnitt E – F)
- Wetterkanal mit Hauptgrubenventilator (Abschnitt F – G).

Über Tage an der Tagesoberfläche herrscht an den Punkten A und G derselbe Absolutdruck (Umgebungs-Luftdruck) $p_{\text{ü.T.}}$.

7.3.1 Druckverlauf bei Wetterstillstand

Bei Wetterstillstand steigt mit zunehmender Teufe Δh der Absolutdruck entsprechend der Gleichung (44)

$$p = p_{\text{ü.T.}} + \rho \cdot g \cdot \Delta h$$

Im Bild 150 entspricht dieses dem Verlauf des Absolutdruckes entsprechend des grünen Linienzuges im Bereich des Abschnittes A – C.

Der Wetterweg im Abschnitt C – D ist sählig angeordnet. Daher ist der Verlauf des grünen Linienzuges bei Wetterstillstand im Bereich des Abschnittes C – D (Bild 150) horizontal, das heißt der Absolutdruck bleibt konstant.

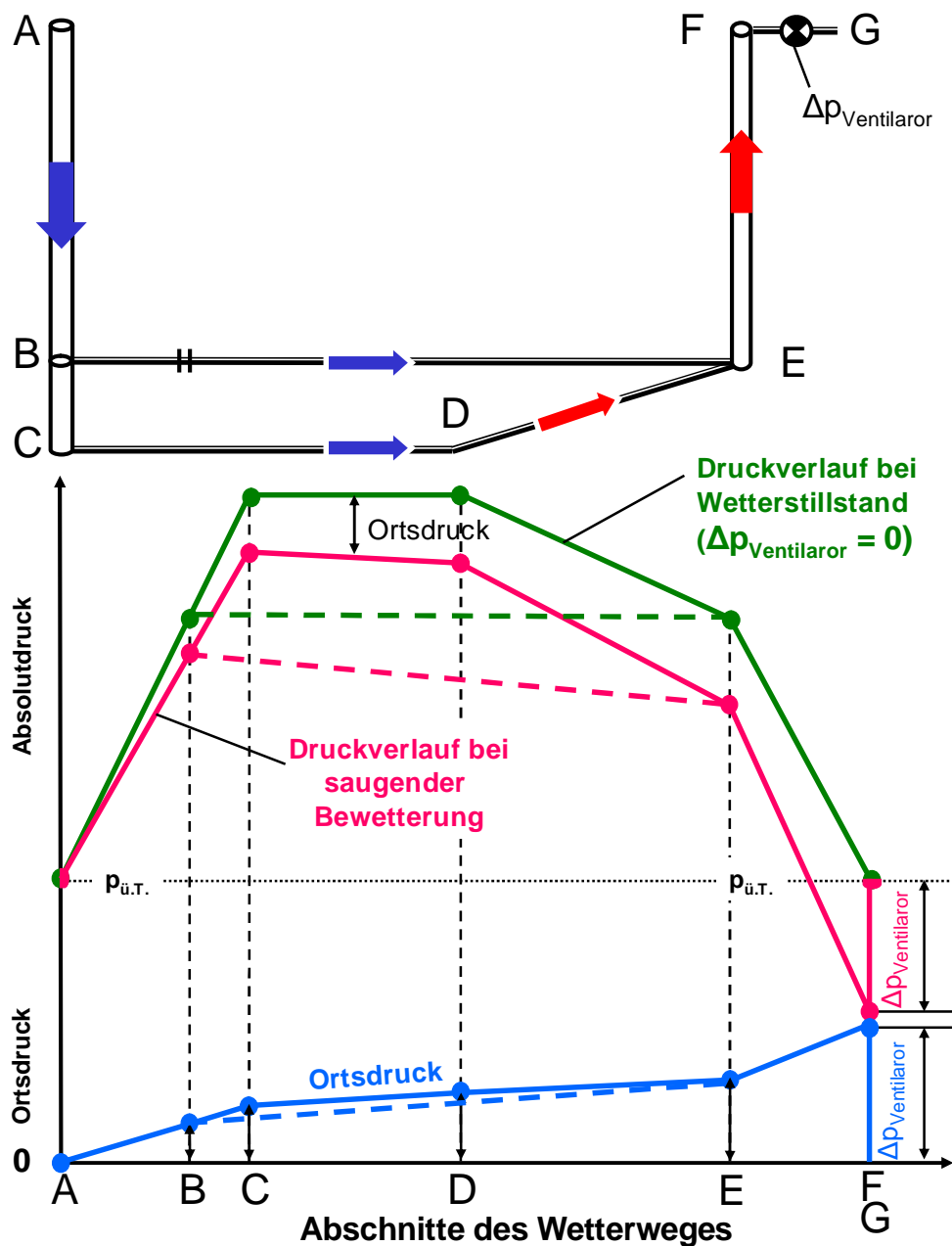


Bild 150: Druckverlauf entlang eines Wetterweges bei saugender Bewetterung

Der Gesteinsberg (Abschnitt D – E) verläuft ansteigend. Nach Gleichung (44) fällt der Absolutdruck entsprechend dem Verlauf des grünen Linienzuges im Bereich des Abschnittes D – E ab.

Der daran anschließende Abschnitt des Wetterweges E – F – G (Ausziehschacht mit Wetterkanal) verläuft ansteigend. Mit abnehmender Teufe Δh fällt der Absolutdruck entsprechend der Gleichung (44) ab, was dem Verlauf der grünen Linie im Bereich des Abschnittes E – F – G entspricht. Im Punkt G, das heißt an der Tagesoberfläche herrscht wieder derselbe Absolutdruck wie im Punkt A.

In dem schematischen Grubengebäude (Bild 150) ist zusätzlich eine parallele, söhlige Strecke zwischen den Punkten B und E vorhanden. Bei Wetterstillstand ist wegen des söhligen Verlaufes dieser Strecke der Absolutdruck konstant; der Absolutdruck ist im Punkt B gleich groß wie im Punkt E. Der Druckverlauf im Bereich des Abschnittes B – E entspricht dem grün gestrichelten Linienzug.

7.3.2 Druckverlauf bei saugender Bewetterung

Setzt man nun den Hauptgrubenventilator in der Form in Betrieb, dass er mit seiner Saugseite dem Grubengebäude zugewandt ist, dann erzeugt dieser eine Druckdifferenz $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ zwischen den Punkten F vor dem Ventilator und G hinter dem Ventilator. Da im Punkt G der Umgebungs-Luftdruck $p_{\text{ü.T.}}$ der Tagesoberfläche herrscht, beträgt somit der Unterdruck im Punkt F gegenüber dem Umgebungs-Luftdruck an der Tagesoberfläche

$$p = p_{\text{ü.T.}} - \Delta p_{\text{Ventilator}} \quad (142)$$

Durch den somit künstlich erzeugten Unterdruck zwischen dem Punkt A an der Tagesoberfläche im Bereich des Einziehschachtes und dem Punkt F vor dem Hauptgrubenventilator wird in dem Grubengebäude eine Wetterbewegung mit der Richtung vom höheren zum geringeren Druck in Gang gesetzt. Dabei dient die gesamte vom Ventilator erzeugte Druckdifferenz $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ zur Überwindung der Druckverluste, die in Form von Reibungs-, Stoß- sowie Formänderungsverlusten (siehe Kapitel 3) in den einzelnen Abschnitten des Wetterweges im Grubengebäude anliegen. Im Diagramm (Bild 150) ergibt sich auf diese Weise ein neuer, rot gefärbter Linienzug, der den Druckverlauf entlang des Wetterweges A – C – D – E – F – G bei Betrieb des Hauptgrubenventilators mit saugender Bewetterung wiedergibt. Die jeweiligen Absolutdrücke im Verlauf des roten Linienzuges sind deutlich geringer als die entsprechenden Absolutdrücke im Verlauf des grünen Linienzuges.

In der parallelen, söhligen Strecke zwischen den Punkten B und E liegt ebenfalls ein Druckgefälle an. Das ist am rot gestrichelten Verlauf des Linienzuges B – E zu erkennen. Dieses Druckgefälle ist aufgrund des sich in dieser Strecke einstellenden Wetterstroms und der dort vorhandenen Druckverluste zurückzuführen.

7.3.3 Ortsdruck bei saugender Bewetterung

Bildet man nun entlang der Wetterwege A – C – D – E – F – G beziehungsweise B – E die jeweilige Differenz zwischen dem Druckverlauf bei Wetterstillstand (grüner Linienzug) und dem Druckverlauf bei saugendem Betrieb des Hauptgrubenventilators (roter Linienzug), ergibt sich daraus der im Bild 150 blau gefärbte Linienzug. Man erkennt, dass die Differenz der beiden Druckverläufe im Punkt A im Bereich der Rasenhängebank des Einziehschachtes den Wert Null hat und bis zum Punkt F unmittelbar vor dem Hauptgrubenventilator auf den Maximalwert $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ ansteigt. Die unterschiedlichen Anstiege innerhalb des blauen Linienzuges lassen den jeweiligen Druckverlust innerhalb der entsprechenden Abschnitte des Wetterweges erkennen. Der blaue Linienzug zeigt somit die summierten Druckverluste entlang des gesamten Wetterweges an. Die Summe aller Druckverluste der einzelnen Abschnitte entlang eines Wetterweges bezeichnet man als „Ortsdruck“.

7.3.4 Druckverlauf bei blasender Bewetterung

Im nächsten Beispiel wird ein ähnlicher Wetterweg betrachtet, der aus den folgenden Abschnitten besteht (Bild 151):

- Wetterkanal mit Hauptgrubenventilator (Abschnitt A – B)
- Einziehschacht (Abschnitt B – D)
- Fördersohle (Abschnitt D – E)
- Gesteinsberg (Abschnitt E – F)
- Ausziehschacht (Abschnitt F – G).

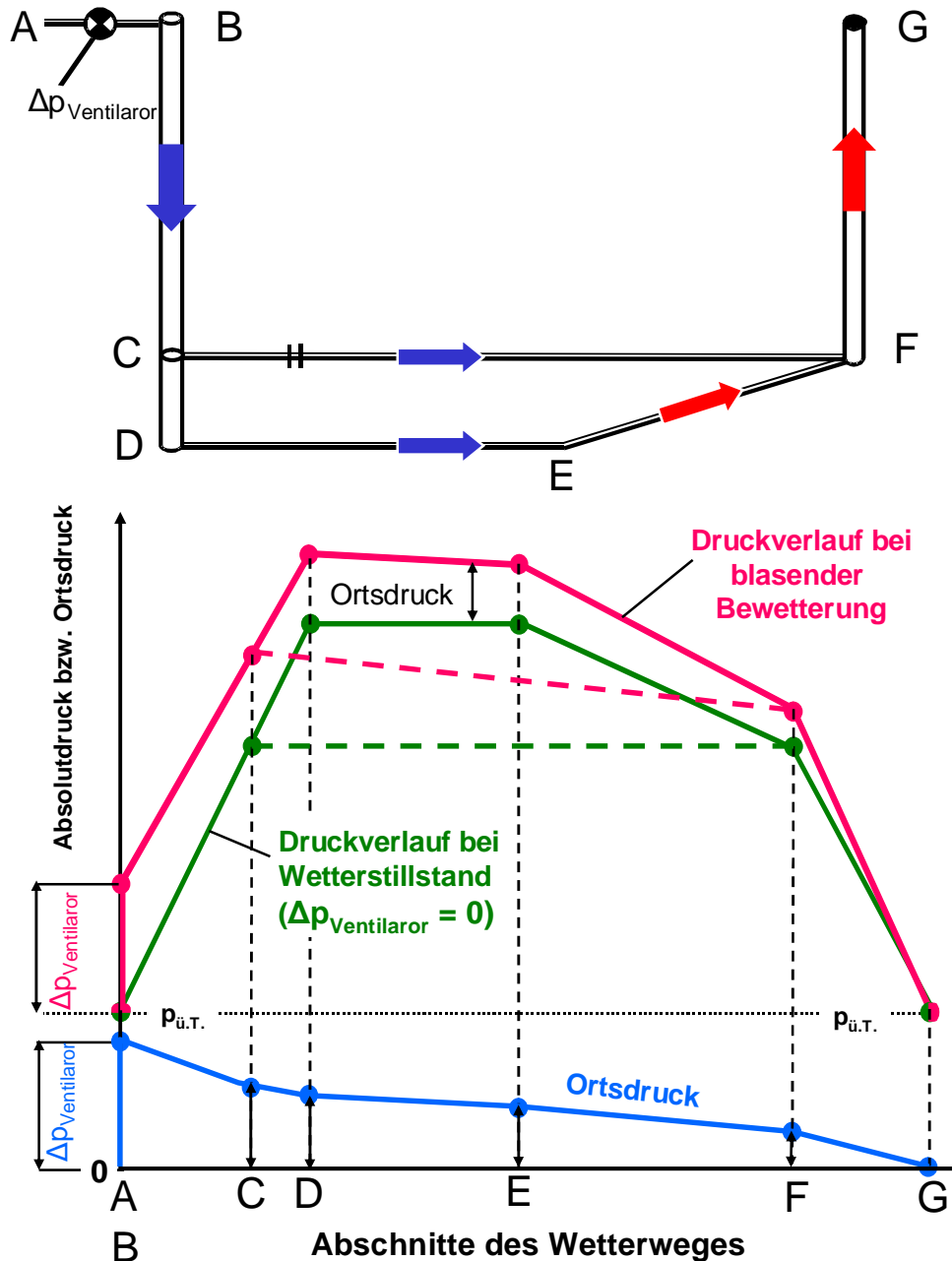


Bild 151: Druckverlauf entlang eines Wetterweges bei blasender Bewetterung

Über Tage an der Tagesoberfläche herrscht an den Punkten A und G derselbe Absolutdruck (Umgebungs-Luftdruck) $p_{\text{ü.T.}}$. Bei Wetterstillstand stellt sich in den einzelnen Abschnitten des Wetterweges der gleiche Verlauf der Absolutdrücke ein (grüner Linienzug), wie er bereits aus dem vorherigen Beispiel (Bild 150) bekannt ist.

Im Gegensatz dazu wird nun jedoch der Hauptgrubenventilator in der Form in Betrieb gesetzt, dass er mit seiner Druckseite dem Grubengebäude zugewandt ist. Dann erzeugt dieser eine Druckdifferenz $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ zwischen den Punkten A vor dem Ventilator und B hinter dem

Ventilator. Da im Punkt A der Umgebungs-Luftdruck $p_{\text{ü.T.}}$ der Tagesoberfläche herrscht, beträgt somit der Überdruck im Punkt B gegenüber dem Umgebungs-Luftdruck an der Tagesoberfläche

$$p = p_{\text{ü.T.}} + \Delta p_{\text{Ventilator}} \quad (143)$$

Durch den somit künstlich erzeugten Überdruck zwischen dem Punkt B hinter dem Hauptgrubenventilator und dem Punkt G an der Tagesoberfläche im Bereich des Ausziehschachtes wird in dem Grubengebäude eine Wetterbewegung mit der Richtung vom höheren zum geringeren Druck in Gang gesetzt. Dabei dient die gesamte vom Ventilator erzeugte Druckdifferenz $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ zur Überwindung der Druckverluste, die in Form von Reibungs-, Stoß- sowie Formänderungsverlusten in den einzelnen Abschnitten des Wetterweges des Grubengebäudes anliegen. Im Diagramm (Bild 151) ergibt sich auf diese Weise ein neuer, rot gefärbter Linienzug, der den Druckverlauf entlang des Wetterweges A – C – D – E – F – G bei Betrieb des Hauptgrubenventilators mit blasender Bewetterung wiedergibt. Die jeweiligen Absolutdrücke im Verlauf des roten Linienzuges sind deutlich höher als die entsprechenden Absolutdrücke im Verlauf des grünen Linienzuges.

In der parallelen, söhlichen Strecke zwischen den Punkten C und F fließt ebenfalls ein Wetterstrom. Dieser Wetterstrom verursacht einen Druckverlust in diesem Abschnitt. Das ist am rot gestrichelten Verlauf des Linienzuges C – F zu erkennen.

7.3.5 Ortsdruck bei blasender Bewetterung

Bildet man nun entlang der Wetterwege A – B – D – E – F – G beziehungsweise C – F die jeweilige Differenz zwischen dem Druckverlauf bei Betrieb des Hauptgrubenventilators (roter Linienzug) und dem Druckverlauf bei Wetterstillstand (grüner Linienzug), ergibt sich daraus der im Bild 151 blau gefärbte Linienzug. Man erkennt, dass die Differenz der beiden Druckverläufe im Punkt B unmittelbar hinter dem Hauptgrubenventilator ihr Maximum $\Delta p_{\text{Ventilator}}$ erreicht und bis zum Punkt G im Bereich der Rasenhängebank des Ausziehschachtes den Wert Null hat. Der blaue Linienzug zeigt die summierten Druckverluste entlang des gesamten Wetterweges, das heißt den Ortsdruck an.

7.4 Berechnung der Wetterbewegung

7.4.1 Massenerhaltungssatz

Im Kapitel 3.4 wurde bereits der Massenerhaltungssatz vorgestellt. Dieser besagt, dass auf eine stationäre Strömung bezogen, ein durch eine Stromröhre fließender Massenstrom \dot{m} in jedem Querschnitt A_1, A_2, \dots gleich bleiben muss. Die daraus folgende Gleichung ist auch als Kontinuitätsgleichung bekannt:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = A_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 \quad (47)$$

Darin sind w_1 und w_2 die jeweiligen Wettergeschwindigkeiten und ρ_1 und ρ_2 die jeweiligen Dichten. Ändert sich die Dichte entlang der Stromröhre nicht ($\rho_1 = \rho_2$), dann handelt es sich um eine inkompressible Strömung, bei der gilt:

$$A_1 \cdot w_1 = A_2 \cdot w_2 = \dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad (48)$$

Das heißt, dass bei stationärer, inkompressibler Strömung ein Volumenstrom \dot{V} , der durch eine Stromröhre fließt, in jedem Querschnitt A_1, A_2, \dots gleich bleiben muss.

Die Erhaltung des Massenstroms bei kompressibler Strömung beziehungsweise die Erhaltung des Volumenstroms bei inkompressibler Strömung sind die ersten grundsätzlichen Voraussetzungen zur Berechnung der Wetterbewegung.

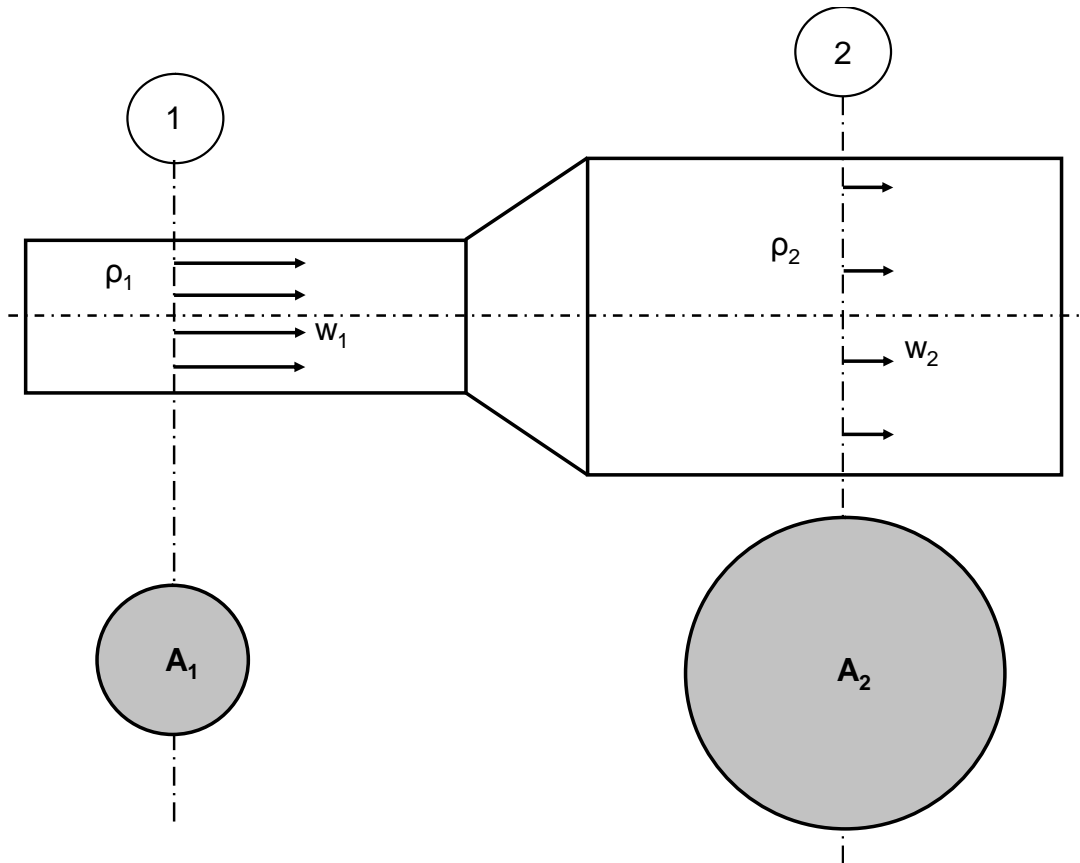


Bild 152: Massenerhaltungssatz

7.4.2 Wettertechnisches Widerstandsgesetz

Im Kapitel 3.11 wurden sowohl die Druckverluste durch Formwiderstände, Rohrkrümmungen und Stoßverluste beschrieben,

$$p_v = \zeta \cdot w^2 \cdot \rho / 2 \quad (71)$$

als auch die Druckverluste durch Reibungswiderstände.

$$p_v = \lambda \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (81)$$

Ebenfalls im Kapitel 3.11 wurde der hydraulische Durchmesser für nicht kreisförmige Querschnitte definiert, wobei **U** für den Umfang des Strömungsweges steht.

$$d_h = 4 \cdot A / U \quad (79)$$

Für einen beliebigen Grubenbau lässt sich zwischen seinem Anfangs- und seinem Endpunkt somit folgende Druckdifferenz aufgrund der darin vorhandenen Widerstände angeben:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 + \zeta \cdot w^2 \cdot \rho / 2 \quad (144)$$

oder durch Einsatz der Gleichung (79) für den hydraulischen Durchmesser

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{L \cdot U}{4 \cdot A} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (145)$$

wegen $\dot{m} = w \cdot A \cdot \rho$ kann man auch schreiben:

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{L \cdot U}{4 \cdot A} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho \cdot \dot{m}^2}{2 \cdot A^2 \cdot \rho^2} \quad (146)$$

oder wegen $\dot{V} = w \cdot A$ bei inkompressibler Strömung gilt entsprechend:

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{L \cdot U}{4 \cdot A} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho \cdot \dot{V}^2}{2 \cdot A^2} \quad (147)$$

Den Ausdruck

$$\left(\lambda \cdot \frac{L \cdot U}{4 \cdot A} + \zeta \right) \cdot \frac{\rho}{2 \cdot A^2} = R \quad (148)$$

bezeichnet man als Wetterwiderstand **R**. Die Einheit des Wetterwiderstandes ist $[\mathbf{N} \cdot \mathbf{s}^2 \cdot \mathbf{m}^{-8}]$ oder, was gleichbedeutend ist $[\mathbf{kg} \cdot \mathbf{m}^{-7}]$. Da beide Schreibweisen recht umständlich sind, hat man sich für die Einheit des Wetterwiderstandes der Einfachheit halber auf **[Res]** vom englischen Wort „Resistance“ geeinigt. Mit der Einführung des Wetterwiderstandes **R** vereinfacht sich die Gleichung (147) zu

$$\Delta p = R \cdot \dot{V}^2 \quad (147a)$$

Diese Gleichung bezeichnet man als das „quadratische Gesetz der Grubenbewetterung“. Der Widerstand **R** eines Grubenbaus ist sowohl abhängig von seinen Reibungswiderständen, als auch von seinen geometrischen Konstellationen wie Verengungen, Erweiterungen, Kurven, Verzweigungen oder Zuflüssen.

Beim quadratischen Gesetz der Grubenbewetterung ist eine Analogie zum Ohmschen Gesetz für Gleichstrom zu erkennen. Allerdings besteht anstelle der linearen Abhängigkeit zwischen elektrischer Spannung und Stromstärke beim Wetterstrom eine quadratische Abhängigkeit zwischen Druckabfall und Volumenstrom.

Ein Grubenbau hat somit den Widerstand 1 Res, wenn bei einem Druckverbrauch von 1 Pa ein Wettervolumenstrom von $1 \text{ m}^3 / \text{s}$ durch diesen Grubenbau hindurchströmt. Bei einer Strecke mit Stahlbogenausbau und einem Streckenquerschnitt 12 m^2 entspricht der Widerstand 1 Res einer Streckenlänge von ungefähr 9 km Länge. Damit die Zahlenwerte für den Widerstand auch für Grubenbaue kürzerer Erstreckung besser handhabbar werden, verwendet man häufig die Einheit Millires **[mRes]**. Damit werden ihre ursprünglich sehr kleinen Zahlenwerte um den Faktor 10^3 größer.

In Tabellen oder Diagrammen findet man so genannte **R₁₀₀**-Werte. Das sind Widerstände bestimmter Grubenbaue, die eine Länge von exakt 100 m haben. Um daraus den tatsächlichen Widerstand eines Grubenbaus zu ermitteln, muss der **R₁₀₀**-Wert durch 100 dividiert werden und mit der Länge des tatsächlichen Grubenbaus [in Metern] multipliziert werden. Hat beispielsweise ein Grubenbau einen **R₁₀₀**-Wert von 0,0035 Res (Bogenstrecke mit Stahlbogenausbau und einem Streckenquerschnitt $18,5 \text{ m}^2$) und hat der Grubenbau eine Länge von $L = 765 \text{ m}$, dann beträgt der tatsächliche Widerstand des Grubenbaus

$$R = \frac{R_{100}}{100} \cdot L = \frac{0,0035 \text{ Res}}{100 \text{ m}} \cdot 765 \text{ m} = 0,002677 \text{ Res} = 2,677 \text{ mRes.}$$

Nachfolgend sind beispielhaft in Diagrammen beziehungsweise in einer Tabelle die R_{100} -Werte typischer Grubenbaue angegeben.

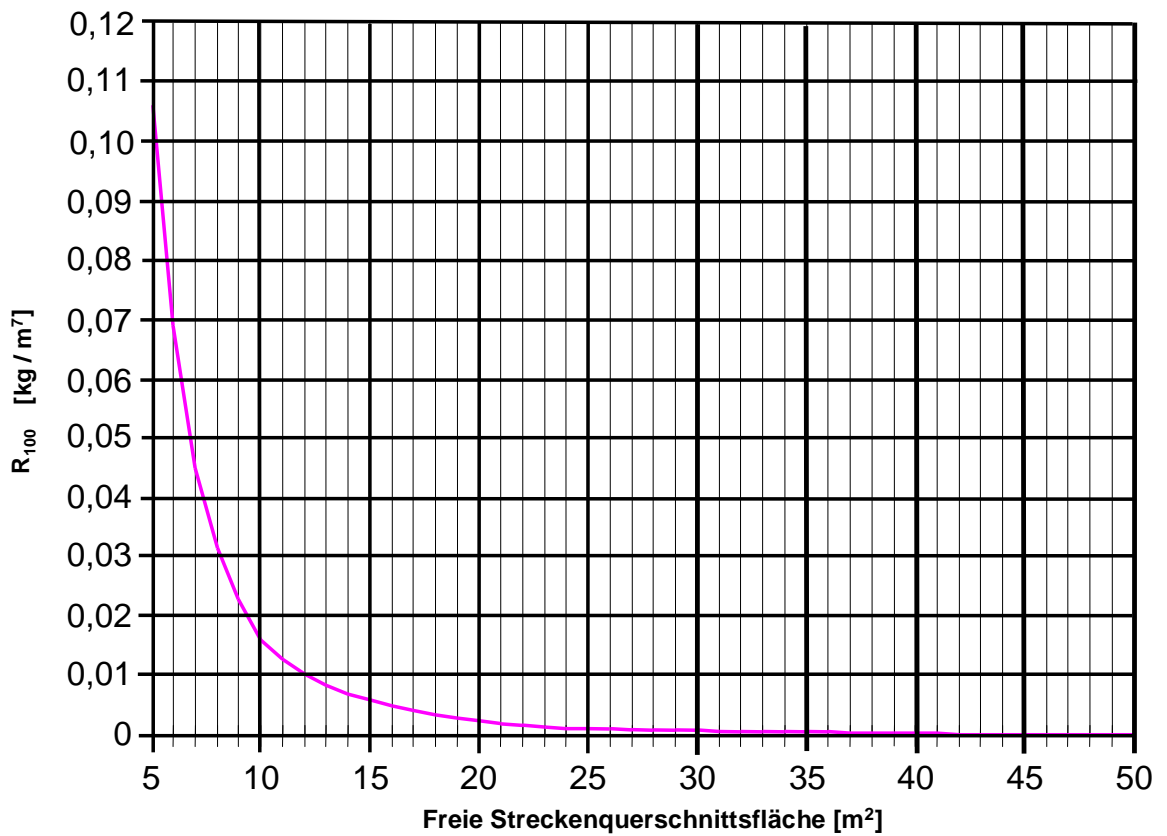


Bild 153: Wetterwiderstände (R_{100} -Werte) von Strecken mit Stahlbogenausbau

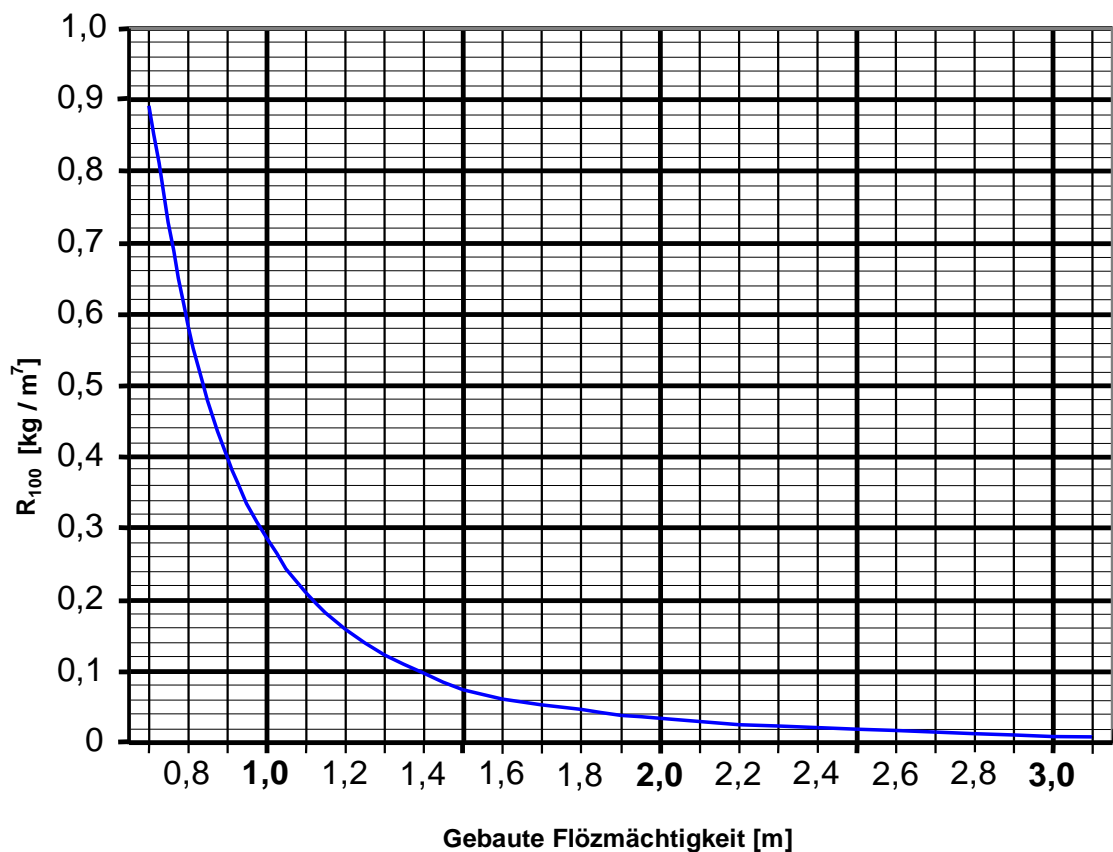


Bild 154: Wetterwiderstände (R_{100} -Werte) von Streben mit Schildausbau

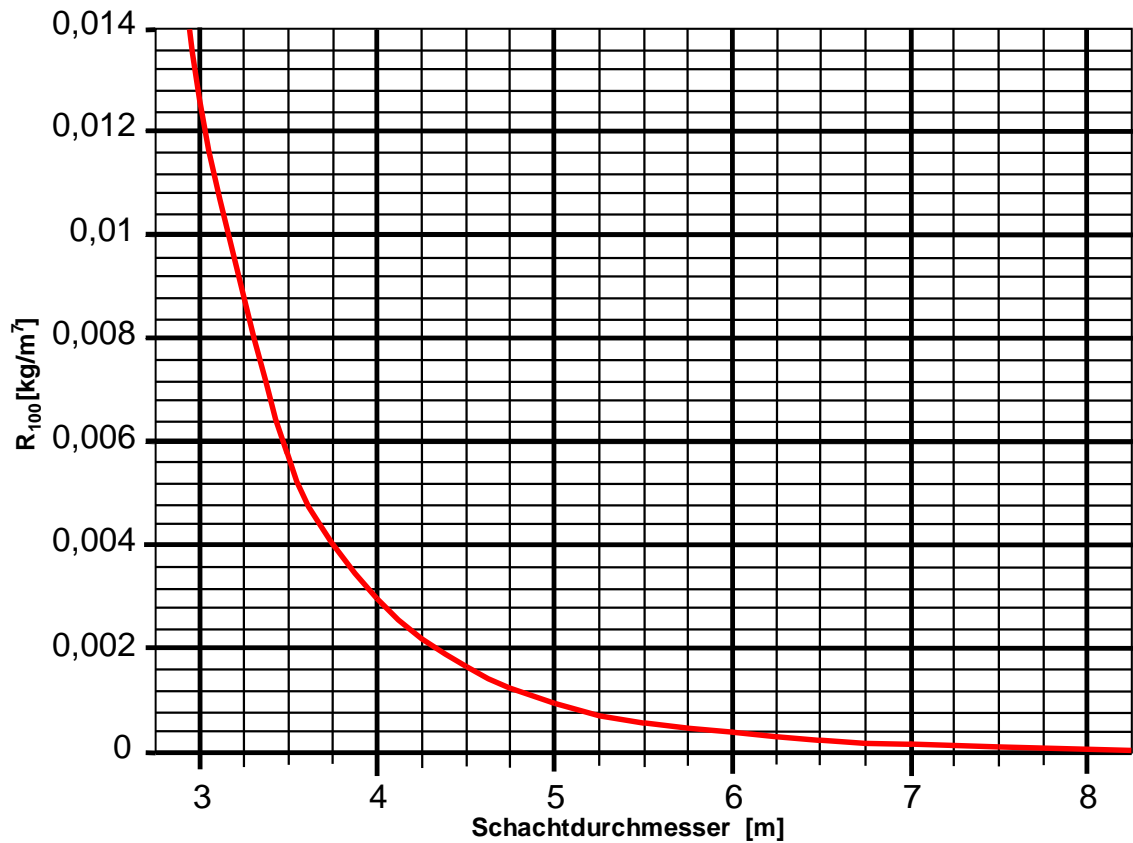


Bild 155: Wetterwiderstände (R_{100} -Werte) von Schächten ohne Einbauten

Aufteilung des Schachtquerschnitts	Ø Schacht [m]	Material der Einstriche	R_{100} [kg/m ²]	Aufteilung des Schachtquerschnitts	Ø Schacht [m]	Material der Einstriche	R_{100} [kg/m ²]
	4.5	Stahl	1.092		7.5	Stahl	0.096
	5.0		0.602		7.5	gemischt	0.140
	5.0	Holz	1.287		8.0	gemischt	0.099
	5.5		0.739				
	5.5	Stahl	0.311		6.0	Stahl	0.267
	6.0		0.217		6.5	Stahl	0.185
	6.5		0.140		6.0	gemischt	0.483
	6.0	gemischt	0.330		6.5		0.302
	6.5	0.224					
	4.0	Stahl	1.271		6.5	gemischt	0.396
	4.5	Stahl	0.704		6.0	Stahl	0.449
	5.5		0.246		6.5		0.269
	8.0		0.032		7.0		0.213
	8.0	gemischt	0.032		7.5		0.135
	4.0	gemischt	2.605		6.0	gemischt	0.449
	4.5		1.232		6.5		0.269
					7.0		0.213
					7.5		0.135
	4.5	Holz	1.408		6.0	Stahl	0.267
	5.5		0.532				

Bild 156: Wetterwiderstände (R_{100} -Werte) von Schächten mit Einbauten

7.4.3 Messtechnische Ermittlung des Wetterwiderstandes

Die in den Bildern 153 bis 156 angegebenen Wetterwiderstände dienen insbesondere als Planungswerte für neu aufzufahrende Grubenbaue. Um nach Gleichung (147a) die Wetterwiderstände tatsächlich vorhandener Grubenbaue zu ermitteln, ist es unerlässlich, hierzu Wetterdruck- und –volumenstrommessungen durchzuführen.

7.4.3.1 Weterovolumenstrommessung

Neben einer Vielzahl möglicher Wettergeschwindigkeits-Messsonden – wie zum Beispiel Prandtl- oder Pitot-Staurohre, Stauscheiben-Anemometer oder solche Messsonden, bei denen der Weterovolumenstrom einen thermischen Widerstand abkühlt – ist im Bergbau das Flügelrad-Anemometer (*griechisch **anemos**: Wind*) (Bild 157) am meisten gebräuchlich.

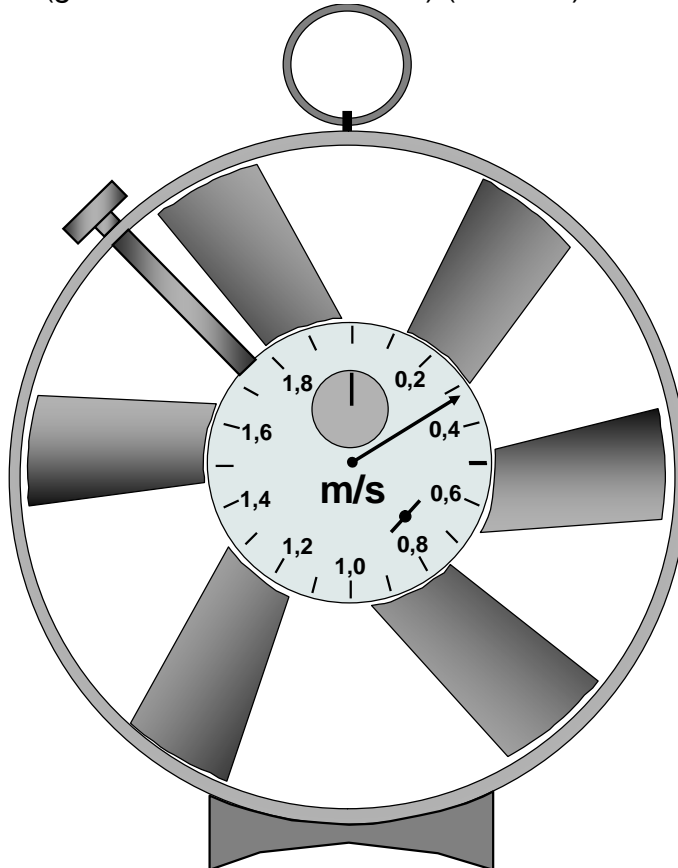
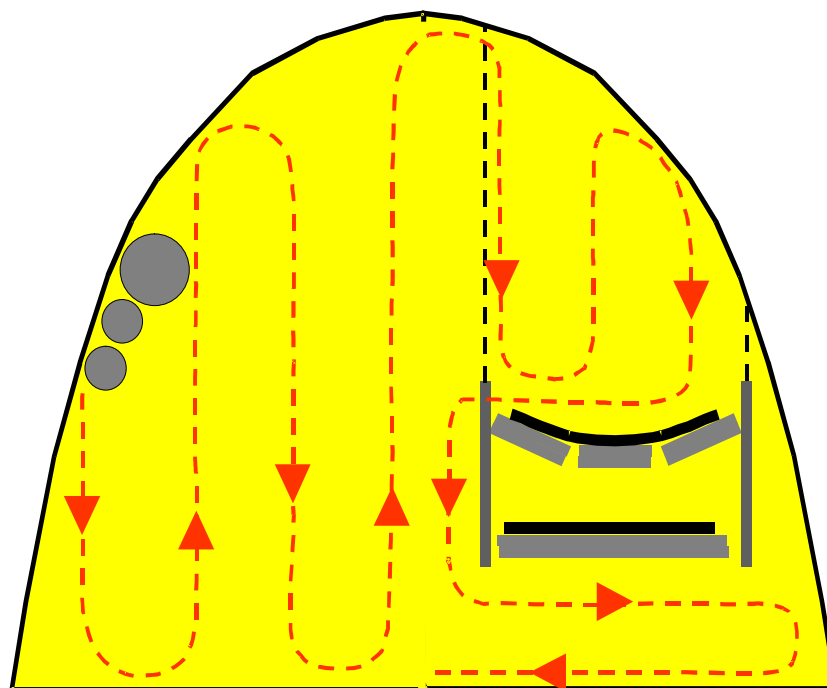


Bild 157: Flügelrad-Anemometer

Ein Flügelrad-Anemometer ist eine kleine Windturbine, dessen Laufrad-Drehzahl proportional der Wettergeschwindigkeit ist. Durch die Umdrehungen des Laufrades wird ein Zählwerk betrieben, auf dem man nach einer Messzeit von genau 60 Sekunden die über die Dauer der Messung gemittelte Wettergeschwindigkeit in Metern pro Sekunde ablesen kann.

Die Verteilung der Wettergeschwindigkeiten im Querschnitt eines Grubenbaus kann sehr ungleichmäßig sein. Zum einen sind die Wettergeschwindigkeiten in der Mitte eines Grubenbaus größer als zum Umfang hin. Andererseits können verschiedene Einbauten – wie zum Beispiel Bandkonstruktionen – für ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilungen sorgen. Daher ist es notwendig, die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt eines Grubenbaus zu messen. Dies ist machbar, indem ein auf einem Messstock montiertes Flügelrad-Anemometer in gleichmäßigen Schlaufen durch den Querschnitt geführt wird (Bild 158). Derjenige, der die Messung durchführt, sollte darauf achten, dass er den Querschnitt mit seinem eigenen Körper möglichst wenig versperrt. Zu beachten ist, dass die Messstelle für eine Schlaufenmessung in einem geraden Abschnitt des Grubenbaus liegt und Abzweige sowie Kurven sich möglichst weit entfernt hiervon befinden.

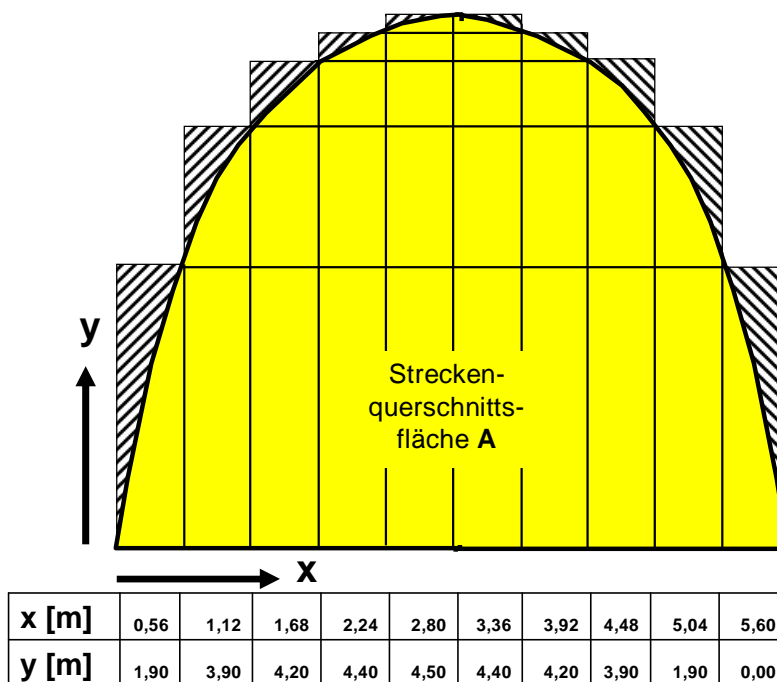


Messgerät : Flügelrad-Anemometer
 Messzeit für eine Schlaufe : 60 Sekunden

Bild 158: Schlaufenmessung zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit

Nachdem die mittlere Wettergeschwindigkeit im Querschnitt eines Grubenbaus gemessen wurde, bedarf es noch der Ermittlung der Streckenquerschnittsfläche **A**, um aus dem Produkt aus mittlerer Wettergeschwindigkeit **w** und Streckenquerschnittsfläche **A** den Wettervolumenstrom zu errechnen. Nach Gleichung (48) gilt:

$$\dot{V} = \bar{w} \cdot A$$



A = 18,65 m²

Bild 159: Ermittlung einer Streckenquerschnittsfläche mit **A = 18,65 m²**

Durch Aufteilung der Sohlenbreite in gleich große Abschnitte und anschließende Vermessung der jeweiligen Streckenhöhe lässt sich eine Streckenquerschnittsfläche sehr umständlich, jedoch auch sehr genau durch Planimetrierung bestimmen. Für Bogenausbau hat sich dagegen für die betriebliche Praxis ein Verfahren als durchaus geeignet erwiesen, das einen guten Näherungswert liefert. Die entsprechende Gleichung lautet:

$$A \approx 0,75 \cdot x_{\max} \cdot y_{\max} \quad (149)$$

worin x_{\max} die größte Sohlenbreite und y_{\max} die größte Streckenhöhe bedeuten.

Um nicht für jede regelmäßig wiederkehrende Messung des Wettervolumenstroms die Streckenquerschnittsflächen auf umständliche Weise neu bestimmen zu müssen, werden in den Hauptwetterströmen an geeigneten Orten Wettermessstellen eingerichtet. Dort stehen deren Streckenquerschnittsflächen fest, solange keine nennenswerten Konvergenzen oder Einbauten diese beeinflussen.

7.4.3.2 Wetterdruckmessung

Den in einem Grubenbau auftretenden Druckverlust kann man auf unterschiedliche Weise ermitteln. Eine Möglichkeit besteht darin, an der Messstellen **1** am Anfang eines Grubenbaus und an der Messstelle **2** am Ende eines Grubenbaus den Umgebungsdruck p_{Umgebung} mit Hilfe eines Barometers zu messen (Bild 160). Bei der Aufstellung eines Barometers ist darauf zu achten, dass es sich möglichst in einer Nische befindet und somit nicht größeren Wettergeschwindigkeiten ausgesetzt ist, damit es allein den statischen Druck erfassen kann.

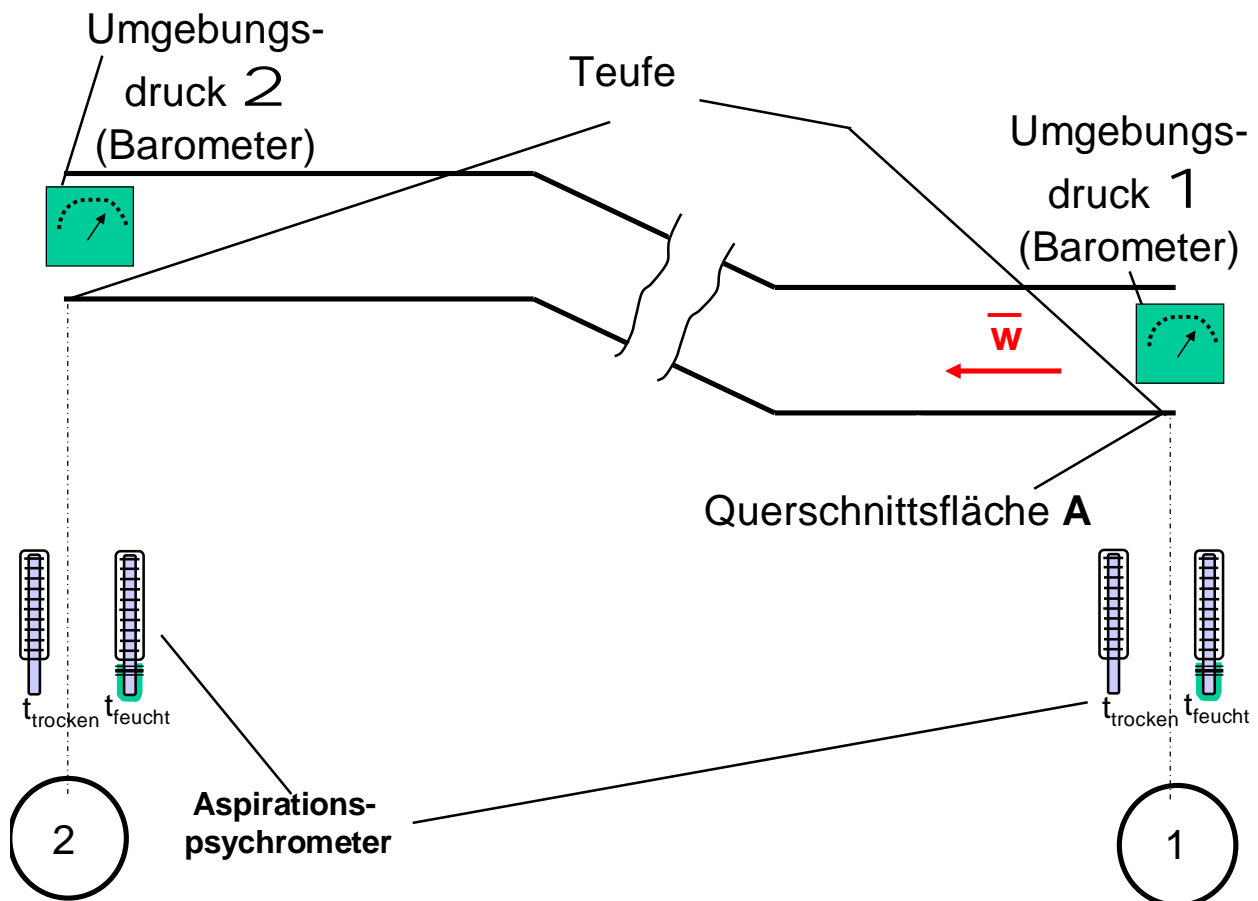


Bild 160: Wetterdruckmessung mit Hilfe einer Barometermessung

Ferner sollten die Querschnittsflächen an beiden Messstellen annähernd gleich sein, damit die Unterschiede im dynamischen Druck nicht zu groß werden. Außerdem sind an den Messstellen **1** und **2** die jeweiligen Teufen zu ermitteln, um den Einfluss der geodätischen Höhenunterschiede auf die gemessene Druckdifferenz berücksichtigen zu können. Schließ-

lich benötigt man zur Bestimmung der jeweiligen Wetterdichten ρ die Trocken- und Feuchttemperaturen an den Messstellen **1** und **2**, die mit Hilfe eines Aßmann'schen Aspirationspsychrometers gemessen werden (siehe Kapitel 2.10).

	Einheit	Gleichung bzw. Quelle	Messstelle 1		Messstelle 2
p_{Umgebung}	Pa	Barometermessung	117720		117250
t_{trocken}	°C	Psychrometermessung	34		35
t_{feucht}	°C	Psychrometermessung	28		29
Absoluttemperatur T	K	$T = t_{\text{trocken}} + 273,15$	307,15		308,15
Teufe h	m	markscheiderische Angaben	1315		1296
Teufendifferenz Δh	m	$\Delta h = h_2 - h_1$		-19	
x	kg/kg	aus h-x-Diagramm (Kapitel 2.10) (siehe Bild 161)	0,0180		0,0193
Gaskonstante feuchter Luft R_f	N·m/(kg·K)	$R_f = \frac{R_L + x \cdot R_D}{1 + x} \quad (33)$ $R_L = 287,1 \text{ N·m/(kg·K)}$ $R_D = 461,5 \text{ N·m/(kg·K)}$	290,18		290,40
ρ	kg/m ³	$\rho = \frac{p_{\text{Umgebung}}}{R_f \cdot T} \quad (\text{Kap. 2.10})$	1,32		1,31
ρ_{Mittel}	kg/m ³	$\rho_{\text{Mittel}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$		1,315	
Druckverlust Δp	Pa	$\Delta p = p(1) - p(2) + \rho_{\text{Mittel}} \cdot g \cdot \Delta h$		225	
A	m ²	siehe Kapitel 7.4.3.1		21,7	
w	m/s	siehe Kapitel 7.4.3.1		2,6	
\dot{V}	m ³ /s	$\dot{V} = w \cdot A$		56,4	
Wetterwiderstand R	kg/m ⁷	$R = \Delta p / \dot{V}^2 \quad (147a)$		<u>0,0707</u>	

Tabelle 8: Auswertung einer Wetterdruckmessung (Barometermessung)

Anhand eines Übungsbeispiels soll im Folgenden die Auswertung einer Wetterdruckmessung demonstriert werden (Tabelle 8). Die rot eingetragenen Zahlenwerte geben die unmittelbar aus der Messung hervorgegangenen Werte wieder. Die schwarzen Zahlenwerte sind die daraus abgeleiteten Größen. Die zur Ermittlung dieser Größen zu verwendenden Gleichungen sind in der Tabelle ebenfalls angegeben.

Problematisch kann es werden, wenn sich während der Messung der barometrische Luftdruck ändert und man die Messungen nicht mit zwei Messgeräten gleichzeitig, sondern nacheinander durchführt. In diesem Fall muss man während der Messung die jeweilige Uhrzeit notieren und anschließend anhand der Aufzeichnung eines über Tage befindlichen Barographen entsprechende Korrekturen an der Barometermessung vornehmen. Ein weiterer Nachteil dieser Methode besteht darin, dass man die Differenz zweier sehr großer Zahlen durchführen muss, deren Ablesegenauigkeiten zudem noch relativ grob sind. Der Luftdruck lässt sich am Barometer höchstens auf 0,1 hPa (das sind 10 Pa) genau ablesen. Die beiden Umgebungsdrücke an den Messstellen 1 und 2 unterscheiden sich in unserem Übungsbeispiel nicht so wesentlich voneinander, so dass zur Bestimmung der Wasserdampfgehalte in den Wettern dasselbe h-x-Diagramm für denselben Umgebungsdruck (hier 1175 hPa) verwendet werden kann. Erst bei einem Unterschied der Umgebungsdrücke von mehr als 25 hPa (das sind 2500 Pa) muss man unterschiedliche, dem jeweiligen Druck entsprechende h-x-Diagramme verwenden.

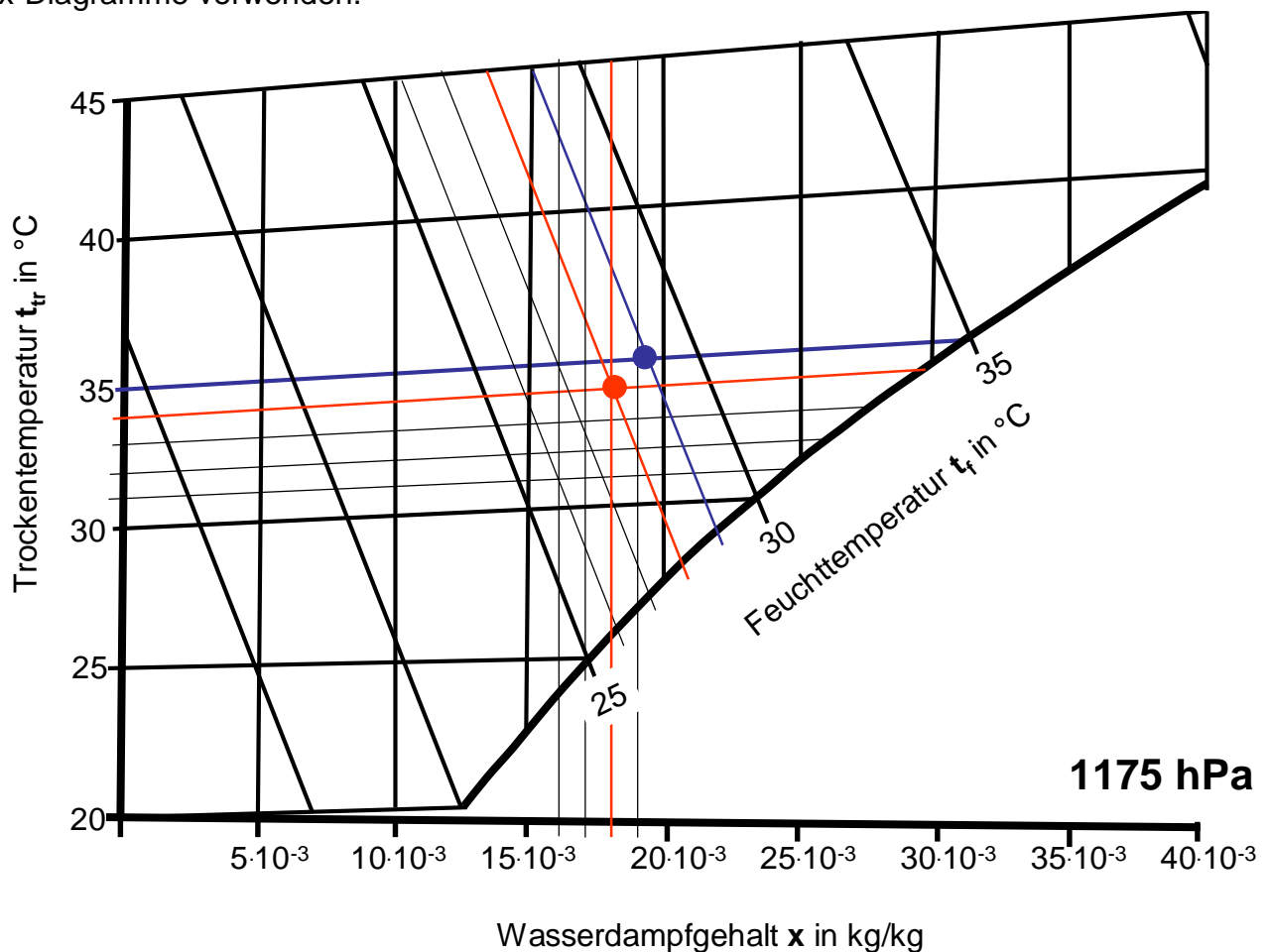


Bild 161: h-x-Diagramm für feuchte Grubenwetter ($p_{\text{Umgebung}} = 1175 \text{ hPa}$)

Eine andere Möglichkeit, den in einem Grubenbau auftretende Druckverlust zu ermitteln, ist eine Schlauchmessung (Bild 162). Dabei wird zwischen dem Anfangs- und Endpunkt des Grubenbaus ein Messschlauch verlegt, wobei die jeweiligen Enden des Schlauches so im Streckenquerschnitt anzuordnen sind, dass ihre Öffnungsflächen möglichst rechtwinklig zur Streckenachse orientiert sind, um an den Stellen 1 und 2 keine dynamischen Anteile des Druckes mit zu erfassen, sondern nur den jeweiligen statischen Druck. Zur Messwertanzeige

dient ein Differenzdruck-Messgerät wie zum Beispiel ein U-Rohr-Manometer. Präzisionsgeräte sind in der Lage, Druckdifferenzen in der Größenordnung von 1 Pa zu erfassen, so dass eine Schlauchmessung gegenüber einer Barometermessung wesentlich genauere Ergebnisse liefert. Bei einer Schlauchmessung wird außerdem ein sich ändernder barometrischer Luftdruck während der Messung ausgeglichen und braucht nicht berücksichtigt zu werden. Jedoch sollten auch hierbei die Querschnittsflächen an beiden Messstellen annähernd gleich groß sein, um die Unterschiede im dynamischen Druck vernachlässigen zu können. Außerdem sind an den Messstellen **1** und **2** die jeweiligen Teufen zu ermitteln, um den Einfluss der geodätischen Höhenunterschiede auf die gemessene Druckdifferenz berücksichtigen zu können. Schließlich benötigt man zur Bestimmung der jeweiligen Wetterdichten ρ die Trocken- und Feuchttemperaturen an den Messstellen **1** und **2** sowie die Umgebungsdrücke. Da diese Barometermessung lediglich zur Bestimmung der Wetterdichten ρ benutzt werden und nicht zur Bestimmung der Druckdifferenzen, kann hierbei sogar eine Änderung des barometrischen Luftdruckes in der Größenordnung von 1 hPa vernachlässigt werden, ohne den Wert der zu errechnenden Wetterdichten merklich zu beeinflussen.

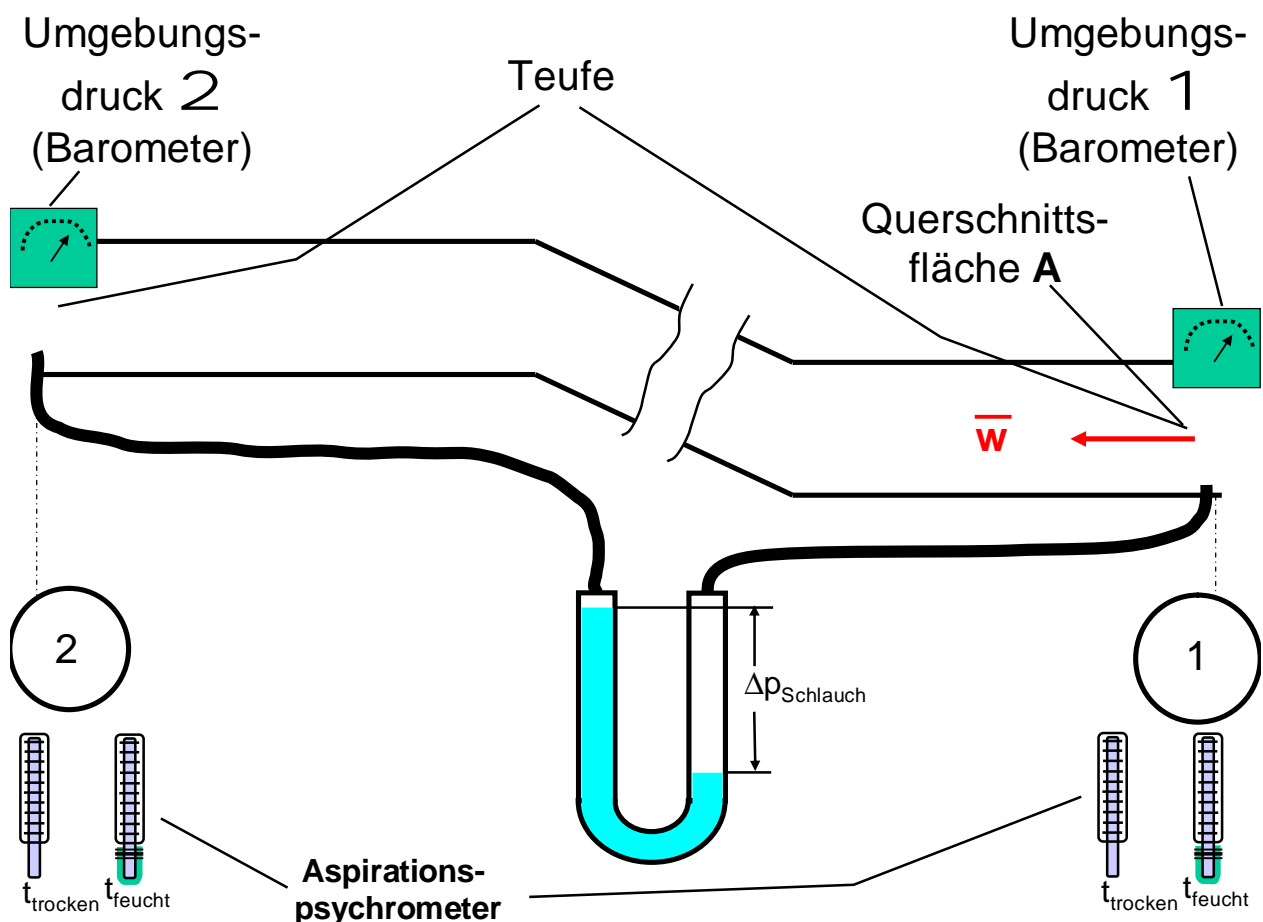


Bild 162: Wetterdruckmessung mit Hilfe einer Schlauchmessung

Das bereits weiter oben in Tabelle 8 abgehandelte Übungsbeispiel wird nun in Form einer Schlauchmessung erneut vorgestellt (Tabelle 9). Die rot eingetragenen Zahlenwerte geben erneut die unmittelbar aus der Messung hervorgegangenen Werte wieder. Die schwarzen Zahlenwerte sind die daraus abgeleiteten Größen. Die zur Ermittlung dieser Größen zu verwendenden Gleichungen sind in der Tabelle ebenso angegeben, wie die Quellen der entsprechenden Angaben. Wenn kein Teufenunterschied zwischen den Messstellen **1** und **2** bestehen sollte, dann wäre der bei der Schlauchmessung ermittelte Differenzdruck $\Delta p_{\text{Schlauch}}$ gleich dem Druckverlust Δp in dem betrachteten Abschnitt des Wetterweges. Anderenfalls muss noch das Höhenglied $\rho_{\text{Mittel}} \cdot g \cdot \Delta h$ berücksichtigt werden.

	Einheit	Gleichung bzw. Quelle	Messstelle 1		Messstelle 2
$\Delta p_{\text{Schlauch}}$	Pa	Schlauchmessung		470	
p_{Umgebung}	Pa	Barometermessung	117724		117255
t_{trocken}	°C	Psychrometermessung	34		35
t_{feucht}	°C	Psychrometermessung	28		29
Absoluttemperatur T	K	$T = t_{\text{trocken}} + 273,15$	307,15		308,15
Teufe h	m	markscheiderische Angaben	1315		1296
Teufendifferenz Δh	m	$\Delta h = h_2 - h_1$		-19	
x	kg/kg	aus h-x-Diagramm (Kapitel 2.10) (siehe Bild 161)	0,0180		0,0193
Gaskonstante feuchter Luft R_f	N·m/(kg·K)	$R_f = \frac{R_L + x \cdot R_D}{1 + x}$ (33) $R_L = 287,1 \text{ N·m/(kg·K)}$ (Luft) $R_D = 461,5 \text{ N·m/(kg·K)}$ (Dampf)	290,18		290,40
ρ	kg/m ³	$\rho = \frac{p_{\text{Umgebung}}}{R_f \cdot T}$ (Kap. 2.10)	1,32		1,31
ρ_{Mittel}	kg/m ³	$\rho_{\text{Mittel}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$		1,315	
Druckverlust Δp	Pa	$\Delta p = \Delta p_{\text{Schlauch}} + \rho_{\text{Mittel}} \cdot g \cdot \Delta h$		224	
A	m ²	siehe Kapitel 7.4.3.1		21,7	
\bar{w}	m/s	siehe Kapitel 7.4.3.1		2,6	
\dot{V}	m ³ /s	$\dot{V} = \bar{w} \cdot A$		56,4	
Wetterwiderstand R	kg/m ⁷	$R = \Delta p / \dot{V}^2$ (147a)		<u>0,0704</u>	

Tabelle 9: Auswertung einer Wetterdruckmessung (Schlauchmessung)

Aufgrund der genaueren Messmethode bei der Schlauchmessung konnte in dem betrachteten Beispiel der Druckverlust Δp mit 224 Pa ermittelt werden, während man bei der Barometermessung den entsprechenden Wert mit 225 Pa bestimmt hatte. Der Wetterwiderstand konnte genauer mit $R = 0,0704 \text{ kg/m}^7$ errechnet werden, während bei der Barometermessung der entsprechende Wert $0,0707 \text{ kg/m}^7$ betrug.

7.4.4 Wetterwege mit Maschen und Knoten

Analog zu den Kirchhoffschen Regeln der Elektrotechnik gibt es auch in der Wettertechnik Regeln für die Berechnung von Wetternetzen, die aus Knoten und Maschen zusammengesetzten sind:

- die Knotenregel und
- die Maschenregel.

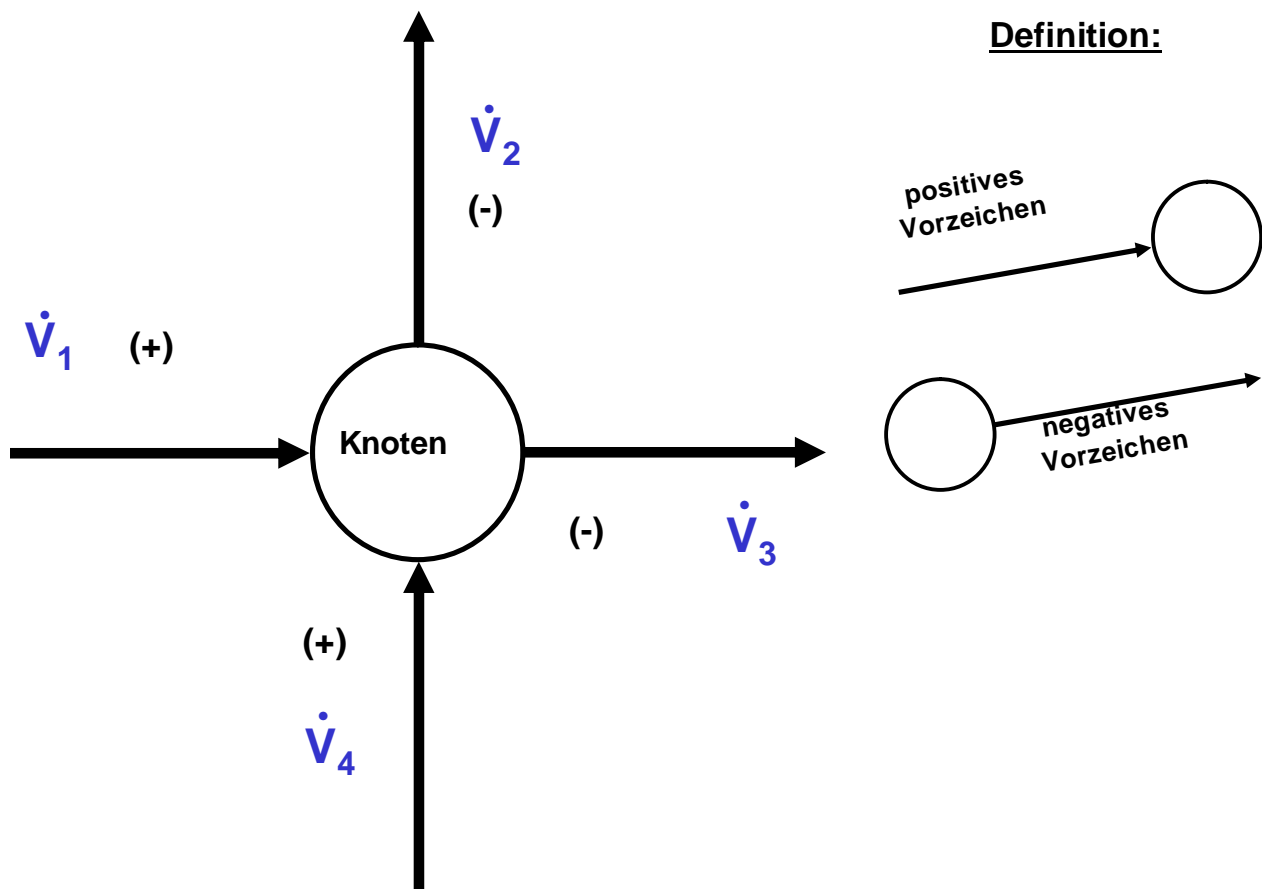


Bild 163: Darstellung der Knotenregel

Die Summe aller Wettervolumenströme, die zu einem Knotenpunkt hinströmen, muss gleich sein der Summe aller Wettervolumenströme, die von einem Knotenpunkt wegströmen, da bei inkompressibler Strömung in dem Knotenpunkt Wettervolumenströme weder entstehen, noch verschwinden können (Bild 163). Diese Aussage bezeichnet man als Knotenregel.

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 - \dot{V}_3 + \dot{V}_4 = 0 \quad (150)$$

oder

$$\sum_{i=1}^n \dot{V}_i = 0$$

Dabei wird als Definition vereinbart, dass zu einem Knotenpunkt hinströmende Volumenströme ein positives Vorzeichen erhalten, während die von einem Knotenpunkt wegziehenden Volumenströme ein negatives Vorzeichen erhalten.

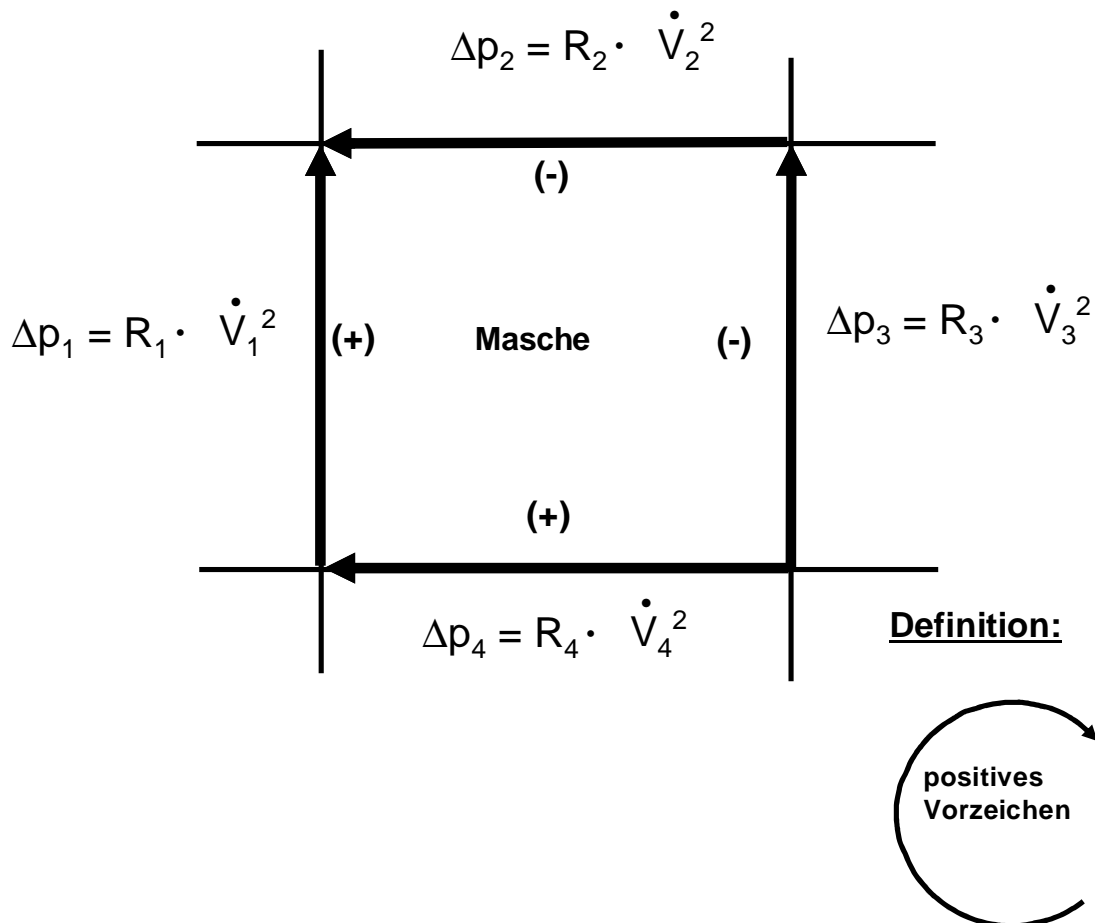


Bild 164: Darstellung der Maschenregel

In einer geschlossenen Masche (Bild 164) ist die Summe aller Druckverluste Δp gleich Null.

$$\Delta p_1 - \Delta p_2 - \Delta p_3 + \Delta p_4 = R_1 \cdot \dot{V}_1^2 - R_2 \cdot \dot{V}_2^2 - R_3 \cdot \dot{V}_3^2 + R_4 \cdot \dot{V}_4^2 = 0 \quad (151)$$

oder

$$\sum_{j=1}^m \Delta p_j = 0$$

Dabei wird als Definition vereinbart, dass innerhalb einer geschlossenen Masche alle im Uhrzeigersinn fließenden Wetterströme ein positives Vorzeichen erhalten, während alle gegen den Uhrzeigersinn fließenden Wetterströme ein negatives Vorzeichen erhalten.

In mehreren hintereinander geschalteten Wetterwegen (Bild 165 oben) gilt, dass der Gesamtdruckverlust Δp_{gesamt} gleich der Summe der einzelnen Druckverluste sein muss.

$$\Delta p_{\text{gesamt}} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \dots = R_1 \cdot \dot{V}_1^2 + R_2 \cdot \dot{V}_2^2 + R_3 \cdot \dot{V}_3^2 + \dots \quad (152)$$

In hintereinander geschalteten Wetterwegen muss zudem der Wettervolumenstrom gleich sein, weil bei inkompressibler Strömung dazwischen Wettervolumenströme weder entstehen, noch verschwinden können.

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V}_3 = \dot{V}$$

Nach Gleichung (152) gilt damit

$$\Delta p_{\text{gesamt}} = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) \cdot \dot{V}^2$$

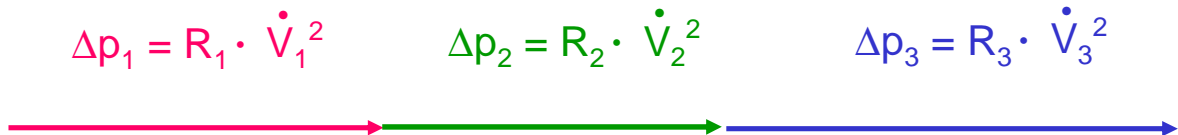
Den Gesamtwetterwiderstand R_{ges} erhält man bei hintereinander geschalteten Wetterwegen somit aus der Summe der Einzelwetterwiderstände.

$$R_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^I R_k$$

damit wird Gleichung (152) zu:

$$\Delta p_{\text{gesamt}} = R_{\text{ges}} \cdot \dot{V}^2.$$

Hintereinander geschaltete Wetterwege:



Parallel geschaltete Wetterwege:

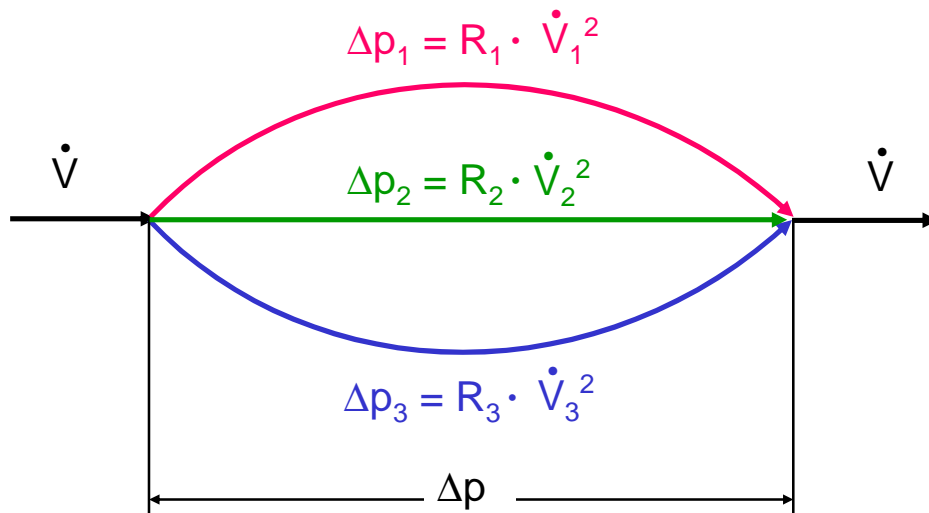


Bild 165: Hintereinander und parallel geschaltete Wetterwege

In mehreren parallel geschalteten Wetterwegen gilt, dass der Druckverlust über alle parallelen Wetterwege gleich sein muss (Bild 165 unten).

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p_3 = \Delta p$$

Damit gilt

$$\Delta p = R_1 \cdot \dot{V}_1^2 = R_2 \cdot \dot{V}_2^2 = R_3 \cdot \dot{V}_3^2 \tag{153}$$

Die Wettervolumenströme verteilen sich folgendermaßen auf die parallelen Wetterwege:

$$\frac{\dot{V}_1}{\sqrt{R_2}} = \frac{\dot{V}_2}{\sqrt{R_3}} = \frac{\dot{V}_3}{\sqrt{R_1}} \tag{154}$$

Den Gesamtwetterwiderstand R_{ges} erhält man bei parallel geschalteten Wetterwegen durch folgende Beziehung:

$$\frac{1}{\sqrt{R_{\text{ges}}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{R_n}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_i}} \quad (155)$$

oder beispielsweise für zwei parallele Wetterwege:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})^2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + 2 \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2}} \quad (156)$$

7.4.5 Berechnung eines einfachen, inkompressiblen Wetternetzes aus hintereinander liegenden und parallelen Wetterwegen

Als Rechenbeispiel mit einem einfachen inkompressiblen Wetternetz und zwei parallelen Wetterwegen wird der Abbaubereich eines Strebbetriebes betrachtet (Bild 166). Der Ab-

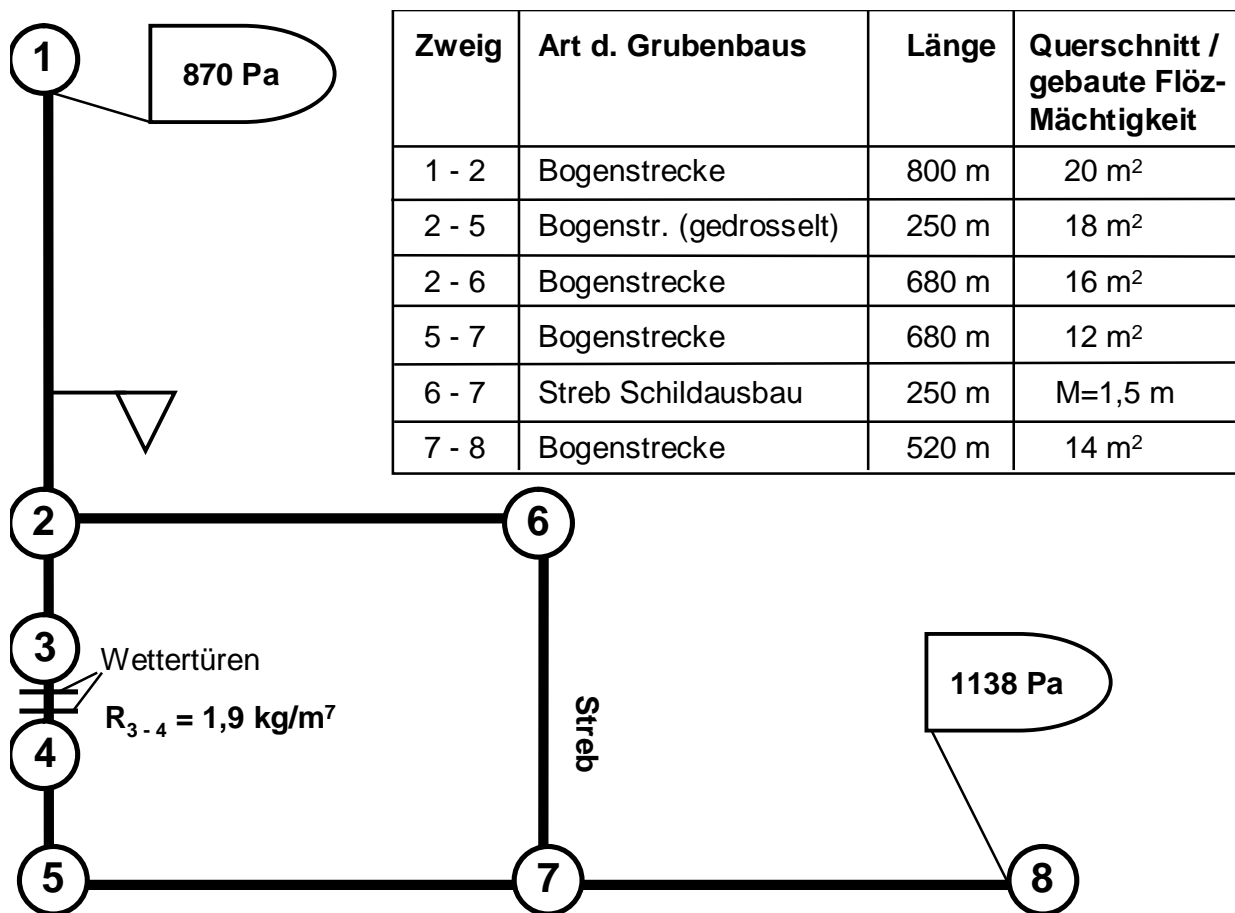


Bild 166: Schematische Darstellung eines einfachen Wetternetzes

baubereich besteht zum einen aus einer Basisstrecke mit den Knotenpunkten 1, 2 und 5. Der Grubenbau zwischen den Knotenpunkten 2 und 6 stellt die Kohlenabfuhrstrecke dar, während sich zwischen den Knotenpunkten 5 und 7 die Kopfstrecke befindet. Zwischen den Knotenpunkten 6 und 7 ist der Streb angeordnet. Der Grubenbau zwischen den Knotenpunkten 7 und 8 stellt die Abwetterstrecke dar. Die Basisstrecke zwischen den Knotenpunkten 2 und 5 ist zusätzlich durch Wettertüren gedrosselt, um den Streb mit seinem relativ hohen Strömungswiderstand mit ausreichend hohem Wettervolumenstrom zu versorgen. Die Wettertüren zwischen den Knotenpunkten 3 und 4 stellen einen zusätzlichen Widerstandswert $R_{3-4} = 1,9 \text{ kg / m}^7$ dar. Dies ist ein Erfahrungswert für Wettertüren in derartigen Grubenbauen. Am Knotenpunkt 1 herrscht ein Ortsdruck von 870 Pa und am Kno-

tenpunkt **8** ein Ortsdruck von 1138 Pa. Wie das Wetterföhnchen zwischen den Knotenpunkten **1** und **2** anzeigt, strömen die Wetter von Knotenpunkt **1** in Richtung zum Knotenpunkt **8**. Im Kapitel 7.3.3 wurde gezeigt, dass bei saugender Bewetterung die Ortsdrücke vom Einziehschacht in Richtung zum Hauptgrubenventilator hin wertmäßig ansteigen.

Aus dem Bild 153 für Strecken mit Stahlbogenausbau und dem Bild 154 für Streben mit Schildausbau lassen sich mit den Angaben aus dem Bild 167 die jeweiligen **R₁₀₀-Werte** sowie die tatsächlichen Wetterwiderstände **R** entsprechend ihrer konkreten Längen ermitteln (siehe Tabelle10).

Zweig	R ₁₀₀ -Wert [kg / m ⁷]	Wetterwiderstand R [kg / m ⁷]
1 – 2	0,0027	0,0216
2 – 5	0,0037	0,0093 ¹⁾ + 1,9 ²⁾ = 1,9093
2 – 6	0,0050	0,0340
5 – 7	0,0100	0,0680
6 – 7	0,073	0,1825
7 – 8	0,0080	0,0416

1) Wetterwiderstand des ungedrosselten Grubenausbaus

2) zusätzlicher Wetterwiderstand der Wassertüren

Tabelle 10: R₁₀₀-Werte und tatsächliche Wetterwiderstände

Der gesamte Wetterwiderstand **R_{ges, ||}** der beiden parallelen Wetterwege **2 - 6 - 7** und **2 - 5 - 7** errechnet sich nach Gleichung (156)

$$R_{ges, ||} = \frac{R_{2-6-7} \cdot R_{2-5-7}}{(\sqrt{R_{2-6-7}} + \sqrt{R_{2-5-7}})^2}$$

$$R_{2-6-7} = R_{2-6} + R_{6-7} = 0,0340 \text{ kg / m}^7 + 0,1825 \text{ kg / m}^7 = 0,2165 \text{ kg / m}^7$$

$$R_{2-5-7} = R_{2-5} + R_{5-7} = 1,9093 \text{ kg / m}^7 + 0,0680 \text{ kg / m}^7 = 1,9773 \text{ kg / m}^7$$

$$R_{ges, ||} = 0,1222 \text{ kg / m}^7$$

Der gesamte Wetterwiderstand **R_{ges}** zwischen den Knotenpunkten **1** und **8** ist schließlich

$$R_{ges} = R_{1-2} + R_{ges, ||} + R_{7-8} = 0,0216 \text{ kg / m}^7 + 0,1222 \text{ kg / m}^7 + 0,0416 \text{ kg / m}^7$$

$$R_{ges} = 0,1854 \text{ kg / m}^7$$

Den Wettervolumenstrom, der insgesamt zwischen den Knotenpunkten **1** und **8** fließt, erhält man, indem man Gleichung (147a) entsprechend umformt

$$\dot{V} = \sqrt{\Delta p_{1-8} / R_{ges}}$$

Der Druckverbrauch **Δp₁₋₈** zwischen den Knotenpunkten **1** und **8** entspricht der Differenz der Ortsdrücke an den Knotenpunkten **1** und **8**, in diesem Fall

$$\Delta p_{1-8} = 1138 \text{ Pa} - 870 \text{ Pa} = 268 \text{ Pa.}$$

Somit errechnet sich der Wettervolumenstrom zwischen den Knotenpunkten **1** und **8** zu

$$\dot{V} = 38,02 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Dieser gesamte Wettervolumenstrom teilt sich am Knotenpunkt **2** auf in die beiden parallelen Volumenströme \dot{V}_{2-6-7} und \dot{V}_{2-5-7} . Diese parallelen Volumenströme verhalten sich entsprechend Gleichung (154):

$$\dot{V}_{2-6-7} / \dot{V}_{2-5-7} = \sqrt{R_{2-5-7} / R_{2-6-7}}$$

$$\dot{V}_{2-6-7} / \dot{V}_{2-5-7} = 3,0221$$

$$\dot{V}_{2-5-7} = \dot{V} / (1 + 3,0221) = 9,45 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\dot{V}_{2-6-7} = \dot{V} - \dot{V}_{2-5-7} = 28,57 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Am Knotenpunkt **7** vereinigen sich die beiden Teilvolumenströme \dot{V}_{2-5-7} und \dot{V}_{2-6-7} wieder zum gesamten Wettervolumenstrom \dot{V} .

Zusätzlich lassen sich die Druckverbräuche der einzelnen Wetterwege entsprechend Gleichung (147a) bestimmen:

$$\Delta p_{1-2} = R_{1-2} \cdot (\dot{V}_{1-2})^2 = 0,0216 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (38,02 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 31,22 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{2-5} = R_{2-5} \cdot (\dot{V}_{2-5-7})^2 = 1,9093 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (9,45 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 170,58 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{5-7} = R_{5-7} \cdot (\dot{V}_{2-5-7})^2 = 0,0680 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (9,45 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 6,08 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{2-6} = R_{2-6} \cdot (\dot{V}_{2-6-7})^2 = 0,0340 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (28,57 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 27,74 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{6-7} = R_{6-7} \cdot (\dot{V}_{2-6-7})^2 = 0,1825 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (28,57 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 148,91 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{7-8} = R_{7-8} \cdot (\dot{V}_{2-6-7})^2 = 0,0416 \text{ kg} / \text{m}^7 \cdot (38,02 \text{ m}^3 / \text{s})^2 = 60,12 \text{ Pa}$$

Der Druckverbrauch in jedem der zwei parallelen Wetterwege **2 - 6 - 7** und **2 - 5 - 7** muss nach Gleichung (153) gleich groß sein

$$\Delta p_{2-5-7} = \Delta p_{2-5} + \Delta p_{5-7} = \Delta p_{2-6-7} = \Delta p_{2-6} + \Delta p_{6-7}$$

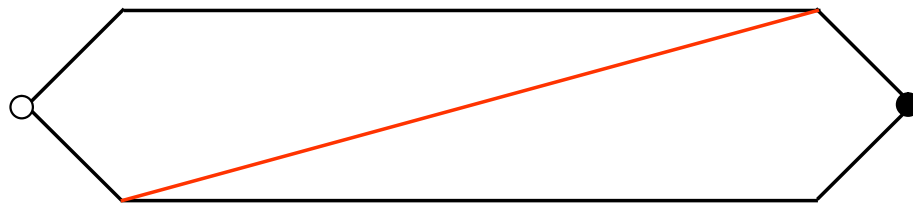
Der gesamte Druckverbrauch zwischen den Knotenpunkten **1** und **8** muss der Differenz der Ortsdrücke an den Knotenpunkten **1** und **8** entsprechen.

$$\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-5} + \Delta p_{5-7} + \Delta p_{7-8} = \Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-6} + \Delta p_{6-7} + \Delta p_{7-8} = 268 \text{ Pa}$$

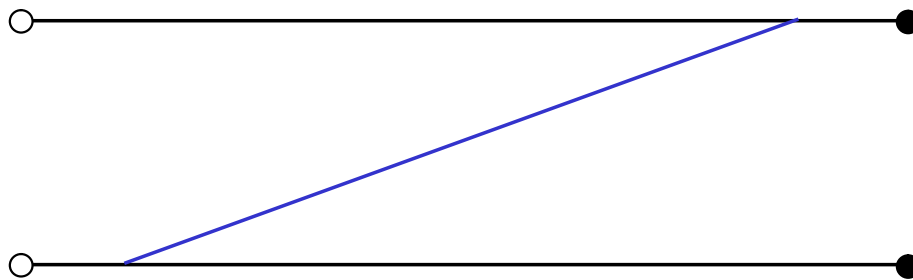
7.4.6 Diagonale Wetterwege

Die Berechnung eines Wetternetzes aus hintereinander liegenden und parallelen Wetterwegen ist noch relativ einfach, wie das Beispiel im Kapitel 7.4.5 zeigt. Werden dagegen parallele Wetterwege zusätzlich untereinander durch so genannte diagonale Wetterwege verbunden, dann wird die Berechnung eines derartigen Wetternetzes deutlich komplizierter. Von einem „diagonalen Wetterweg erster Ordnung“ spricht man bei einer Verbindung von parallelen Wetterwegen, in der die Wetterrichtung von den Widerständen der an diesen Wetterweg angrenzenden Grubenbaue abhängt (Bild 167 oben). Von einem „diagonalen Wetterweg zweiter Ordnung“ spricht man bei einem Wetterweg zwischen zwei Wetterfeldern, in dem die Wetterrichtung sowohl von den Widerständen der an diesen Wetterweg angrenzenden Grubenbaue als auch von der Druckerzeugung der Lüfter an ausziehenden Tagesschächten, von der Druckerzeugung der Zusatzlüfter und von Auftrieben abhängt (Bild 167 unten).

Diagonaler Wetterweg erster Ordnung:



Diagonaler Wetterweg zweiter Ordnung:



○ Einziehender Schacht ● Ausziehender Schacht

Bild 167: Diagonale Wetterwege erster und zweiter Ordnung

7.4.7 Äquivalente Grubenweite

Bei einem komplexen System paralleler, hintereinander geschalteter und diagonalen Wetterwege, wie es beispielsweise bei einem Grubengebäude der Fall ist, lässt sich der Gesamtwiderstand R_{ges} unter Zuhilfenahme des Durchlassvermögens einer gleichwertigen Blendenöffnung, der so genannten äquivalenten Grubenweite darstellen (Bild 168).

Öffnungsquerschnittsfläche $A \hat{=}$ gleichwertige oder äquivalente Grubenweite

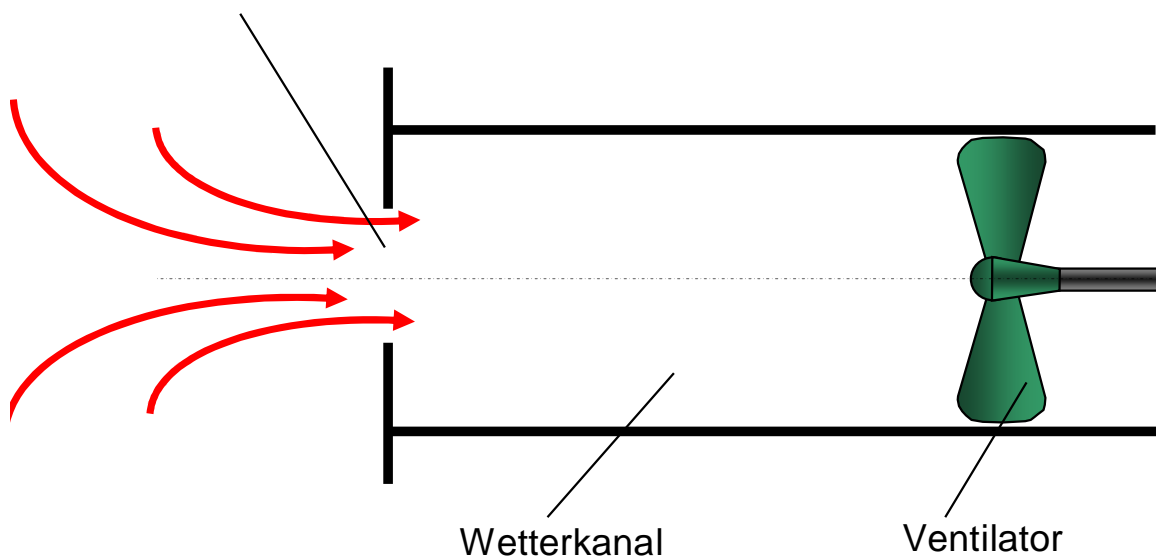


Bild 168: Darstellung der äquivalenten Grubenweite

Wie bereits im Kapitel 3.16 beschrieben, lässt sich der Volumenstrom in einem Leitungssystem unter anderem mit Hilfe einer Messblende entsprechend der Gleichung (83) bestimmen

$$\dot{V} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho} \quad (83)$$

Darin ist α die dimensionslose Durchflusszahl und ε die dimensionslose Expansionszahl. Nach der Blenden-Querschnittsöffnung A aufgelöst, wird aus der Gleichung (83)

$$A = 1 / (\alpha \cdot \varepsilon) \cdot \{ \rho / (2 \cdot \Delta p) \}^{1/2} \cdot \dot{V}$$

Setzt man nun für die Durchflusszahl den Wert $\alpha = 0,65$ und für die Expansionszahl den Wert $\varepsilon = 1,0$ an, nimmt man außerdem für die Dichte der Wetter im Bereich der Blende den Wert $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ an, so ergibt sich für die Blenden-Querschnittsöffnung A die Näherungsgleichung

$$A \approx 1.191687 \cdot \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta p}} \approx \frac{1,2}{\sqrt{R_{\text{ges}}}} \quad (157)$$

Die äquivalente Grubenweite A entspricht somit einer fiktiven Blenden-Querschnittsöffnung, die unter Verwendung desselben Hauptgrubenventilators den gleichen Wettervolumenstrom hindurchströmen lässt wie das Grubengebäude. Die Beziehung zwischen dem Gesamtwiderstand R_{ges} und der äquivalenten Grubenweite A lautet somit näherungsweise

$$R_{\text{ges}} \approx \frac{1,44}{A^2} \quad (158)$$

7.5 Berechnung von verzweigten Wetternetzen

7.5.1 Grundlagen der Wetternetzrechnung

In einem komplexen Netzwerk, bestehend aus einer Vielzahl hintereinander geschalteter, paralleler und diagonalen Wetterwege treten die drei Größen Druckabfall Δp , Wetterwiderstand R und Wettervolumenstrom \dot{V} in jedem einzelnen Wetterweg als Unbekannte auf. Ein Wetternetz, das aus x Wetterwegen besteht, enthält $3 \cdot x$ Unbekannte. Diese Unbekannten können aus dem quadratischen Gesetz der Grubenbewetterung

$$\Delta p = R \cdot \dot{V}^2 \quad (147a)$$

und den Kirchhoffschen Regeln

$$\sum \dot{V} = 0 \quad (150)$$

$$\sum \Delta p = 0 \quad (151)$$

errechnet werden. Man erhält bei x Wetterwegen mit y Knotenpunkten und z Maschen

x Gleichungen der Art $\Delta p = R \cdot \dot{V}^2$

$y - 1$ Gleichungen der Art $\sum \dot{V} = 0$

z Gleichungen der Art $\sum \Delta p = 0$

Meistens sind die Wetterwiderstände R der einzelnen Wetterwege aufgrund von Messergebnissen oder als Erfahrungswerte bekannt. Somit bleiben x Wettervolumenströme und x Druckabfälle zu bestimmen. Zu ihrer Berechnung sind $2 \cdot x$ Gleichungen erforderlich. Dazu stellt man zweckmäßigerweise

$$\begin{array}{lll}
 x & \text{Gleichungen der Art} & \Delta p = R \cdot \dot{V}^2 \\
 y - 1 & \text{Gleichungen der Art} & \sum \dot{V} = 0 \text{ und} \\
 x - y - 1 & \text{Gleichungen der Art} & \sum \Delta p = 0
 \end{array}$$

auf. Da von den für eine Wetternetzberechnung notwendigen Gleichungen nur $y - 1$ beziehungsweise z Gleichungen linear sind, kann – wie man weiß – die Berechnung von Wetternetzen recht kompliziert werden. Möglichkeiten zur Berechnung mit Hilfe elektronischer Rechner beschreibt Greuer [130].

Für die Berechnung von Strömungsnetzen hat sich ein von Hardy Cross (*US-amerikanischer Professor für Bauingenieurwesen und Hochbau an der Universität von Illinois, 10.02.1885 - 11.02.1959*) im Jahr 1936 vorgeschlagenes Iterationsverfahren bewährt [127]. Jedem Wetterweg wird dabei entweder ein bestimmter Wettervolumenstrom oder ein bestimmter Druckverbrauch zugeordnet, so dass entweder die Knotenbedingung oder aber die Maschenbedingung der Kirchhoffschen Regeln konsequent eingehalten werden. Das Verfahren von Cross bedient sich des Newtonschen Näherungsverfahrens (Bild 169).

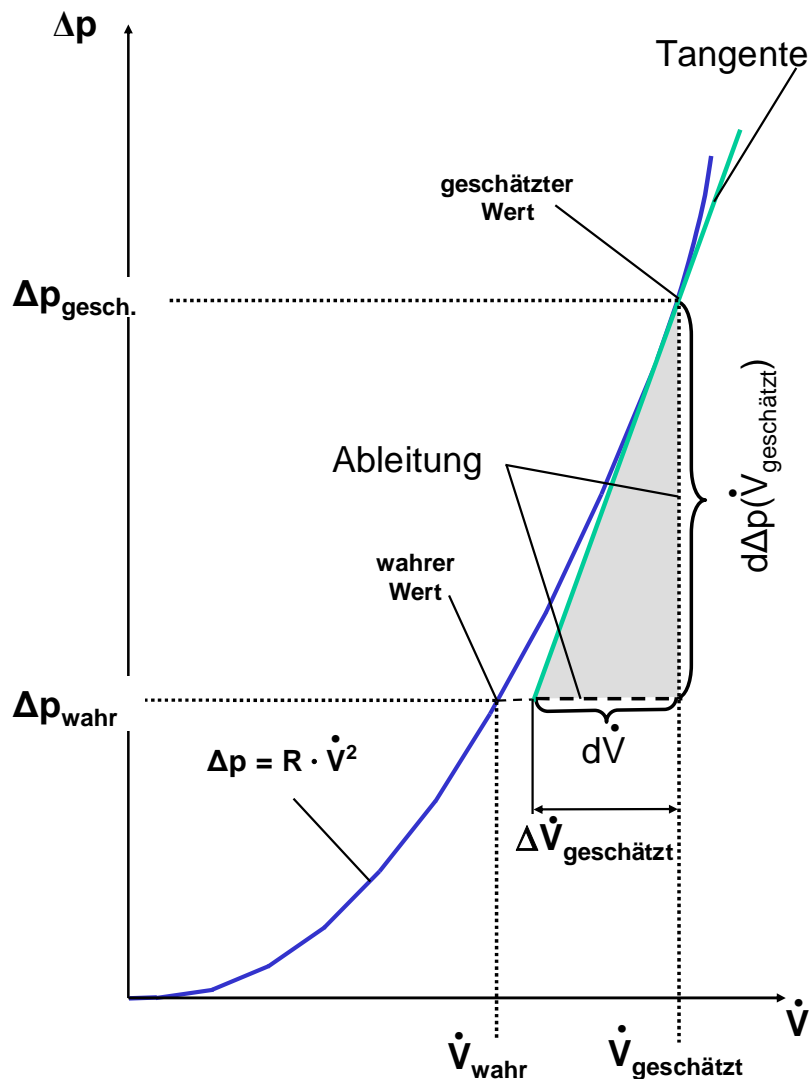


Bild 169: Darstellung der Wettervolumenstrom-Berichtigung mit Hilfe des Newtonschen Näherungsverfahrens

In einem Wetterweg mit dem Wetterwiderstand R und dem wahren Druckverbrauch Δp_{wahr} wird zunächst ein Wettervolumenstrom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ erdacht. Bei der Annahme dieses Schätzwertes entsteht folgender Fehler

$$\Delta \dot{V}_{\text{geschätzt}} \approx \frac{-(\Delta p_{\text{geschätzt}} - (\Delta p_{\text{wahr}}))}{d \Delta p (\dot{V}_{\text{geschätzt}}) / d \dot{V}} \quad (159)$$

oder durch Bildung der ersten Ableitung unter Beachtung der quadratischen Funktion

$$d \Delta p (\dot{V}_{\text{geschätzt}}) / d \dot{V} = 2 \cdot R \cdot \dot{V} \quad (160)$$

$$\Delta \dot{V}_{\text{geschätzt}} \approx \frac{-(\Delta p_{\text{geschätzt}} - (\Delta p_{\text{wahr}}))}{2 \cdot R \cdot \dot{V}} \quad (159)$$

Betrachtet man eine Masche mit z Wetterwegen, dann muss der Maschenbedingung der Kirchhoffschen Regeln zufolge gelten

$$\sum_{i=1}^z \Delta p (V_i) = 0$$

Wird zusätzlich unterstellt, dass der Fehler $\Delta \dot{V}$ bei der Annahme der Wettervolumenströme \dot{V}_i für alle Wetterwege innerhalb einer Masche gleichgroß ist, dann ergibt sich das Berichtigungsglied

$$\Delta \dot{V} \approx - \frac{\sum_{i=1}^z R_i \cdot \dot{V}_i \cdot |\dot{V}_i|}{2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot |\dot{V}_i|} \quad (161)$$

Die Einführung des Absolutwertes $|\dot{V}_i|$ ist erforderlich, da bei der Summenbildung der Drücke rund um eine Masche das Vorzeichen des Druckabfalls, das heißt die Strömungsrichtung berücksichtigt werden muss. $(-\dot{V}_i)^n$ ist entweder immer positiv oder imaginär.

Die Annahme, dass der Wettervolumenstrom-Fehler $\Delta \dot{V}$ für alle Wetterwege der betrachteten Masche gleichgroß ist, trifft selbstverständlich nicht zu. Die Berichtigung der geschätzten Wettervolumenströme mit $\Delta \dot{V}$ führt zu einem neuen, verbesserten Schätzwert. Die mehrfache Berichtigung führt schließlich schrittweise zu einer Annäherung an den wahren Wert.

Mit dem nach Hardy Cross vorgeschlagenen Iterationsverfahren lassen sich Wetternetze jeder Ausdehnung und jeder Gestalt mit beliebiger Genauigkeit berechnen. Andere Einflussgrößen wie zum Beispiel Ventilator Kennlinien oder natürlicher Auftrieb können in die Rechnung mit einbezogen werden. Sogar Rechenfehler werden bei Iterationsverfahren berichtigt und vergrößern lediglich die Anzahl der erforderlichen Iterationsschritte.

Zur Schematisierung des Rechenverfahrens ist es erforderlich, das Vorzeichen von \dot{V} durch einen besonderen Vorzeichenfaktor $f (+1; -1)$ auszudrücken. Wird das Minuszeichen in Gleichung (161) in den Vorzeichenfaktor f einbezogen, dann wird das Berichtigungsglied

$$\Delta \dot{V} \approx \frac{\sum_{i=1}^z f_i \cdot R_i \cdot \dot{V}_i \cdot |\dot{V}_i|}{2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot |\dot{V}_i|} \quad (162)$$

Der korrigierte Wettervolumenstrom $\dot{V}_{\text{korrigiert}}$ ergibt sich aus $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ und dem Berichtigungsglied $\Delta \dot{V}$ zu

$$\dot{V}_{\text{korrigiert}} = \dot{V}_{\text{geschätzt}} - f \cdot \Delta \dot{V} \quad (163)$$

Es ist gleichgültig für welche Strömungsrichtung innerhalb einer Masche man f positiv oder negativ zähle (im Uhrzeigersinn oder gegen den Uhrzeigersinn). Es ist jedoch wichtig, dass man sich für jede Berichtigung an jeder einzelne Masche einmal festlegt.

7.5.2 Berechnung eines inkompressiblen Wetternetzes

Zur Berechnung eines inkompressiblen Wetternetzes wird im Bild 170 beispielhaft die schematische Darstellung eines kleinen Bergwerks mit 13 Knotenpunkten, 17 Wetterzweigen sowie 5 Maschen gezeigt. Das Grubengebäude besteht aus einem Einzieh- und einem Auszieh-

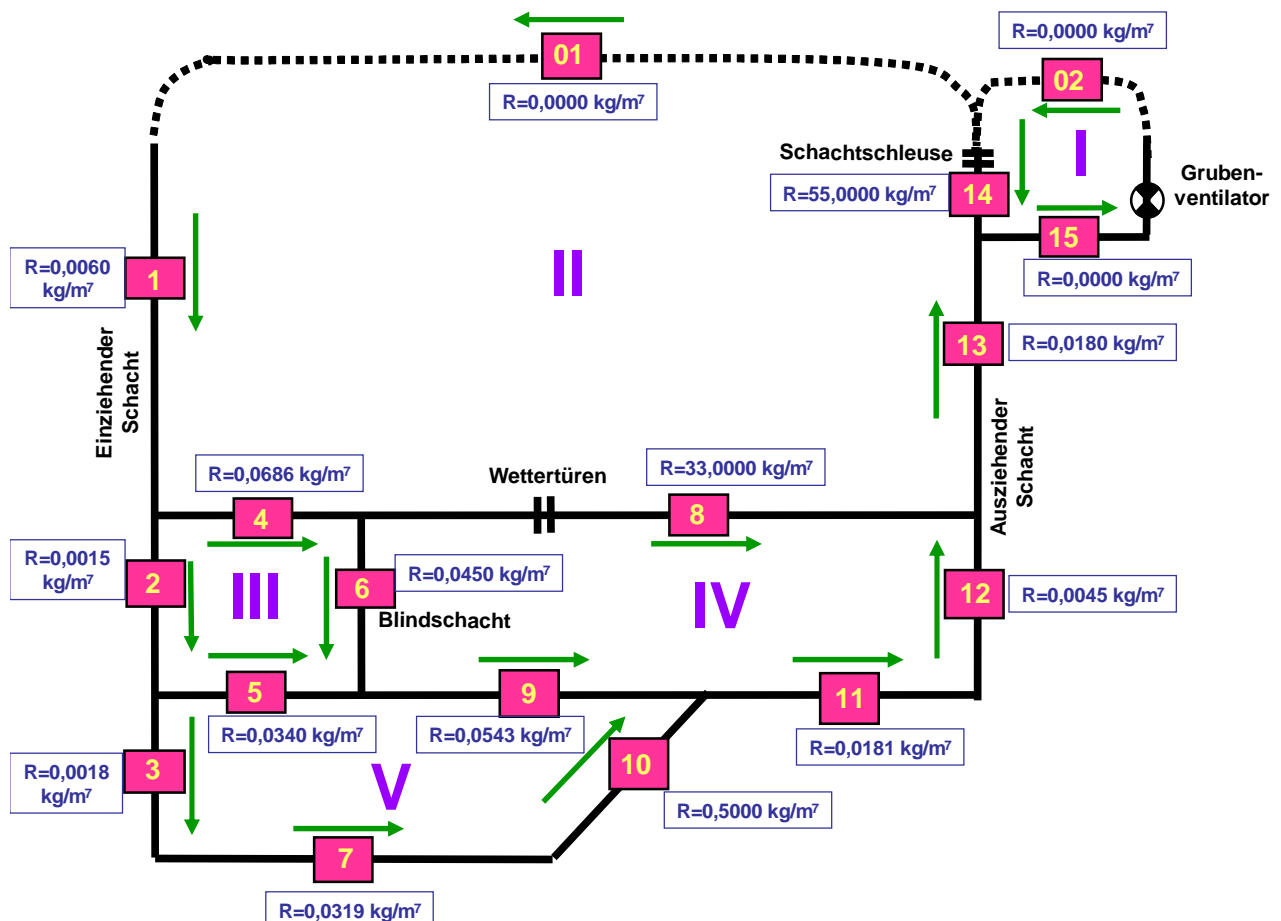


Bild 170: Schematische Darstellung eines kleinen Wettermodells

ziehschacht. In oberen Teil des Ausziehschachtes zweigt ein Wetterkanal mit einem Hauptgrubenventilator ab. Das Grubengebäude wird saugend bewettert. Um den Wetterkurzschluss zwischen der Tagesoberfläche und dem Wetterkanalanschluss zu reduzieren, befindet sich in diesem Bereich des Schachtes eine Schachtschleuse. Der Wetterweg **6** ist ein Blindschacht, der die erste und zweite Sohle miteinander verbindet. Allen Wetterzweigen wird eine geschätzte Wetterrichtung zugeordnet (grüne Pfeile). Sollte diese Wetterrichtung falsch geschätzt werden, wird am Ende der Berechnung der entsprechende Wettervolumenstrom mit einem negativen Vorzeichen versehen sein.

Um alle Wetterwege im Wetternetz in vollständig geschlossene Maschen einbinden zu können, müssen ebenfalls an der Tagesoberfläche zwischen dem einziehenden und ausziehenden Tagesschacht sowie zwischen dem Ausblasende des Hauptgrubenventilators und der Tagesöffnung des Abwetterschachtes imaginäre Wetterwege eingerichtet werden.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumenstrom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m³/s	Vorzeichenfaktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta P_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetterwiderstand R kg/m7	ermittelter Volumenstrom \dot{V} m³/s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrt.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m³/s
1	15	I	200	-1	-3000	0,0000	200	3000	0	$-2500 \div 1100 = -2,2727$	197,7273
2	02	I	200	-1		0,0000	200	0	0		197,7273
3	14	I	10	-1		55,0000	10	-5500	1100		7,7273
4								$\Sigma = -2500$	$\Sigma = 1100$		
5	1	II		-1		0,0060	190	-216,6	2,28	$-1053,8091 \div 1525,98 = -0,6906$	189,3094
6	01	II		-1		0,0000	190	0	0		189,3094
7	14	II		1		55,0000	7,7273	3284,0909	850		8,4179
8	13	II		-1		0,0180	190	-649,8	6,84		189,3094
9	8	II	10	-1		33,0000	10	-3300	660		9,3094
10	4	II	50	-1		0,0686	50	-171,5	6,86		49,3094
11								$\Sigma = -1053,8091$	$\Sigma = 1525,98$		
12	4	III		1		0,0686	49,3094	166,7953	6,7653	$124,3953 \div 14,185 = 8,7693$	40,5401
13	6	III		1		0,0450	40	72	3,6		31,2307
14	5	III	50	-1		0,0340	50	-85	3,4		58,7693
15	2	III		-1		0,0015	140	-29,4	0,42		148,7693
16								$\Sigma = 124,3953$	$\Sigma = 14,185$		
17	8	IV		1		33,0000	9,3094	2859,9558	614,42184	$1472,2349 \div 636,047 = 2,3147$	6,9948
18	12	IV	200	-1		0,0045	200	-180	1,8		202,3147
19	11	IV		-1		0,0181	200	-724	7,24		202,3147
20	9	IV		-1		0,0543	90	-439,83	9,774		92,3147
21	6	IV		-1		0,0450	31,2307	-43,8909	2,8108		33,5453
22								$\Sigma = 1472,2349$	$\Sigma = 636,047$		
23	5	V		1		0,0340	58,7693	117,4304	3,9963		$-3742,7951 \div 110,088 = -33,9983$
24	9	V		1		0,0543	92,3147	462,7445	10,0254	126,3130	
25	10	V		-1		0,5000	90	-4050	90	56,0017	
26	7	V		-1		0,0319	90	-258,39	5,742	56,0017	
27	3	V		-1		0,0018	90	-14,58	0,324	56,0017	
28								$\Sigma = -3742,7951$	$\Sigma = 110,088$		

Tabelle 11: Erster Schritt der Wetternetzberechnung für das Grubengebäude nach Bild 170

Erster Iterationsschritt:

In der Tabelle 11 ist der erste Schritt der Wetternetzberechnung für das Grubengebäude nach Bild 170 angegeben. Für jeden einzelnen Wetterzweig muss vor Beginn der Berechnung dessen Wetterwiderstand **R** bekannt sein. An diese Werte gelangt man entweder durch Messungen, die man in einem bestehenden, gleichen Grubengebäude durchgeführt hat, oder man ermittelt die Wetterwiderstände aus Tabellen beziehungsweise aus Diagrammen.

Erster Iterationsschritt, Masche I:

Die Masche **I** besteht aus den Wetterzweigen **15**, **02** und **14**. Der Zweig **15** stellt den Wetterkanal mit dem Hauptgrubenventilator dar. Der Zweig **14** stellt den oberen Teil des Ausziehschachtes dar, in dem der Wetterkurzschluss von der Tagesoberfläche bis zum Eingang des Wetterkanals fließt. Der Zweig **02** stellt den imaginären Wetterweg zwischen dem Ausblasende des Hauptgrubenventilators und der Tagesöffnung des Abwetterschachtes dar.

In der Masche **I** wird die Strömungsrichtung gegen den Uhrzeigersinn mit einem negativen Vorzeichen festgelegt; daher haben die drei Wetterzweige in der Masche **I** alle das Vorzeichen „-1“ (Spalte 4, Zeilen 1, 2 und 3 in der Tabelle 11).

Im Zweig **15** (Hauptgrubenventilator) und im imaginären Zweig **02** fließt derselbe Wettervolumenstrom. Dieser wird im ersten Schritt der Wetternetzberechnung beispielsweise mit einem rein willkürlichen Wert von **200 m³/s** geschätzt (Spalte 3, Zeilen 1 und 2 in der Tabelle 11). Je weiter entfernt dieser Schätzwert vom später berechneten tatsächlichen Wert entfernt ist, desto mehr Iterationsschritte werden erforderlich sein, was jedoch bei der Verwendung eines programmierbaren Rechners kein Problem darstellt. Der Wetterkurzschluss von der Tagesoberfläche bis zum Eingang des Wetterkanals wird mit **10 m³/s** geschätzt (Spalte 3, Zeile 3 in der Tabelle 11).

Die vom Hauptgrubenventilator erzeugte Druckerzeugung wird mit einem willkürlichen Wert von **-3000 Pa** geschätzt. Der tatsächliche Wert der Druckerzeugung entsprechend der Ventilator Kennlinie kann erst bei einem späteren Durchlauf der Berechnung eingesetzt werden, wenn bereits die äquivalente Grubenweite (siehe Kapitel 7.4.7) aus dem ersten Berechnungsdurchlauf ermittelt worden ist. Der Schätzwert der Druckerzeugung des Hauptgrubenventilators wird in der Spalte 5, Zeile 1 mit einem negativen Wert eingetragen, da es sich im Gegensatz zu den Druckverbräuchen in den einzelnen Wetterzweigen der Masche hierbei um eine Druckerzeugung handelt.

In der Spalte 6 sind die Wetterwiderstände der einzelnen Wetterzweige entsprechend den Angaben im Bild 170 eingetragen. Der Wetterwiderstand des Wetterkanals mit dem Hauptgrubenventilator (Zweig 15) wird vernachlässigt (Spalte 6, Zeile 1), weil hier nur die Druckerzeugung betrachtet werden soll. Der Wetterwiderstand des imaginären Wetterweges **02** zwischen dem Ausblasende des Hauptgrubenventilators und der Tagesöffnung des Abwetter-schachtes beträgt Null, weil dieser Wetterweg als Zweig real nicht existiert (Spalte 6, Zeile 2). Der obere Teil des Ausziehschachtes, in dem der Wetterkurzschluss von der Tagesoberfläche bis zum Eingang des Wetterkanals fließt (Zweig **14**), ist durch eine Schachtschleuse überaus stark gedrosselt. Daher hat sein Widerstandswert den besonders hohen Betrag von **55,0 kg/m⁷** (Spalte 6, Zeile 3), was dem Erfahrungswert einer derartigen Einrichtung entspricht.

In der Spalte 7, Zeilen 1, 2 und 3 erscheinen noch einmal die Schätzwerte der Wettervolumenströme aus der Spalte 3. Wie sich jedoch aus der anschließenden Betrachtung der übrigen Maschen sowie bei den weiteren Iterationsschritten zeigen wird, entsprechen die in der Spalte 7 dargestellten Wettervolumenströme nicht nur den anfänglichen Schätzwerten, sondern sie ergeben sich auch aus dem weiteren Ablauf der folgenden Berechnungen.

In die Spalte 8, Zeilen 1, 2 und 3 werden die Druckerzeugung des Ventilators beziehungsweise die Druckverbräuche der einzelnen Wetterzweige eingetragen. Beim Hauptgrubenventilator (Spalte 8, Zeile 1) wird der Schätzwert aus der Spalte 5 übernommen, jedoch mit dem entsprechenden Vorzeichenfaktor **f = -1** (Spalte 4, Zeile 1) multipliziert. Die Druckverluste jedes anderen Wetterzweiges in der Masche **I** werden nach folgender Gleichung berechnet (siehe Teil des Zählers aus Gleichung (162)):

$$\Delta p_i = f_i \cdot R_i \cdot \dot{V}_i \cdot \left| \dot{V}_i \right| \quad (164)$$

In der Spalte 8, Zeile 4 steht die Summe der Druckverluste beziehungsweise der Druckerzeugung innerhalb der Masche **I** (Spalte 8, Summe der Werte aus Zeilen 1, 2 und 3). Dies entspricht vollständig dem Zähler aus Gleichung (162).

$$\sum_{i=1}^z f_i \cdot R_i \cdot \dot{V}_i \cdot \left| \dot{V}_i \right| \quad (165)$$

In der Spalte 9, Zeilen 1, 2 und 3 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (siehe Teil des Nenners aus Gleichung (162)):

$$2 \cdot R_i \cdot |\dot{V}_i| \quad (166)$$

In der Spalte 9, Zeile 4 steht die Summe der Werte entsprechend dieser Beziehung innerhalb der Masche I (Spalte 9, Summe der Werte aus Zeilen 1, 2 und 3). Dies entspricht vollständig dem Nenner aus Gleichung (162).

$$2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot |\dot{V}_i| \quad (167)$$

Das Berichtigungsglied $\Delta \dot{V}$ (Gleichung (162)) errechnet sich somit durch Division des Wertes aus der Beziehung (165) (dies entspricht dem Wert aus Spalte 8, Zeile 4) durch den Wert aus der Beziehung (167) (dies entspricht dem Wert aus Spalte 9, Zeile 4). Das Berichtigungsglied für die Masche I befindet sich in der Spalte 10, Zeile 1. In der Spalte 11, Zeilen 1, 2 und 3 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden:

$$\dot{V}_{\text{korrigiert}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$$

Die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **15**, **02** und **14** befinden sich somit in der Spalte 11, Zeilen 1, 2 und 3. Sie ergeben sich aus den geschätzten Wettervolumenströmen (Spalte 7, Zeilen 1, 2 und 3) minus dem jeweiligen Vorzeichenfaktor f , der mit dem Berichtigungsglied für die Masche I zu multiplizieren ist. Folglich wurden aus den ursprünglich geschätzten Wettervolumenströmen für die Masche I nunmehr korrigierte Wettervolumenströme.

Erster Iterationsschritt, Masche II:

Die Masche II besteht aus den Wetterzweigen **1**, **01**, **14**, **13**, **8** und **4**. Der Wetterzweig **1** stellt den oberen Teil des einziehenden Schachtes von der Tagesoberfläche bis zur ersten Sohle dar. Der Zweig **01** stellt den imaginären Wetterweg zwischen der Tagesöffnung des Abwetterschachtes im Bereich des Wetterkurzschlusses und der Tagesöffnung des Frischwetter-schachtes dar. Der Zweig **14** ist identisch mit dem Zweig **14** aus der Masche I und stellt – wie bereits oben beschrieben – den oberen Teil des Ausziehschachtes dar, in dem der Wetterkurzschluss von der Tagesoberfläche bis zum Eingang des Wetterkanals fließt. Der Zweig **13** stellt den Bereich des Abwetterschachtes zwischen der ersten Sohle und dem Wetterkanalanschluss dar. Die Wetterzweige **8** und **4** bezeichnen die Abschnitte zwischen dem Frisch- und Abwetterschacht im Bereich der ersten Sohle. Der Zweig **8** ist durch ein Wetterbauwerk (Wettertüren) gedrosselt.

In der Masche II wird die Strömungsrichtung gegen den Uhrzeigersinn mit einem negativen Vorzeichen bestimmt; daher haben die Wetterzweige **1**, **01**, **13**, **8** und **4** in der Masche II das Vorzeichen „-1“ (Spalte 4, Zeilen 5, 6, 8, 9 und 10 in der Tabelle 11). Lediglich der Zweig **14** hat ein positives Vorzeichen (Spalte 4, Zeile 7), da dessen angenommene Wetterrichtung innerhalb der Masche II im Uhrzeigersinn verläuft.

Die in der Spalte 3 eingangs zu schätzenden Wettervolumenströme beschränken sich innerhalb der Masche II lediglich auf die Wetterzweige **8** und **4**. Diese werden für den Zweig **8** mit **10 m³/s** (Spalte 3, Zeile 9) und für den Zweig **4** mit **50 m³/s** (Spalte 3, Zeile 10) angenommen.

In der Spalte 6 sind die Wetterwiderstände der einzelnen Wetterzweige angegeben. Der Wetterwiderstand des imaginären Wetterweges **01** zwischen der Tagesöffnung des Abwetter-

schachtes im Bereich des Wetterkurzschlusses und der Tagesöffnung des Frischweterschachtes beträgt Null, weil dieser Wetterweg als Zweig real nicht existiert (Spalte 6, Zeile 6). Der Wetterzweig **8** ist durch ein Wetterbauwerk stark gedrosselt. Daher hat sein Widerstandswert insgesamt mit dem Widerstandswert dieses Wetterweges zusammen den besonders hohen Betrag von $33,0 \text{ kg/m}^7$ (Spalte 6, Zeile 9). Der Zweig **14** muss zwangsläufig den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **I** verwendet wurde. Die übrigen Widerstandswerte wurden in Abhängigkeit von ihren Querschnittsflächen sowie ihren Längen mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen ermittelt.

In der Spalte 7, Zeilen 5 bis 8 sind nunmehr Wettervolumenströme angegeben, die nicht mehr willkürlich geschätzt wurden, sondern bereits aus zuvor ermittelten Berechnungen abgeleitet werden können. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **1** ist identisch mit dem des Zweiges **01**, weil beide Zweige ohne Abzweig unmittelbar hintereinander angeordnet sind. Diese beiden Wettervolumenströme sind gleich dem Wettervolumenstrom des Zweiges **02**, allerdings vermindert um den Wettervolumenstrom des Zweiges **14**, weil dieser vom Wettervolumenstrom des Zweiges **02** abzweigt (siehe Bild 170). Rechnerisch ergibt sich daraus der ermittelte Wert $190 \text{ m}^3/\text{s}$ (Spalte 7, Zeilen 5 und 6). Der Wettervolumenstrom des Zweiges **14** ist bereits innerhalb der Berechnung für die Masche **I** ermittelt worden und wird daher aus der Spalte 11, Zeile 3 in die Spalte 7, Zeile 7 identisch übernommen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **13** ist gleich dem Wettervolumenstrom des Zweiges **15**, allerdings vermindert um den Wettervolumenstrom des Zweiges **14**, weil dieser in den Wettervolumenstrom des Zweiges **15** mit einmündet (siehe Bild 170). Rechnerisch ergibt sich daraus der ermittelte Wert $190 \text{ m}^3/\text{s}$ (Spalte 7, Zeile 8). Die Wettervolumenströme der Zweige **8** und **4** können zunächst nicht auf die soeben erklärte Weise ermittelt werden. Daher ist es erforderlich, die in Spalte 3, Zeilen 9 und 10 eingetragenen Schätzwerte in die Spalte 7, Zeilen 9 und 10 zu übernehmen.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **1**, **01**, **14**, **13**, **8** und **4** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 5 bis 10 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 11 eingetragen und hat den Wert **-1053,8091 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 5 bis 10 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 11 eingetragen und hat den Wert **1525,98**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 11 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 11). Das Berichtigungsglied für die Masche **II** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 6. In der Spalte 11, Zeilen 5 bis 10 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **1**, **01**, **14**, **13**, **8** und **4** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 5 bis 10.

Erster Iterationsschritt, Masche III:

Die Masche **III** besteht aus den Wetterzweigen **4**, **6**, **5** und **2**. Der Wetterweg **6** ist ein Blindschacht. Der Zweig **4** ist identisch mit dem Zweig **4** aus der Masche **II**.

In der Masche **III** wird die Strömungsrichtung im Uhrzeigersinn mit einem positiven Vorzeichen bestimmt; daher haben die Wetterzweige **4** und **6** in der Masche **III** das Vorzeichen „+1“ (Spalte 4, Zeilen 12 und 13 in der Tabelle 11). Die Zweige **5** und **2** haben ein negatives Vorzeichen (Spalte 4, Zeilen 14 und 15 in der Tabelle 11), da deren angenommene Wetterrichtungen innerhalb der Masche **III** gegen den Uhrzeigersinn verlaufen.

Die in der Spalte 3 eingangs zu schätzenden Wettervolumenströme beschränken sich innerhalb der Masche **III** lediglich auf den Wetterzweig **5**. Dieser wird mit $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Spalte 3, Zeile 14) angenommen.

In der Spalte 6 sind die Wetterwiderstände der einzelnen Wetterzweige angegeben. Der Zweig **4** muss zwangsläufig den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **II** verwendet wurde. Die übrigen Widerstandswerte wurden in Abhängigkeit von ihren Querschnittsflächen sowie ihren Längen mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen ermittelt.

In der Spalte 7, Zeilen 12 und 13 sowie Zeile 15 sind Wettervolumenströme angegeben, die nicht mehr willkürlich geschätzt werden, sondern bereits aus zuvor ermittelten Berechnungen abgeleitet werden können. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **4** ist bereits innerhalb der Berechnung für die Masche **II** ermittelt worden und wird daher aus der Spalte 11, Zeile 10 in die Spalte 7, Zeile 12 identisch übernommen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **6** ist gleich dem Wettervolumenstrom des Zweiges **4** vermindert um den Wettervolumenstrom des Zweiges **8**, weil dieser vom Wettervolumenstrom des Zweiges **4** abzweigt (siehe Bild 170). Der Wettervolumenstrom des Zweiges **8** ist bei der Berechnung der Masche **II** bereits ermittelt worden (Spalte 11, Zeile 9). Rechnerisch ergibt sich für den Zweig **6** der Wert **40 m³/s** (Spalte 7, Zeile 13). Der Wettervolumenstrom des Zweiges **5** kann zunächst nicht aus bereits bekannten Werten ermittelt werden. Daher ist es erforderlich, den in Spalte 3, Zeile 14 eingetragenen Schätzwert in die Spalte 7, Zeile 14 zu übernehmen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **2** ist gleich dem Wettervolumenstrom des Zweiges **1** vermindert um den Wettervolumenstrom des Zweiges **4**, weil dieser vom Wettervolumenstrom des Zweiges **1** abzweigt (siehe Bild 170). Der Wettervolumenstrom des Zweiges **1** ist bei der Berechnung der Masche **II** bereits ermittelt worden (Spalte 11, Zeile 5), ebenso der Wettervolumenstrom des Zweiges **4** (Spalte 14, Zeile 10). Rechnerisch ergibt sich für den Zweig **2** der Wert **140 m³/s** (Spalte 7, Zeile 15).

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **4**, **6**, **5** und **2** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 12 bis 15 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 16 eingetragen und hat den Wert **124,3953 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 12 bis 15 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 16 eingetragen und hat den Wert **14,185**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 16 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 16). Das Berichtigungsglied für die Masche **III** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 12. In der Spalte 11, Zeilen 12 bis 15 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **4**, **6**, **5** und **2** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 12 bis 15.

Erster Iterationsschritt, Masche IV:

Die Masche **IV** besteht aus den Wetterzweigen **8**, **12**, **11**, **9** und **6**. Der Wetterweg **6** ist identisch mit dem Zweig **6** aus der Masche **III**. Ebenso ist der Wetterweg **8** identisch mit dem Zweig **8** aus der Masche **II**.

In der Masche **IV** werden die Strömungsrichtungen im Uhrzeigersinn mit einem positiven Vorzeichen bestimmt; daher hat der Wetterzweig **8** in der Masche **IV** das Vorzeichen „+1“ (Spalte 4, Zeile 17 in der Tabelle 11). Die Zweige **12**, **11**, **9** und **6** haben ein negatives Vorzeichen (Spalte 4, Zeilen 18 bis 21 in der Tabelle 11), da deren angenommene Wetterrichtungen innerhalb der Masche **IV** gegen den Uhrzeigersinn verlaufen.

Die in der Spalte 3 eingangs zu schätzenden Wettervolumenströme beschränken sich innerhalb der Masche **IV** auf die Wetterzweige **11** und **12**. Die beiden Zweige **11** und **12** sind unmittelbar in Reihe geschaltet; daher ist der Wettervolumenstrom **11** identisch mit dem Wettervolumenstrom **12**. Dieser Wettervolumenstrom wird mit **200 m³/s** (Spalte 3, Zeile 18) angenommen.

In der Spalte 6 sind die Wetterwiderstände der einzelnen Wetterzweige angegeben. Der Zweig **8** muss zwangsläufig den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **II** verwendet wurde. Außerdem muss der Zweig **6** den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **III** verwendet wurde. Die übrigen Widerstandswerte wurden in Abhängigkeit von ihren Querschnittsflächen sowie ihren Längen mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen ermittelt.

Der Zweig **8** ist identisch mit dem Zweig **8** aus der Masche **II**. Daher wird der Wettervolumenstrom aus der Spalte 11, Zeile 9 in die Spalte 7, Zeile 17 übernommen. Ebenso ist der Zweig **6** identisch mit dem Zweig **6** aus der Masche **III**. Daher wird der Wettervolumenstrom aus der Spalte 11, Zeile 13 in die Spalte 7, Zeile 21 übernommen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **12** kann zunächst nicht aus bereits bekannten Werten ermittelt werden. Daher ist es erforderlich, den in Spalte 3, Zeile 18 eingetragenen Schätzwert in die Spalte 7, Zeile 18 zu übernehmen. Da der Wettervolumenstrom des Zweiges **11** identisch mit dem Wettervolumenstrom des Zweiges **12** ist, wird ebenfalls der in Spalte 3, Zeile 18 eingetragene Schätzwert in die Spalte 7, Zeile 19 übernommen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **9** ist gleich der Summe der Wettervolumenströme der Zweige **5** und **6**, weil diese beiden Wettervolumenströme zusammenfließen (siehe Bild 170).

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **8**, **12**, **11**, **9** und **6** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 17 bis 21 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 22 eingetragen und hat den Wert **1472,2349 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 17 bis 21 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 11, Zeile 26 eingetragen und hat den Wert **636,047**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 22 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 22). Das Berichtigungsglied für die Masche **IV** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 18. In der Spalte 11, Zeilen 17 bis 21 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **8**, **12**, **11**, **9** und **6** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 17 bis 21.

Erster Iterationsschritt, Masche V:

Die Masche **V** besteht aus den Wetterzweigen **5**, **9**, **10**, **7** und **3**. Der Wetterweg **5** ist identisch mit dem Zweig **5** aus der Masche **III**. Ebenso ist der Wetterweg **9** identisch mit dem Zweig **9** aus der Masche **IV**.

In der Masche **V** wird die Strömungsrichtung im Uhrzeigersinn mit einem positiven Vorzeichen bestimmt; daher haben die Wetterzweige **5** und **9** in der Masche **V** das Vorzeichen „+1“ (Spalte 4, Zeilen 23 und 24 in der Tabelle 11). Die Zweige **10**, **7** und **3** haben ein negatives Vorzeichen (Spalte 4, Zeilen 25 bis 27 in der Tabelle 11), da deren angenommene Wetterrichtungen innerhalb der Masche **V** gegen den Uhrzeigersinn verlaufen.

Innerhalb der Masche **V** ist es nicht mehr erforderlich, in der Spalte 3 Wettervolumenströme zu schätzen.

In der Spalte 6 sind die Wetterwiderstände der einzelnen Wetterzweige angegeben. Der Zweig **5** muss zwangsläufig den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **III** verwendet wurde. Außerdem muss der Zweig **9** den gleichen Widerstandswert haben, wie er bereits oben bei der Berechnung innerhalb der Masche **IV** verwendet wurde. Die übrigen Widerstandswerte wurden in Abhängigkeit von ihren Querschnittsflächen sowie ihren Längen mit Hilfe von Diagrammen oder Tabellen ermittelt. Der relativ hohe Wetterwiderstand des Zweiges **10** weist darauf hin, dass es sich hierbei um einen Streb mit Schildausbau von 238 m Länge und einer gebauten Flözmächtigkeit von etwa **M = 1,1 m** handelt (siehe Bild 154).

Der Zweig **5** ist identisch mit dem Zweig **5** aus der Masche **III**. Daher wird der Wettervolumenstrom aus der Spalte 11, Zeile 14 in die Spalte 7, Zeile 23 übernommen. Ebenso ist der Zweig **9** identisch mit dem Zweig **9** aus der Masche **IV**. Daher wird der Wettervolumenstrom aus der Spalte 11, Zeile 20 in die Spalte 7, Zeile 24 übernommen. Der Wettervolumenstrom des Zweiges **3** ist gleich dem Wettervolumenstrom des Zweigs **2** vermindert um den Wettervolumenstrom des Zweigs **5**, weil dieser Wettervolumenstrom vom Wettervolumenstrom **2** abzweigt (siehe Bild 170). Daher wird in die Spalte 7, Zeile 27 der Wettervolumenstrom **90 m³/s** eingetragen. Da der Wettervolumenstrom des Zweiges **3** identisch mit dem Wettervolumenstrom des Zweiges **7** und ebenso mit dem Wettervolumenstrom des Zweiges **10** ist (Reihenschaltung), wird dieser Wert **90 m³/s** ebenfalls der in Spalte 7, Zeilen 25 und 26 eingetragen.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **5**, **9**, **10**, **7** und **3** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 23 bis 27 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 28 eingetragen und hat den Wert **-3742,7951 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 23 bis 27 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 28 eingetragen und hat den Wert **110,088**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 28 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 28. Das Berichtigungsglied für die Masche **V** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 24. In der Spalte 11, Zeilen 23 bis 27 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **5**, **9**, **10**, **7** und **3** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 23 bis 27.

Damit ist der erste Iterationsschritt für die fünf Maschen unseres Wettermodells fertig gestellt. Zur Programmierung dieses Berechnungsablaufs mit seinen immer wiederkehrenden Algorithmen eignet sich ein Tabellenkalkulationsprogramm. Es lassen sich dabei leicht Teile der Tabelle kopieren und neben der vorigen Tabelle wieder einfügen.

Zweiter Iterationsschritt:

Wir beginnen nun mit dem zweiten Iterationsschritt. Dazu stellen wir erneut eine Tabelle auf (Tabelle 12), wie wir sie bereits aus der Tabelle 11 kennen. In der neuen Tabelle benötigen wir nicht mehr die Werte in Spalte 3 mit den geschätzten Wettervolumenströmen, weil wir nun alle Wettervolumenströme aus bereits zuvor ermittelten Werten ableiten können. Die in der Tabelle 11 gewählten Vorzeichen bleiben erhalten, ebenso die geschätzte Druckerzeugung des Ventilators und alle Widerstandswerte. Bis auf die Spalte 3 können somit die ersten sechs Spalten von der Tabelle 11 in die Tabelle 12 identisch übertragen werden.

Zweiter Iterationsschritt, Masche I:

Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **15** kann als Summe der Wettervolumenströme der Zweige **13** und **14** (Tabelle 11, Spalte 11, Zeilen 7 und 8) gebildet werden. Dieser Summenwert von **197,727 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 1 eingetragen. Im imaginären Zweig **02** und im Zweig **15** fließt derselbe Wettervolumenstrom. Daher wird der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **02** genau wie der Zweig 15 als Summe der Wettervolumenströme der Zweige **13** und **14** (Tabelle 11, Spalte 11, Zeilen 7 und 8) gebildet. Auch hierbei ergibt der Summenwert **197,727 m³/s**. Er wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 2 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **14** kann unmittelbar aus der Tabelle 11, Spalte 11, Zeile 7 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 3 eingetragen werden.

Der Wert der Druckerzeugung des Ventilators wird aus der Tabelle 12, Spalte 5, Zeile 1 übernommen, mit dem Vorzeichenfaktor „-1“ (Spalte 4, Zeile 1) multipliziert und in die Spalte 8, Zeile 1 eingetragen. Die Druckverbräuche der Wetterzweige **02** und **14** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 2 und 3 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 4 eingetragen und hat den Wert **-897,3121 Pa**.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumen- strom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m ³ /s	Vorzeichen- faktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta P_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetter- widerstand R kg/m7	ermittelter Volumen- strom \dot{V} m ³ /s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^n R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrr.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m ³ /s
1	15	I		-1	-3000	0,0000	197,727	3000	0	$-897,3121 \div 925,964 = -0,9691$	196,7582
2	02	I		-1		0,0000	197,727	0	0		196,7582
3	14	I		-1		55,0000	8,4179	-3897,3121	925,9636		7,4488
4								$\Sigma = -897,3121$	$\Sigma = 925,964$		
5	1	II		-1		0,0060	189,309	-215,0283	2,2717	$464,2134 \div 1295,67 = 0,3583$	189,6677
6	01	II		-1		0,0000	189,309	0	0		189,6677
7	14	II		1		55,0000	7,4488	3051,6490	819,3673		7,0905
8	13	II		-1		0,0180	189,309	-645,0850	6,8151		189,6677
9	8	II		-1		33,0000	6,9948	-1614,5783	461,6539		7,3530
10	4	II		-1		0,0686	40,5401	-112,7440	5,5621		40,8984
11								$\Sigma = 464,2134$	$\Sigma = 1295,67$		
12	4	III		1		0,0686	40,8984	114,7456	5,6113	$-160,4134 \div 15,3848 = -10,4267$	51,3251
13	6	III		1		0,0450	33,5453	50,6380	3,0191		43,9720
14	5	III		-1		0,0340	92,7677	-292,5985	6,3082		82,3409
15	2	III		-1		0,0015	148,769	-33,1985	0,4463		138,3426
16								$\Sigma = -160,4134$	$\Sigma = 15,3848$		
17	8	IV		1		33,0000	7,3530	1784,2159	485,3004	$79,6587 \div 511,216 = 0,1558$	7,1972
18	12	IV		-1		0,0045	182,315	-149,5739	1,6408		182,4705
19	11	IV		-1		0,0181	182,315	-601,6193	6,5998		182,4705
20	9	IV		-1		0,0543	126,313	-866,3547	13,7176		126,4688
21	6	IV		-1		0,0450	43,9720	-87,0093	3,9575		44,1279
22								$\Sigma = 79,6587$	$\Sigma = 511,216$		
23	5	V		1		0,0340	82,3409	230,5210	5,5992	$-574,7698 \div 79,1099 = -7,2655$	89,6064
24	9	V		1		0,0543	126,468	868,4935	13,7345		133,7343
25	10	V		-1		0,5000	56,0017	-1568,0948	56,0017		48,7362
26	7	V		-1		0,0319	56,0017	-100,0444	3,5729		48,7362
27	3	V		-1		0,0018	56,0017	-5,6451	0,2016		48,7362
28								$\Sigma = -574,7698$	$\Sigma = 79,110$		

Tabelle 12: Zweiter Schritt der Wetternetzrechnung für das Grubengebäude nach Bild 170

In der Spalte 9, Zeilen 1 bis 3 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 4 eingetragen und hat den Wert **925,964**.

Das Berichtigungsglied $\Delta \dot{V}$ entsprechend Gleichung (162) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 4 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 4. Das Berichtigungsglied für die Masche I befindet sich in der Spalte 10, Zeile 2. In der Spalte 11, Zeilen 1 bis 3 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **15**, **02** und **14** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 1 bis 3.

Zweiter Iterationsschritt, Masche II:

Der Wettervolumenstrom des imaginären Wetterzweiges **01** kann aus der Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **02** und **14** errechnet werden. Die am aktuellsten berechneten Werte hierfür finden wir in der Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 2 und 3. Die Differenz ergibt den Wert **189,309 m³/s**, den wir in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 6 eintragen. Im Zweig **01** und im Zweig **1** fließt derselbe Wettervolumenstrom. Daher wird der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **1** genau wie der Zweig **01** als Differenz der Wettervolumenströme der Zweige **02** und **14** (Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 2 und 3) gebildet. Auch hierbei ergibt der Summenwert **189,309 m³/s**. Er wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 5 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **14** kann unmittelbar aus der Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 3 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 7 eingetragen werden. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **13** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **15** und **14** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 1 und 3 bestimmt werden. Diese Differenz von **189,309 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 8 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **8** kann aus der Tabelle 11, Spalte 11, Zeile 17 übernommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 9 eingetragen werden. Sein Wert beträgt **6,9948 m³/s**. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **4**

kann als Summe der beiden Wettervolumenströme der Zweige **8** und **6** aus der Tabelle 11, Spalte 11, Zeilen 17 und 21 errechnet werden. Diese Summe beträgt **40,5401 m³/s** und wird in Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 10 eingetragen.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **1**, **01**, **14,13**, **8** und **4** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 5 bis 10 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 11 eingetragen und hat den Wert **464,2134 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 5 bis 10 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 11 eingetragen und hat den Wert **1295,67**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 11 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 11). Das Berichtigungsglied für die Masche **II** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 6. In der Spalte 11, Zeilen 5 bis 10 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **1**, **01**, **14,13**, **8** und **4** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 5 bis 10.

Zweiter Iterationsschritt, Masche III:

Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **4** kann als aktueller Werte unmittelbar aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 10 übernommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 12 übertragen werden. Sein Wert beträgt **40,8984 m³/s**. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **6** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **4** und **8** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 10 und 9 bestimmt werden. Diese Differenz von **33,5453 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 13 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **5** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **9** und **6** mit Hilfe der Werte aus Tabelle 11, Spalte 11, Zeilen 24 und 21 bestimmt werden. Diese Differenz von **92,7677 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 14 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **2** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **1** und **4** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 5 und 10 bestimmt werden. Diese Differenz von **148,769 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 15 eingetragen.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **4**, **6**, **5** und **2** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 12 bis 15 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 16 eingetragen und hat den Wert **-160,4134 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 12 bis 15 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 16 eingetragen und hat den Wert **15,3848**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 16 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 16). Das Berichtigungsglied für die Masche **III** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 13. In der Spalte 11, Zeilen 12 bis 15 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **4**, **6**, **5** und **2** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 12 bis 15.

Zweiter Iterationsschritt, Masche IV:

Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **8** kann unmittelbar aus der Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 9 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 17 eingetragen werden. Er beträgt **7,3530 m³/s**. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **12** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **13** und **8** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 8 und 9 bestimmt werden. Diese Differenz von **182,315 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 18 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **11** kann als Summe der Wettervolumenströme der Zweige **9** und **10** (Tabelle 11, Spalte 11, Zei-

len 24 und 25) gebildet werden. Dieser Summenwert von **182,315 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 19 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **9** kann als Summe der Wettervolumenströme der Zweige **5** und **6** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 14 und 13 gebildet werden. Diese Summe von **126,313 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 20 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **6** kann unmittelbar aus der Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 13 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 21 eingetragen werden. Der Wert beträgt **43,9720 m³/s**.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **8**, **12**, **11**, **9** und **6** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 17 bis 21 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 22 eingetragen und hat den Wert **79,6587 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 17 bis 21 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 22 eingetragen und hat den Wert **511,216**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 22 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 22). Das Berichtigungsglied für die Masche **IV** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 17. In der Spalte 11, Zeilen 17 bis 21 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **8**, **12**, **11**, **9** und **6** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 17 bis 21.

Zweiter Iterationsschritt, Masche V:

Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **5** kann unmittelbar aus der Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 14 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 23 eingetragen werden. Er beträgt **82,3409 m³/s**. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **9** kann unmittelbar aus der Tabelle 12, Spalte 11, Zeile 20 entnommen und in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 24 eingetragen werden. Dieser Wert beträgt **126,468 m³/s**. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **10** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **11** und **9** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 19 und 20 bestimmt werden. Dieser Wert von **56,0017 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 25 eingetragen. Im Zweig **7** und im Zweig **10** fließt derselbe Wettervolumenstrom. Daher wird der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **7** genau wie der des Zweigs **10** als Differenz der Wettervolumenströme der Zweige **11** und **9** (Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 19 und 20) gebildet. Auch hierbei ergibt die Differenz **56,0017 m³/s**. Dieser Wert wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 26 eingetragen. Der Wettervolumenstrom des Wetterzweiges **3** kann als Differenz der beiden Wettervolumenströme der Zweige **2** und **5** mit Hilfe der aktuellen Werte aus Tabelle 12, Spalte 11, Zeilen 15 und 14 bestimmt werden. Dieser Wert von **56,0017 m³/s** wird in die Tabelle 12, Spalte 7, Zeile 27 eingetragen.

Die Druckverbräuche der Wetterzweige **5**, **9**, **10**, **7** und **3** werden nach Gleichung (164) berechnet und in die Spalte 8, Zeilen 23 bis 27 eingetragen. Die Summe dieser Druckverbräuche wird in Spalte 8, Zeile 28 eingetragen und hat den Wert **-574,7698 Pa**.

In der Spalte 9, Zeilen 23 bis 27 befinden sich Werte entsprechend der Beziehung (166). Die Summe dieser Werte wird in Spalte 9, Zeile 28 eingetragen und hat den Wert **79,110**.

Das Berichtigungsglied ΔV (Gleichung (162)) errechnet sich durch Division des Wertes aus Spalte 8, Zeile 28 durch den Wert aus Spalte 9, Zeile 28. Das Berichtigungsglied für die Masche **V** befindet sich in der Spalte 10, Zeile 24. In der Spalte 11, Zeilen 23 bis 27 müssen nun noch die jeweiligen korrigierten Wettervolumenströme nach Gleichung (163) berechnet werden. Diese korrigierten Wettervolumenströme für die Zweige **5**, **9**, **10**, **7** und **3** befinden sich in der Spalte 11, Zeilen 23 bis 27.

Weitere Iterationsschritte

Damit ist auch der zweite Iterationsschritt für die fünf Maschen unseres Wettermodells fertig gestellt. Bei der Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms muss nur noch im weiteren Verlauf die Tabelle 12 kopiert werden und nebeneinander oder untereinander in das Tabellenkalkulationsprogramm eingefügt werden. Jedes Einfügen bedeutet einen weiteren Iterationsschritt. Da die Rechenzeit moderner elektronischer Rechner nicht mehr ins Gewicht fällt, sollte zugunsten einer hohen Genauigkeit am Ende des Ergebnisses die Anzahl der Iterationsschritte nicht zu knapp bemessen sein.

In unserem konkreten Beispiel mit den eingangs vorgenommenen Volumenstrom-Schätzwerten (Tabelle 11, Spalte 3) würde beispielsweise nach 60 Iterationsschritten der Fehler bei der Berechnung der Wettervolumenströme etwa 0,5% der tatsächlichen Wettervolumenströme betragen. Der Fehler bei der Berechnung der Druckverbräuche würde im Mittel der errechneten Werte etwa 1% der tatsächlichen Druckverbräuche betragen.

Nach 120 Iterationsschritten beträgt beispielsweise der Fehler bei der Berechnung der Wettervolumenströme weniger als 0,13% der tatsächlichen Wettervolumenströme. Der Fehler bei der Berechnung der Druckverbräuche beträgt etwa 0,25% der tatsächlichen Druckverbräuche.

Nach 180 Iterationsschritten beträgt der Fehler bei der Berechnung der Wettervolumenströme etwas mehr als 0,03% der tatsächlichen Wettervolumenströme. Der Fehler bei der Berechnung der Druckverbräuche beträgt etwas mehr als 0,06% der tatsächlichen Druckverbräuche.

Nach 240 Iterationsschritten beträgt der Fehler bei der Berechnung der Wettervolumenströme etwas weniger als 0,008% der tatsächlichen Wettervolumenströme. Der Fehler bei der Berechnung der Druckverbräuche beträgt etwas mehr als 0,015% der tatsächlichen Druckverbräuche.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumen- strom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m³/s	Vorzeichen- faktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta p_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetter- widerstand R kg/m7	ermittelter Volumen- strom \dot{V} m³/s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^Z A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^Z R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrt.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m³/s
1	15	I		-1	-3000	0,0000	200,931	3000	0	0,00049 ÷ 812,4038 = 0	200,9308
2	02	I		-1		0,0000	200,931	0	0		200,9308
3	14	I		-1		55,0000	7,3855	-2999,9995	812,4038		7,3855
4								Σ = 0,0005	Σ = 812,404		
5	1	II		-1		0,0060	193,545	-224,7588	2,3225	0,0008 ÷ 1329,5647 = 0	193,5453
6	01	II		-1		0,0000	193,545	0	0		193,5453
7	14	II		1		55,0000	7,3855	3000,0000	812,4038		7,3855
8	13	II		-1		0,0180	193,545	-674,2763	6,9676		193,5453
9	8	II		-1		33,0000	7,5816	-1896,8738	500,3872		7,5816
10	4	II		-1		0,0686	54,5443	-204,0904	7,4835		54,5443
11								Σ = 0,0008	Σ = 1329,56		
12	4	III		1		0,0686	54,5443	204,0904	7,4835	0,0000 ÷ 18,2355 = 0	54,5443
13	6	III		1		0,0450	46,9627	99,2471	4,2266		46,9627
14	5	III		-1		0,0340	89,8292	-274,3556	6,1084		89,8292
15	2	III		-1		0,0015	139,001	-28,9819	0,4170		139,0010
16								Σ = 0,0000	Σ = 18,2355		
17	8	IV		1		33,0000	7,5816	1896,8740	500,3872	0,0003 ÷ 527,875 = 0	7,5816
18	12	IV		-1		0,0045	185,964	-155,6212	1,6737		185,9637
19	11	IV		-1		0,0181	185,964	-625,9432	6,7319		185,9637
20	9	IV		-1		0,0543	136,792	-1016,0622	14,8556		136,7919
21	6	IV		-1		0,0450	46,9627	-99,2471	4,2266		46,9627
22								Σ = 0,0003	Σ = 527,875		
23	5	V		1		0,0340	89,8292	274,3556	6,1084	0,0000 ÷ 73,4500 =	89,8292
24	9	V		1		0,0543	136,792	1016,0622	14,8556	0	136,792
25	10	V		-1		0,5000	49,1719	-1208,9355	49,1719		49,1719
26	7	V		-1		0,0319	49,1719	-77,1301	3,1372		49,1719
27	3	V		-1		0,0018	49,1719	-4,3522	0,1770		49,1719
28								Σ = 0,0000	Σ = 73,4500		

Tabelle 13: 510. Iterationsschritt der Wetternetz berechnung für das Grubengebäude nach Bild 170

In der Tabelle 13 ist das Ergebnis der Wetternetzrechnung nach 510 Iterationsschritten dargestellt. Das Ergebnis ist sehr genau, da die Summe der Druckverbräuche beziehungsweise der Druckerzeugungen innerhalb einer Masche im ungünstigsten Fall – hier innerhalb der Masche II – lediglich den äußerst geringen Wert von $\Sigma \Delta p = 0,0008 \text{ Pa}$ hat (Tabelle 13, Spalte 8, Zeile 11). Wir erinnern uns, dass nach der Maschenregel die Summe der Druckverbräuche beziehungsweise der Druckerzeugungen innerhalb einer Masche „Null“ betragen muss. Das „ungünstigste“ Berichtigungsglied – hier innerhalb der Masche I – hat lediglich den äußerst geringen Wert von $\Delta \dot{V} = 5,98 \cdot 10^{-7}$ (Tabelle 13, Spalte 11, Zeile 1). Daraus erkennt man, dass sich die korrigierten Wettervolumenströme kaum noch von einem Iterationsschritt zum nächsten verändern.

Berücksichtigung des verwendeten Ventilators:

Unser Berechnungsverfahren ist an dieser Stelle jedoch noch keineswegs zu Ende. Wie sich der aufmerksame Leser erinnern mag, haben wir zu Beginn unserer Berechnung dem Hauptgrubenventilator einen willkürlich gewählten Wert für seine Druckerzeugung zugeordnet. Als nächste Maßnahme müssen wir im Folgenden die Eigenschaften des tatsächlich verwendeten Hauptgrubenventilators berücksichtigen. Dazu kommen wir jedoch etwas später.

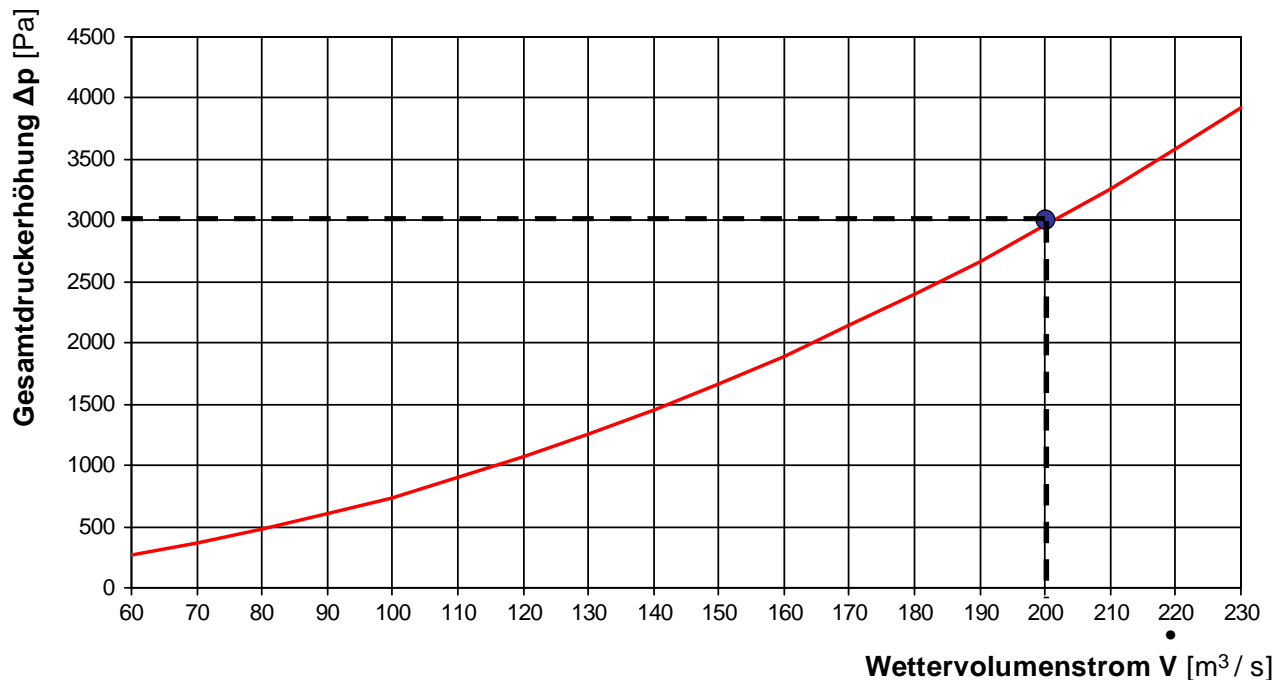


Bild 171: Äquivalente Grubenweite des Wettermodells aus Bild 170

Die bisher durchgeführte Berechnung erlaubt es uns, die äquivalente Grubenweite unseres Wettermodells (Bild 170) zu ermitteln. Die entsprechende Gleichung (83) lautet

$$A = 1 / (\alpha \cdot \varepsilon) \cdot \{ \rho / (2 \cdot \Delta p) \}^{1/2} \cdot \dot{V}$$

mit $\alpha = 0,65$, $\varepsilon = 1,0$ und $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$. Aus Tabelle 13 können der Wettervolumenstrom $\dot{V} = 200,93 \text{ m}^3/\text{s}$ (Spalte 11, Zeile 1) sowie die Druckerzeugung des Hauptgrubenventilators $\Delta p = 3000 \text{ Pa}$ (Spalte 8, Zeile 1) entnommen werden. Mit diesen Werten erhält man aus der Gleichung (83) für dieses konkrete Wettermodell $A = 4,372 \text{ m}^3$ als äquivalente Grubenweite.

Formt man die Gleichung (83) um, erhält man Δp als Funktion von \dot{V} sowie in Abhängigkeit von der die äquivalenten Grubenweite A .

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \dot{V}^2}{2 \cdot (\alpha \cdot \varepsilon \cdot A)^2}$$

Im Bild 171 ist die Systemkennlinie für die äquivalente Grubenweite $A = 4,372 \text{ m}^3$ entsprechend dieser Gleichung dargestellt. Das Wertepaar aus dem errechneten Wettervolumenstrom $\dot{V} = 200,93 \text{ m}^3/\text{s}$ sowie aus der Druckerzeugung des Ventilators $\Delta p = 3000 \text{ Pa}$ ist als Punkt im Diagramm (Bild 171) besonders hervorgehoben. Selbstverständlich muss die Systemkennlinie exakt durch diesen Punkt laufen.

Um jedoch zu wissen, welcher Punkt auf dieser Systemkennlinie im Zusammenwirken mit dem real verwendeten Hauptgrubenventilator auch der definitive Ventilatorbetriebspunkt ist, muss die Systemkennlinie des Modell-Grubengebäudes mit der Kennlinie des Hauptgrubenventilators übereinander gelegt werden (Bild 172). Der Schnittpunkt beider Kennlinien ist der Ventilatorbetriebspunkt. Dieser Schnittpunkt liegt bei einer Druckerzeugung $\Delta p = 2673 \text{ Pa}$.

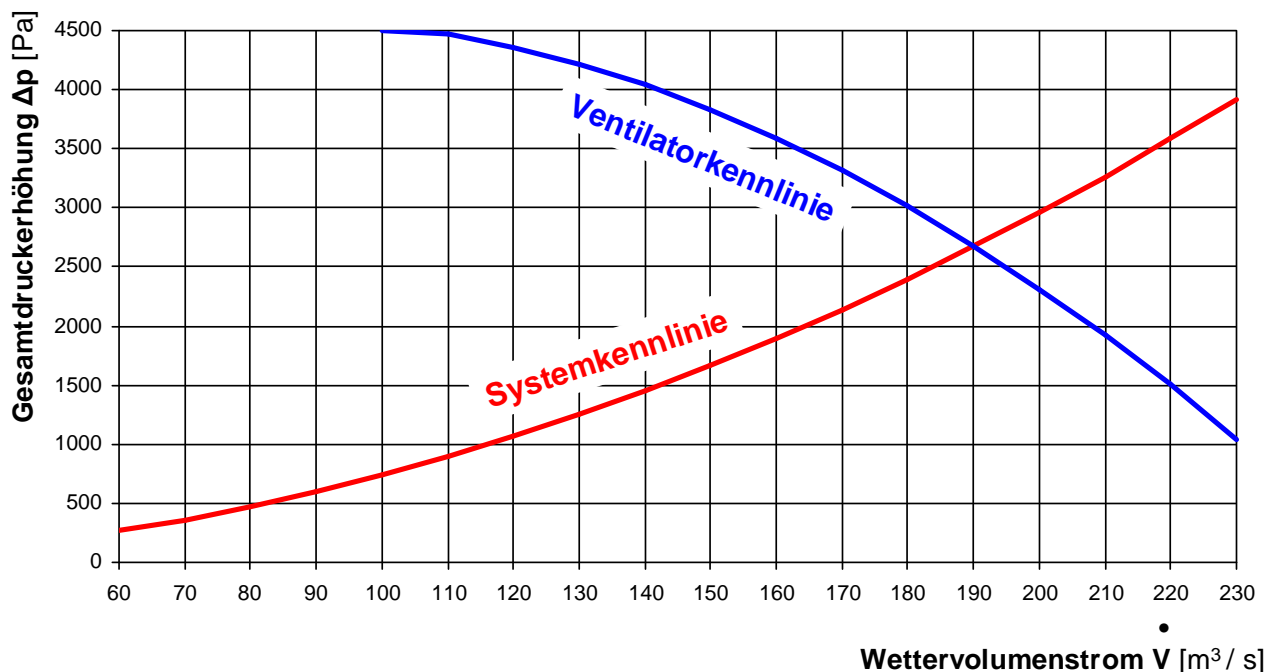


Bild 172: Systemkennlinie des Wettermodells aus Bild 170 (rot) und Kennlinie des Hauptgrubenventilators (blau)

Schließlich müssen wir die Wetternetz-berechnung noch ein letztes Mal neu starten, indem wir für den ersten Iterationsschritt in die Spalte 5, Zeile 1 der neuen Tabelle die soeben erhaltene Druckerzeugung des Ventilators einsetzen – wie üblich wegen der Druckerzeugung mit negativem Wert „-2673“. Alle übrigen Eingabewerte aus der anfänglichen Wetternetz-berechnung bleiben bestehen. Das Ergebnis dieser Wetternetz-berechnung nach 510 Iterationsschritten ist im Bild 173 dargestellt, wobei an jedem einzelnen Wetterzweig der entsprechende Wettervolumenstrom sowie der Druckverlust beziehungsweise die Druckerzeugung angegeben sind.

Der vom Hauptgrubenventilator erzeugte Wettervolumenstrom \dot{V} beträgt gemäß der Wetternetz-berechnung $189,66 \text{ m}^3/\text{s}$. Dieser Wert kann auch bereits aus dem Bild 172 als Ventilatorbetriebspunkt (Schnittpunkt der Systemkennlinie des Wettermodells mit der Kennlinie des Hauptgrubenventilators) abgelesen werden.

Man erkennt obendrein, dass die anfangs gewählten Strömungsrichtungen zutreffend waren, weil die korrigierten Wettervolumenströme alle mit einem positiven Vorzeichen versehen sind. Wäre eine oder mehrere Strömungsrichtungen falsch gewählt worden, wären im Ergeb-

nis der korrigierten Wettervolumenströme die entsprechenden Werte mit einem negativen Vorzeichen versehen worden.

Weil im Bild 173 die Wettervolumenströme mit zwei Stellen hinter dem Komma angegeben sind, können sich daraus in einzelnen Fällen Rundungsfehler ergeben.

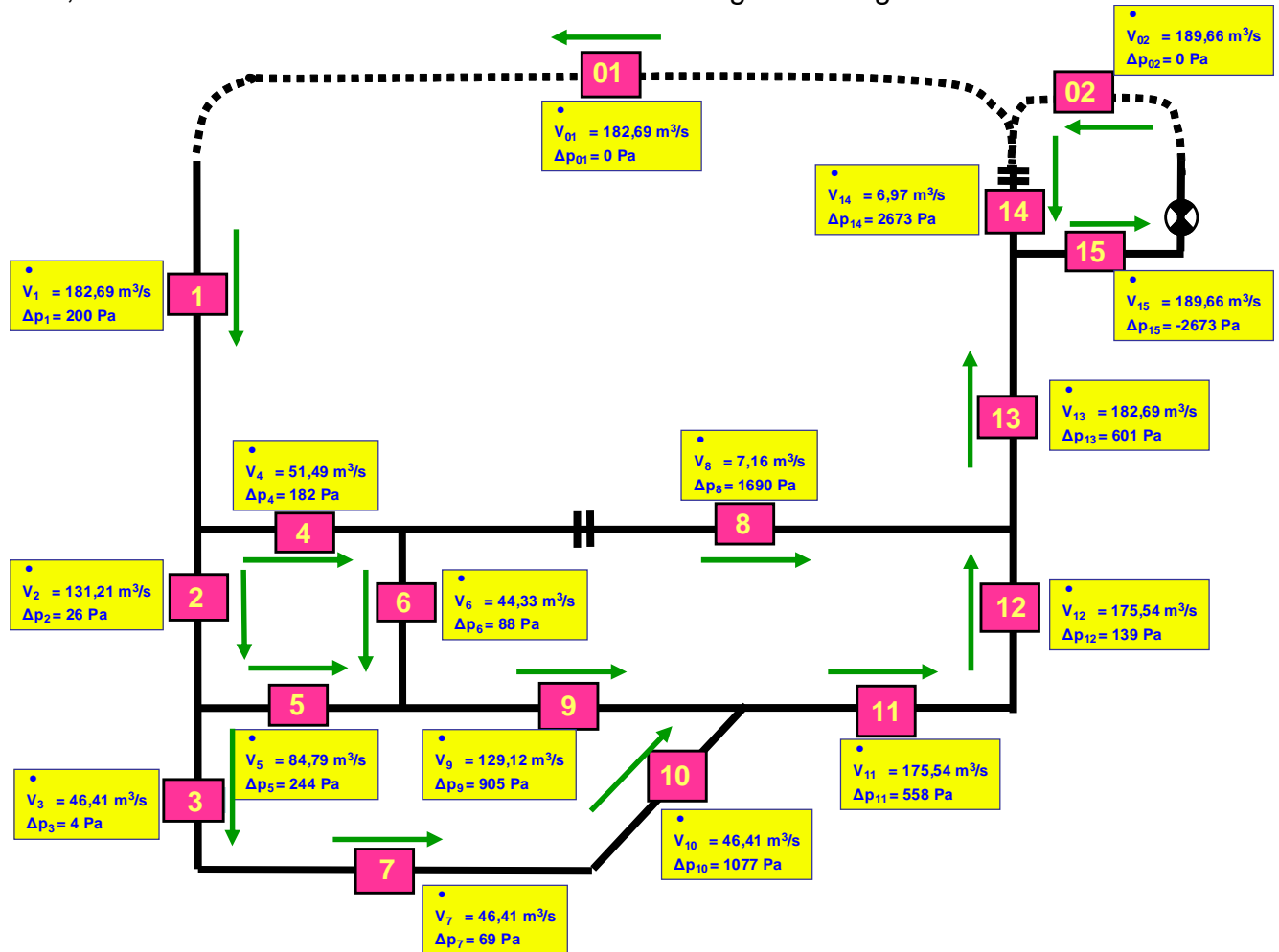


Bild 173: Ergebnis der Wetternetzberechnung eines Modell-Grubengebäudes unter Berücksichtigung einer gegebenen Ventilator Kennlinie

Im Bild 174 sind abschließend die Ortsdruckverläufe entlang der unterschiedlichen Wegabschnitte vom Einziehschacht bis zum Ausblasende des Wetterkanals hinter dem Hauptgrubenventilator abgebildet.

Die jeweiligen Ortsdrücke sind die aufaddierten Druckverluste in den hintereinander angeordneten Wetterwegen. Entlang der Wegabschnitte 1 – 4 – 8 – 13 muss vor dem Ventilator der Ortsdruck, also der Unterdruck gegenüber der Atmosphäre von $\Delta p = 2673 \text{ Pa}$ betragen. Ebenso müssen die aufaddierten Druckverluste entlang der Wegabschnitte 1 – 2 – 5 – 9 – 11 – 12 – 13 einen Ortsdruck beziehungsweise einen Unterdruck gegenüber der Atmosphäre von $\Delta p = 2673 \text{ Pa}$ ergeben. Das gleiche gilt für die Wetterwege entlang der Knotenpunkte 1 – 2 – 3 – 7 – 10 – 11 – 12 – 13. Die Summe dieser Druckverluste muss andererseits vom Hauptgrubenventilator entlang des Wetterwegabschnittes 15 mit exakt derselben Druckerzeugung $\Delta p = -2673 \text{ Pa}$ erzeugt werden, so dass hinter dem Hauptgrubenventilator der Ortsdruck an der Tagesoberfläche beziehungsweise der Unterdruck gegenüber der Atmosphäre von wieder zu Null wird (Bild 174).

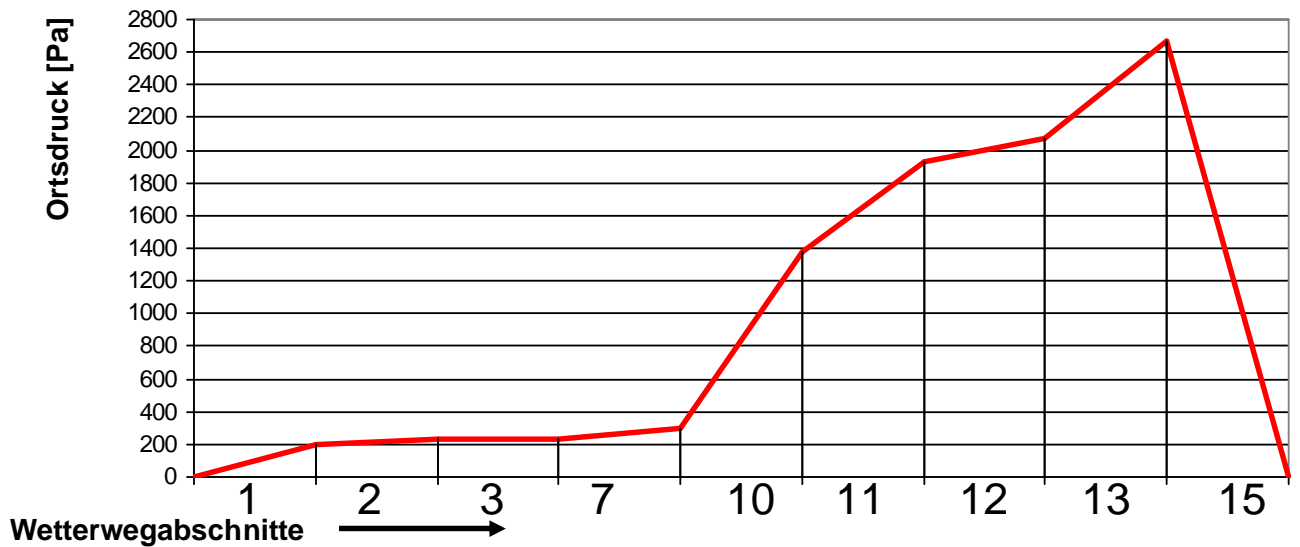
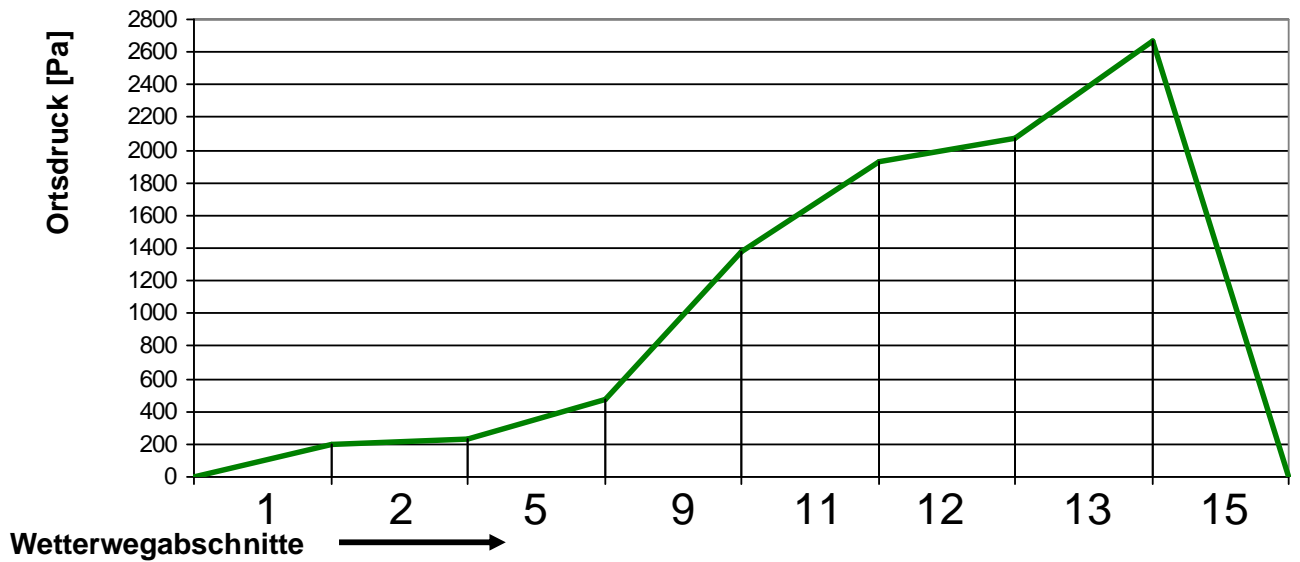
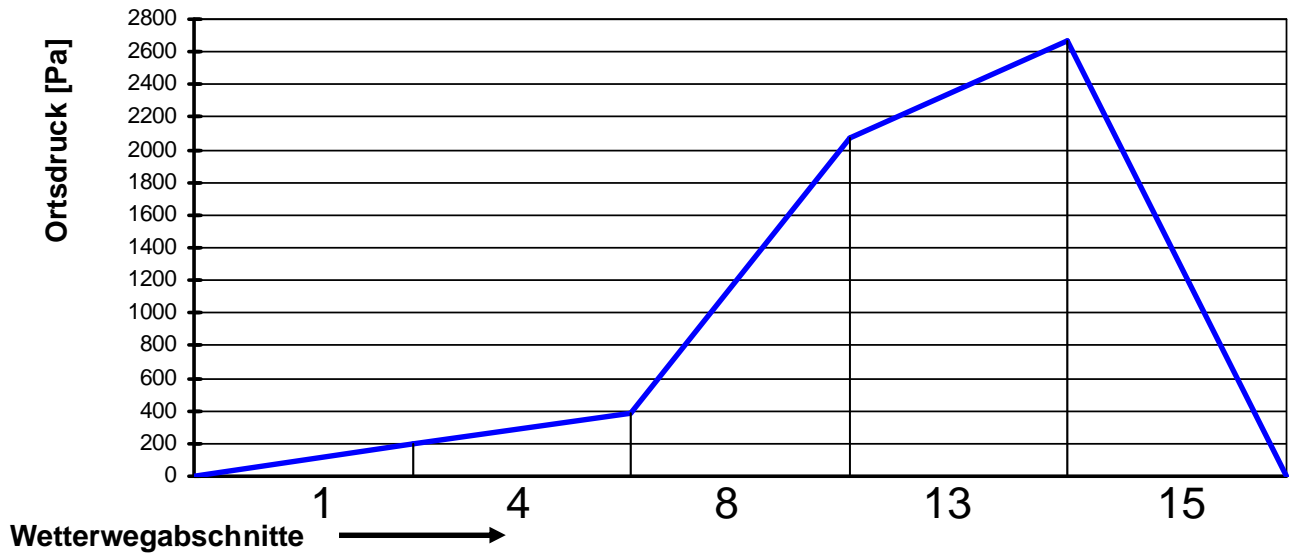


Bild 174: Verlauf der Ortsdrücke des Wettermodells aus Bild 170 entlang der unterschiedlichen Wegabschnitte vom Einziehschacht bis hinter dem Hauptgrubenventilator

7.5.2.1 Berechnung eines inkompressiblen Wetternetzes mit zusätzlicher Druckerzeugung in einem Wetterweg

Das zuvor betrachtete Wettermodell soll im Folgenden dahingehend manipuliert werden, dass versucht werden soll, die Wetterrichtung im abwärts bewetterten Blindschacht (Wetterweg 6), umzudrehen. Dabei sollen alle übrigen Wetterwege des Wettermodells mit ausreichenden Wettervolumenströmen versorgt werden. Als Lösung dieses Problems wird in den Blindschacht eine zusätzliche Druckquelle in Form eines Zusatzventilators eingebracht. Um eine Wetterumkehr im Wetterweg 4 (und somit einen Wetterteilkreislauf im Bereich der Wetterwege 4 – 2 – 5 – 6) zu vermeiden, wird der ursprünglich sehr hohe Wetterwiderstand im Wetterweg 8 auf $R = 1,5 \text{ kg/m}^7$ vermindert (Bild 175). Das wird in der Praxis so bewerkstelligt, indem man das darin befindliche Wetterbauwerk etwas undichter als vorher gestaltet.

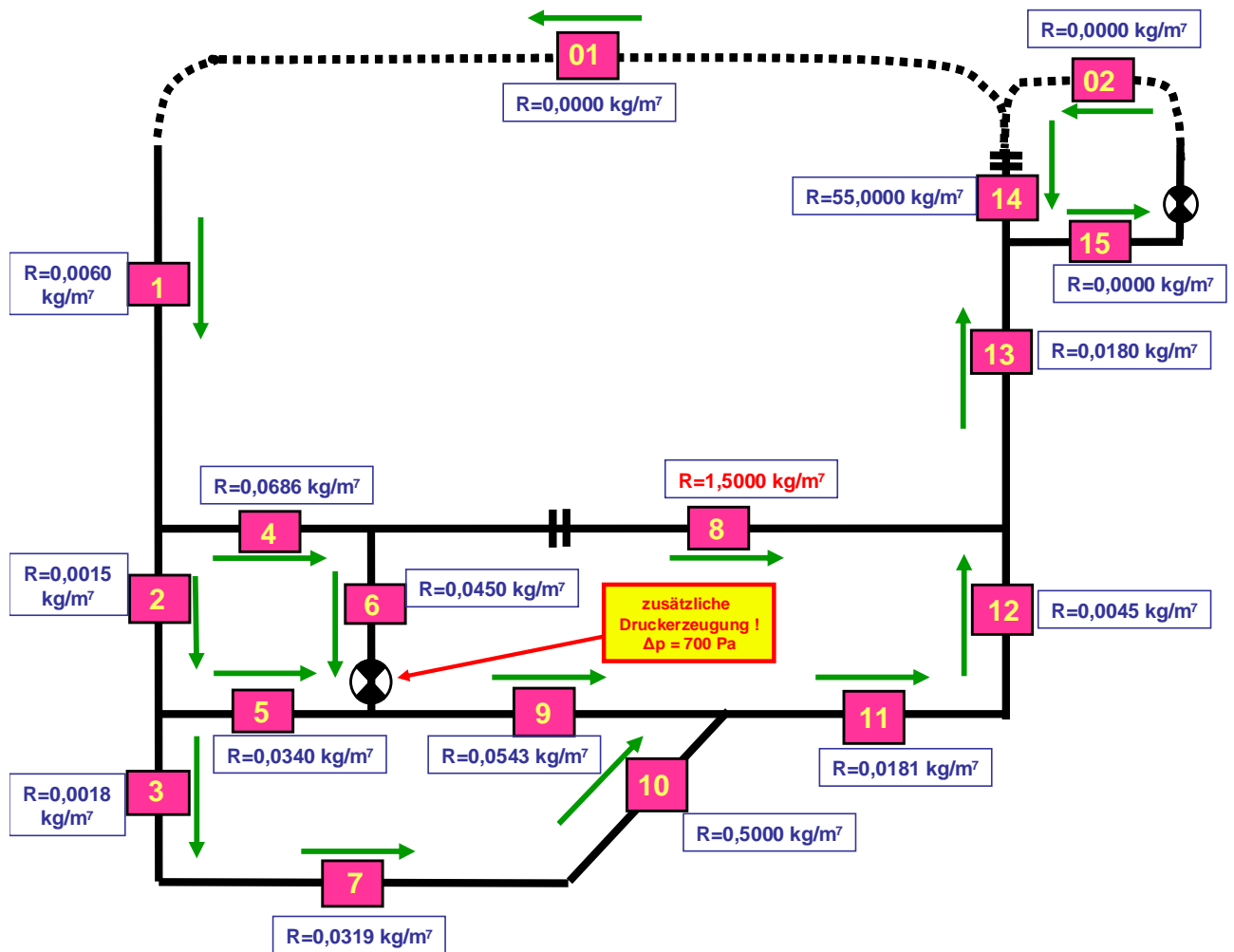


Bild 175: Schematische Darstellung eines Wettermodells mit zusätzlicher Druckerzeugung im Wetterweg „6“

Die Berechnung dieses Wettermodells geschieht ähnlich wie beim einfachen Wettermodell, so wie es zuvor im Kapitel 7.5.2 beschrieben wurde (Tabelle 14). Im Wesentlichen werden in den Spalten 1 bis 5 die gleichen Werte wie in der Tabelle 11 eingegeben. Auch die Vorzeichenfaktoren wurden aus der Tabelle 11 identisch übernommen. Lediglich im Zweig 8 wurde der Wetterwiderstand, wie bereits oben erwähnt, auf $R = 1,5 \text{ kg/m}^7$ geändert (Spalte 6, Zeilen 9 und 18). Als geschätzte Druckerzeugung am Hauptgrubenventilator wurde $\Delta p = -2673 \text{ Pa}$ eingegeben. Das ist derjenige Wert, der bei der Berechnung des einfachen Wettermodells (Kapitel 7.5.2) ermittelt wurde.

Beim ersten Schritt der Wetternetzberechnung ist innerhalb des Zweiges 6 eine Druckquelle in Form des zusätzlichen Zweiges 6.1 eingefügt worden (Zeile 14 und Zeile 23). Dies ist in

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumen- strom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m^3/s	Vorzeichen- faktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta p_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetter- widerstand R kg/m^7	ermittelter Volumen- strom \dot{V} m^3/s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^z A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrt.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m^3/s
1	15	I	200	-1	-2673	0,0000	200	2673	0	$-2827 \div 1100 = -2,5700$	197,4300
2	02	I	200	-1		0,0000	200	0	0		197,4300
3	14	I	10	-1		55,0000	10	-5500	1100		7,4300
4								$\Sigma = -2827$	$\Sigma = 1100$		
5	1	II		-1		0,0060	190	-216,6	2,28	$1848,3695 \div 863,28 = 2,1411$	192,1411
6	01	II		-1		0,0000	190	0	0		192,1411
7	14	II		1		55,0000	7,4300	3036,2695	817,3		5,2889
8	13	II		-1		0,0180	190	-649,8	6,84		192,1411
9	8	II	10	-1		1,5000	10	-150	30		12,1411
10	4	II	50	-1		0,0686	50	-171,5	6,86		52,1411
11								$\Sigma = 1848,3695$	$\Sigma = 863,28$		
12	4	III		1		0,0686	52,1411	186,5024	7,1538	$844,1024 \div 14,574 = 57,9193$	-5,7782
13	6	III		1		0,0450	40	72	3,6		-17,9193
14	6.1	III		1	700	0,0000	40	700	0		-17,9193
15	5	III	50	-1		0,0340	50	-85	3,4		107,9193
16	2	III		-1		0,0015	140	-29,4	0,42		197,9193
17								$\Sigma = 844,1024$	$\Sigma = 14,574$		
18	8	IV		1		1,5000	12,1411	221,1095	36,4233	$-1808,271 \div 56,8500 = -31,8077$	43,9488
19	12	IV	200	-1		0,0045	200	-180	1,8		168,1923
20	11	IV		-1		0,0181	200	-724	7,24		168,1923
21	9	IV		-1		0,0543	90	-439,83	9,774		58,1923
22	6	IV		-1		0,0450	-17,919	14,4496	1,6127		-49,7271
23	6.1	IV		-1	700	0,0000	-17,919	-700	0		-49,7271
24								$\Sigma = -1808,271$	$\Sigma = 56,8500$		
25	5	V		1		0,0340	107,919	395,9838	7,3385	$-3743,1079 \div 109,724 = -34,1138$	142,0331
26	9	V		1		0,0543	58,1923	183,8783	6,3197		92,3061
27	10	V		-1		0,5000	90	-4050	90		55,8862
28	7	V		-1		0,0319	90	-258,39	5,742		55,8862
29	3	V		-1		0,0018	90	-14,58	0,324		55,8862
30								$\Sigma = -3743,1079$	$\Sigma = 109,724$		

Tabelle 14: Erster Iterationsschritt der Wetternetzrechnung für das Grubengebäude nach Bild 175

beiden Zeilen erforderlich, da die Zweige 6 bzw. 6.1 Bestandteile der Masche III und der Masche IV sind. Die Vorzeichenfaktoren des Zweiges 6.1 müssen jeweils denen des Zweiges 6 entsprechen, da es sich bei „6.1“ und „6“ im Grunde um ein und denselben Zweig handelt. Der Wetterwiderstand des Zweiges 6.1 beträgt $R = 0 \text{ kg}/\text{m}^7$ (Spalte 6, Zeilen 14 und 23). Als zusätzliche Druckerzeugung wird für die Druckquelle 6.1 in die Spalte 5 (Zeilen 14 und 23) beispielhaft ein Wert von $\Delta p = 700 \text{ Pa}$ eingesetzt. Als Druckquelle ist hier ein positiver Wert anzuwenden, da der zusätzlich erzeugte Druck gegen den Druckverlust bei eigentlicher Abwärtsbewetterung im Zweig 6 aufgebracht werden muss, um die Wetterrichtung in diesem Zweig letztendlich umzukehren.

Der übrige Algorithmus zum Berechnen der Spalten 7 bis 11 in der Tabelle 14 ist identisch mit der Berechnung im Kapitel 7.5.2 (Tabelle 11). Daher wird auf dessen detaillierte Beschreibung verzichtet.

Wir beginnen nun mit dem zweiten Iterationsschritt. Dazu stellen wir erneut eine Tabelle auf (Tabelle 15), wie wir sie bereits aus der Tabelle 14 kennen. In der neuen Tabelle benötigen wir nicht mehr die Werte in Spalte 3 mit den geschätzten Wettervolumenströmen, weil wir nun alle Wettervolumenströme aus bereits zuvor ermittelten Werten ableiten können. Die in der Tabelle 14 gewählten Vorzeichen bleiben erhalten, ebenso die geschätzte Druckerzeugung des Hauptgrubenventilators, die zusätzliche Druckerzeugung im Zweig 6.1 und alle Widerstandswerte. Bis auf die Spalte 3 können somit die ersten sechs Spalten von der Tabelle 14 in die Tabelle 15 identisch übertragen werden.

Auch hier ist der übrige Algorithmus zum Berechnen der Spalten 7 bis 11 in der Tabelle 15 identisch mit der Berechnung im Kapitel 7.5.2 (Tabelle 12), so dass ebenso auf die detaillierte Beschreibung verzichtet wird.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumenstrom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m³/s	Vorzeichenfaktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta p_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetterwiderstand R kg/m7	ermittelter Volumenstrom \dot{V} m³/s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^z A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrt.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m³/s
1	15	I		-1	-2673	0,0000	197,43	2673	0	1134,515 ÷ 1100 = 1,9501	199,3801
2	02	I		-1		0,0000	197,43	0	0		199,3801
3	14	I		-1		55,0000	5,2889	-1538,485	581,7789		7,2390
4								$\Sigma = 1134,515$	$\Sigma = 581,779$		
5	1	II		-1		0,0060	192,141	-221,5092	2,3057	-898,8417 ÷ 938,1497 = -0,9581	191,1830
6	01	II		-1		0,0000	192,141	0	0		191,1830
7	14	II		1		55,0000	7,239	2882,1545	796,2876		8,1971
8	13	II		-1		0,0180	192,141	-664,5276	6,9171		191,1830
9	8	II		-1		1,5000	43,9488	-2897,2498	131,8465		42,9907
10	4	II		-1		0,0686	-5,7782	2,2904	0,7928		-6,7363
11								$\Sigma = -898,8417$	$\Sigma = 938,15$		
12	4	III		1		0,0686	-6,7363	-3,1129	0,9242	-159,0421 ÷ 15,6517 = -10,1613	3,4250
13	6	III		1		0,0450	-49,727	-111,2752	4,4754		-39,5657
14	6.1	III		1	700	0,0000	-49,727	700	0		-39,5657
15	5	III		-1		0,0340	142,033	-685,8959	9,6583		131,8718
16	2	III		-1		0,0015	197,919	-58,7581	0,5938	187,7580	
17								$\Sigma = -159,0421$	$\Sigma = 15,6517$		
18	8	IV		1		1,5000	42,9907	2772,3045	128,9722	1883,7740 ÷ 149,2558 = 12,6211	30,3696
19	12	IV		-1		0,0045	148,192	-98,82427	1,3337		160,8134
20	11	IV		-1		0,0181	148,192	-397,4932	5,3646		160,8134
21	9	IV		-1		0,0543	92,3061	-462,6582	10,0244		104,9272
22	6	IV		-1		0,0450	-39,566	70,4451	3,5609		-26,9446
23	6.1	IV		-1	700	0,0000	-39,566	-700	0		-26,9446
24								$\Sigma = 1883,7740$	$\Sigma = 149,26$		
25	5	V		1		0,0340	131,872	591,2656	8,9673	-477,7957 ÷ 80,0153 = -5,9713	137,8431
26	9	V		1		0,0543	104,927	597,8272	11,3951		110,8985
27	10	V		-1		0,5000	55,8862	-1561,6344	55,8862		49,9149
28	7	V		-1		0,0319	55,8862	-99,6323	3,5655		49,9149
29	3	V		-1		0,0018	55,8862	-5,6219	0,2012		49,9149
30								$\Sigma = -477,7957$	$\Sigma = 80,015$		

Tabelle 15: Zweiter Iterationsschritt der Wetternetzrechnung für das Grubengebäude nach Bild 175

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Zweig	Masche	geschätzter Volumenstrom $\dot{V}_{\text{geschätzt}}$ m³/s	Vorzeichenfaktor f	geschätzte Druckerz. (Ventilator) $\Delta p_{\text{geschätzt}}$ Pa	Wetterwiderstand R kg/m7	ermittelter Volumenstrom \dot{V} m³/s	$f \cdot R \cdot (\dot{V}) \cdot \dot{V}$ ($\equiv \Delta p$) Pa	$2 \cdot R \cdot (\dot{V}) $	$\Delta \dot{V} = \frac{\sum_{i=1}^z A_i \cdot R_i \cdot (\dot{V}_i) \cdot \dot{V}_i}{2 \cdot \sum_{i=1}^z R_i \cdot (\dot{V}_i) }$	$\dot{V}_{\text{korrt.}} = \dot{V} - f \cdot \Delta \dot{V}$ m³/s
1	15	I		-1	-2673	0,0000	218,471	2673	0	0,000041 ÷ 766,851 = 0,00000054	218,4710
2	02	I		-1		0,0000	218,471	0	0		218,4710
3	14	I		-1		55,0000	6,9714	-2673,0000	766,8507		6,9714
4								$\Sigma = 0,000041$	$\Sigma = 766,851$		
5	1	II		-1		0,0060	211,500	-268,3927	2,5380	0,000045 ÷ 876,80 = 0,00000052	211,4997
6	01	II		-1		0,0000	211,500	0	0		211,4997
7	14	II		1		55,0000	6,9714	2673,0000	766,8507		6,9714
8	13	II		-1		0,0180	211,500	-805,1780	7,6140		211,4997
9	8	II		-1		1,5000	32,4055	-1575,1762	97,2165		32,4055
10	4	II		-1		0,0686	18,8027	-24,2531	2,5797		18,8027
11								$\Sigma = 0,000045$	$\Sigma = 876,80$		
12	4	III		1		0,0686	18,8027	24,2531	2,5797	0,0000003 ÷ 13,8579 = 0,00000021	18,8027
13	6	III		1		0,0450	-13,603	-8,3266	1,2242		-13,6028
14	6.1	III		1	700	0,0000	-13,603	700	0		-13,6028
15	5	III		-1		0,0340	139,350	-660,2283	9,4758		139,3502
16	2	III		-1		0,0015	192,697	-55,6982	0,5781	192,6969	
17								$\Sigma = 0,0000003$	$\Sigma = 13,8579$		
18	8	IV		1		1,5000	32,4055	1575,1762	97,2165	0,000005 ÷ 120,192 = 0,00000043	32,4055
19	12	IV		-1		0,0045	179,094	-144,3362	1,6118		179,0942
20	11	IV		-1		0,0181	179,094	-580,5524	6,4832		179,0942
21	9	IV		-1		0,0543	125,747	-858,6142	13,6562		125,7474
22	6	IV		-1		0,0450	-13,603	8,3266	1,2242		-13,6028
23	6.1	IV		-1	700	0,0000	-13,603	-700	0		-13,6028
24								$\Sigma = 0,000005$	$\Sigma = 120,192$		
25	5	V		1		0,0340	139,350	660,2283	9,4758	0,0000008 ÷ 80,0743 = 0,00000001	139,3502
26	9	V		1		0,0543	125,747	858,6142	13,6562		125,7474
27	10	V		-1		0,5000	53,3467	-1422,9366	53,3467		53,3467
28	7	V		-1		0,0319	53,3467	-90,7834	3,4035		53,3467
29	3	V		-1		0,0018	53,3467	-5,1226	0,1920		53,3467
30								$\Sigma = 0,0000008$	$\Sigma = 80,0743$		

Tabelle 16: 510. Iterationsschritt der Wetternetzrechnung für das Grubengebäude nach Bild 175

Nach 510 Iterationsschritten erhalten wir ein Ergebnis der Wetternetzrechnung, bei dem

sich im Blindschacht (Wetterweg 6) ein Wettervolumenstrom $\dot{V}_6 = -13,60 \text{ m}^3/\text{s}$ einstellt (Tabelle 16). Das bedeutet eine Wetterumkehr, so wie es beabsichtigt wurde. Aufgrund des geringeren Wetterwiderstandes im Zweig 8 stellt sich dort ein Wettervolumenstrom

$\dot{V}_8 = 32,41 \text{ m}^3/\text{s}$ ein. Die ursprüngliche Wetterrichtung im Wetterweg 4 bleibt erhalten, so dass sich trotz der Wetterumkehr im Wetterweg 6 kein Teilkreislauf ergibt. Mit der geschätzten Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator von $\Delta p = -2673 \text{ Pa}$ führt die Wetternetzbe-

rechnung zu einem Ventilatorvolumenstrom von $\dot{V}_{15} = 218,47 \text{ m}^3/\text{s}$. Dadurch errechnet sich entsprechend Gleichung (83) eine äquivalente Grubenweite von $A = 5,036 \text{ m}^2$. Bei einem Vergleich der Systemkennlinie mit der Ventilator-kennlinie (Bild 176) zeigt sich jedoch, dass die Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator deutlich zu hoch geschätzt wurde.

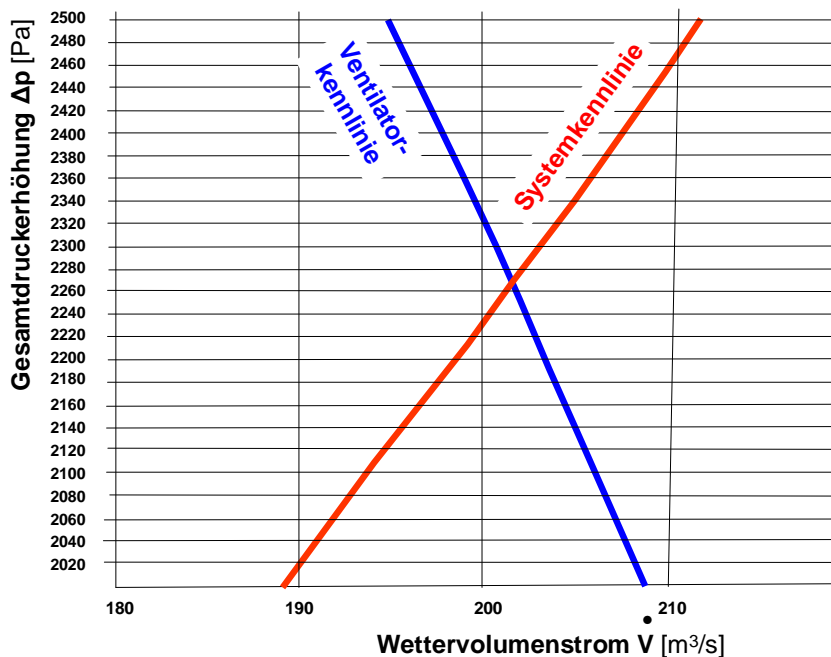


Bild 176: Systemkennlinie des Wettermodells aus Bild 175 (rot) und Kennlinie des Hauptgrubenventilators (blau) bei einer geschätzten Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator von $\Delta p = -2673 \text{ Pa}$

Es zeigt sich jedoch auch, dass aufgrund der gleich bleibenden zusätzlichen Druckquelle im Zweig 6.1 mit $\Delta p = 700 \text{ Pa}$ sich die Systemkennlinie verändert, wenn die geschätzte Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator verändert wird. Das bedeutet, dass ebenfalls die Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator iterativ so variiert werden muss, bis sich die Systemkennlinie und die Ventilator-kennlinie in ihrem tatsächlichen Betriebspunkt schneiden. Dies ist im konkreten Beispiel der Fall bei einer Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator von $\Delta p = -2244 \text{ Pa}$ und einem Wettervolumenstrom am Hauptgrubenventilator von

$\dot{V}_{15} = 201,78 \text{ m}^3/\text{s}$ (Bild 177). Dabei errechnet sich eine äquivalente Grubenweite von $A = 5,076 \text{ m}^2$. Sie ist also geringfügig größer als bei der geschätzten Druckerhöhung am Hauptgrubenventilator von $\Delta p = -2673 \text{ Pa}$.

Das Bild 178 zeigt schließlich das Ergebnis einer kompletten Wetternetz-berechnung unter Berücksichtigung der im Bild 175 gemachten Vorgaben und unter Beachtung einer gegebenen Ventilator-kennlinie. Man sieht, dass der Wettervolumenstrom im Wetterweg 6 ein negatives Vorzeichen aufweist. Das weist auf eine Umkehr der Wetterrichtung (siehe grüne Richtungspfeile im Bild 178) im Blindschacht hin. Der Druckverlust im Blindschacht von $\Delta p_6 = 20 \text{ Pa}$ ergibt sich aufgrund des sich einstellenden Volumenstroms in diesem Wetterweg 6 und dem vorgegebenen Wetterwiderstand von $R = 0,0450 \text{ kg}/\text{m}^7$.

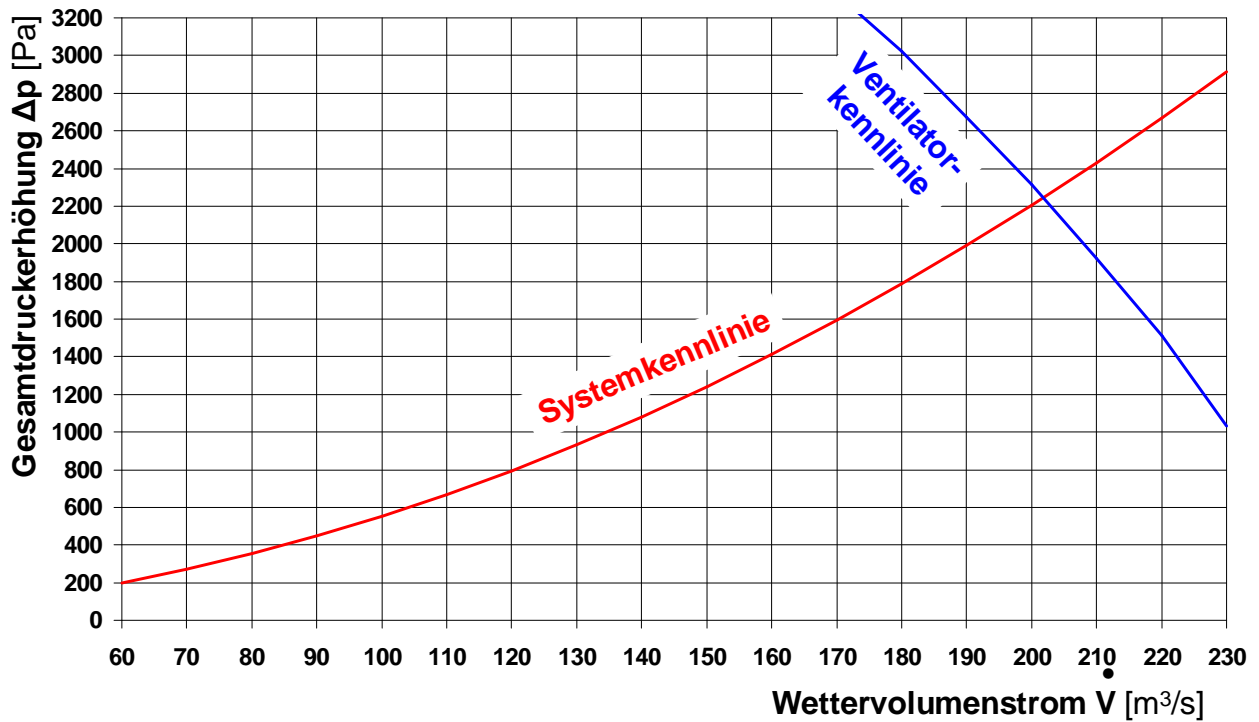


Bild 177: Systemkennlinie des Wettermodells aus Bild 175 (rot) und Kennlinie des Hauptgrubenventilators (blau)

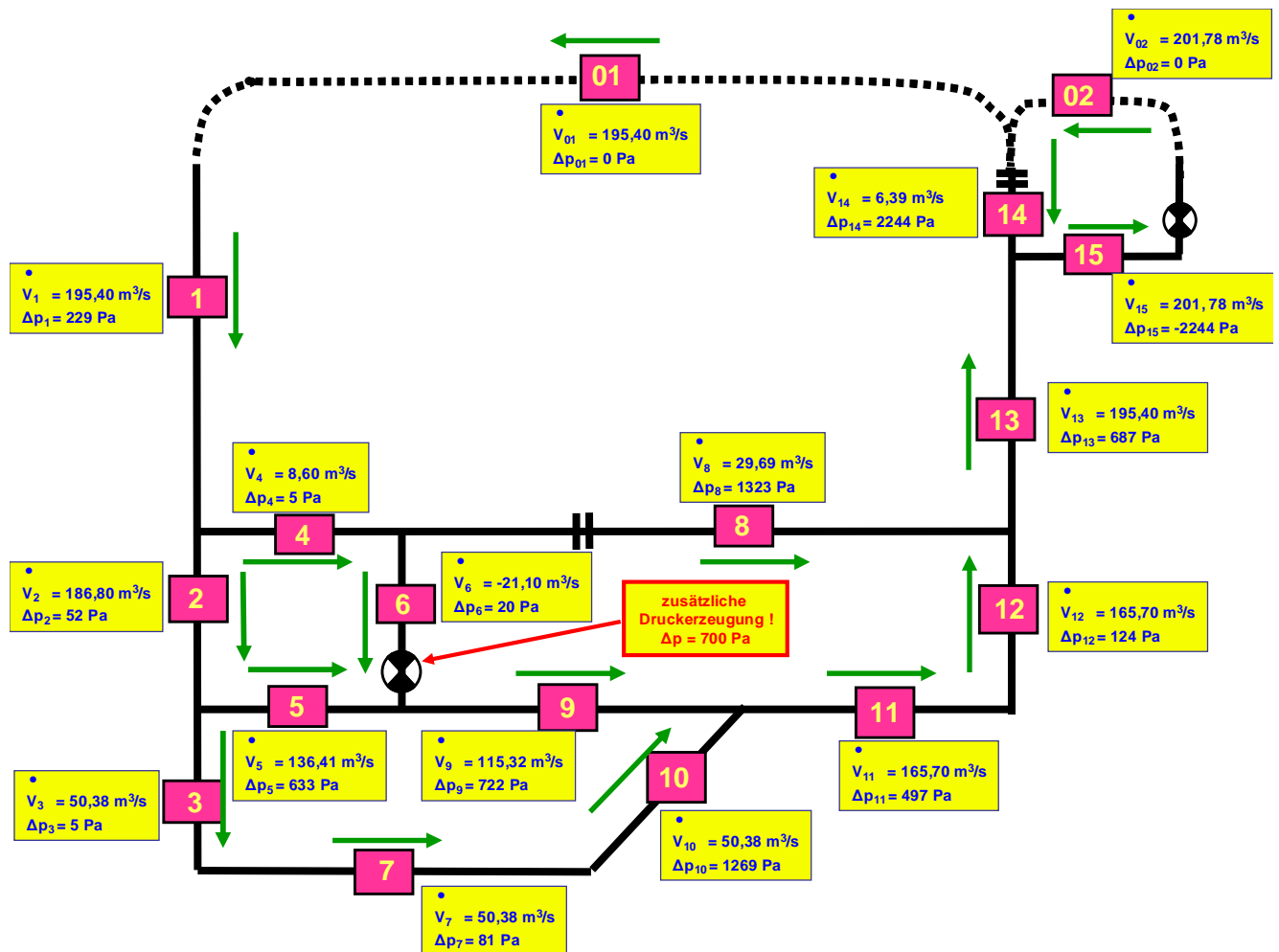


Bild 178: Ergebnis einer vollständigen Wetternetzrechnung bei einem Wettermodell mit zusätzlicher Druckquelle in einem Wetterweg und unter Berücksichtigung einer gegebenen Ventilator-kennlinie

7.6 Berechnung der Wetterbewegung unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Wetter

In den Kapiteln 7.4 und 7.5 wurde die Wetterbewegung der Einfachheit halber als inkompressibel betrachtet. Tatsächlich ist das strömende Medium Luft jedoch kompressibel. Das heißt, aufgrund real existierender Wärmezunahmen bzw. -abnahmen oder aufgrund vorhandener Teufenunterschiede stellt sich eine Dichteänderung $\Delta\rho$ der Wetter entlang der zu betrachtenden Wetterwege ein. Ohne Berücksichtigung der Kompressibilität wird die Wetterbewegung lediglich durch einen Ventilator veranlasst. In der Wirklichkeit kommt die Wetterbewegung auch bei einem Ausfall des Ventilators jedoch nicht vollständig zum Erliegen. Ursache dafür ist der so genannte natürliche Auftrieb, der durch die Wärmeaufnahme und somit durch die Dichteänderung der Wetter verursacht wird. Viele Stollenbetriebe werden beispielsweise lediglich durch „natürlichen Auftrieb“ bewettert.

7.6.1 Physikalische Gesetzmäßigkeiten

Im Kapitel 3.4 wurde bereits der Massenerhaltungssatz und die daraus folgende Kontinuitätsgleichung vorgestellt:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = A_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 \quad (47)$$

Darin sind w_1 und w_2 die Wettergeschwindigkeiten an den Stellen „1“ und „2“, A_1 und A_2 die entsprechenden Querschnittsflächen des Grubenbaus und ρ_1 und ρ_2 die jeweiligen Dichten. Die Erhaltung des Massenstroms ist die erste grundsätzliche Voraussetzung zur Berechnung der Wetterbewegung unter Berücksichtigung der Kompressibilität.

Im Kapitel 3.13 ist die zweite grundsätzliche Voraussetzung zur Berechnung der Wetterbewegung unter Berücksichtigung der Kompressibilität beschrieben worden. Dies ist der Energieerhaltungssatz in Form der Bernoulli-Gleichung für reale Strömungen, bei der Druckverluste aufgrund bestehender Formwiderstände und Reibungswiderstände berücksichtigt sind:

$$p_1 + \frac{\rho_1}{2} \cdot w_1^2 + \rho_1 \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{\rho_2}{2} \cdot w_2^2 + \rho_2 \cdot g \cdot z_2 + \sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot p_{d i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{L_j}{d_j} \cdot p_{d j} \quad (83)$$

Darin sind

$\sum_{i=1}^n \zeta_i \cdot p_{d i}$ die Summe aller n Formwiderstände zwischen den Stellen „1“ und „2“

$\sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{L_j}{d_j} \cdot p_{d j}$ die Summe aller m Reibungswiderstände zwischen den Stellen „1“ und „2“

p_1 und p_2 sind die jeweiligen statischen Drücke am Anfang und am Ende eines Wetterweges, während z_1 und z_2 die zugehörigen geodätischen Höhen sind und g die Erdbeschleunigung mit $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ bedeutet.

Der Energieerhaltungssatz besagt, dass bei stationärer Strömung für jeden Punkt der Strömung die Summe aus statischem Druck, Staudruck, geodätischem Druck sowie aller zu berücksichtigenden Druckverbräuche konstant ist.

Für die Berechnung der Wetterdichte ρ kann die Zustandsgleichung idealer Gase (Kapitel 2.3) als Funktion von statischem Druck p und absoluter Temperatur T herangezogen werden.

$$\rho = \frac{p}{R_F \cdot T} \quad (16)$$

Die Gaskonstante von Luft beträgt $R_F = 287,14 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$.

Da in der Praxis die Wettertemperaturen jeweils am Anfang und am Ende eines Wetterweges gemessen werden, wird bei der Berücksichtigung der Kompressibilität der Wetter eine lineare Dichteänderung im Verlauf eines Wetterweges zugrunde gelegt. Eine Einbuße in der Genauigkeit der Berechnung ist dadurch nicht gegeben [144].

Entgegen der im Kapitel 7.4.4 angegebenen Knotenregel gilt bei einem kompressiblen Wetternetz die Knotenpunktsbedingung:

$$\Sigma \dot{m} = 0$$

das heißt, die Summe aller einem Knotenpunkt zufließenden Massenströme muss gleich der Summe aller aus einem Knotenpunkt abfließenden Massenströme sein.

7.6.2 Wettertechnische Grundgleichungen zur Berücksichtigung der Kompressibilität der Wetter

Bei kompressibler Betrachtungsweise weicht das wettertechnische Widerstandsgesetz, das den Zusammenhang zwischen Druckverbrauch und Wettervolumenstrom beschreibt, geringfügig vom konventionellen Widerstandsgesetz, dem „quadratisches Gesetz der Grubenbewetterung“ (siehe Gleichung (147a)) ab.

$$\Delta p_{\text{Verbrauch}} = R_n \cdot (\dot{V}_m)^2 \cdot \rho_m / \rho_n = R_n \cdot \dot{m}^2 / (\rho_m \cdot \rho_n) \quad (168)$$

Durch den willkürlich gewählten konstanten Faktor $\rho_n = 1,292 \text{ kg/m}^3$ (Dichte von trockener Luft bei einer Temperatur von 0°C und einem Umgebungsdruck von 1013 hPa) wird erreicht, dass der so genannte Normwetterwiderstand R_n die gleiche Einheit wie der konventionelle Wetterwiderstand R der inkompressiblen Berechnung behält und in der Regel auch im Zahlenwert mit diesem nahezu übereinstimmt. Die neue Definition des wettertechnischen Widerstandsgesetzes ist notwendig, weil bei der Berücksichtigung der Zustandsänderungen der Wetter von einem Wetterwiderstand ausgegangen werden muss, der nicht mehr von der Wetterdichte abhängt [144].

ρ_m bedeutet die arithmetisch gemittelte Wetterdichte eines Wetterweges zwischen den Knotenpunkten „1“ und „2“ mit

$$\rho_m = (\rho_1 + \rho_2) / 2 \quad (169)$$

Der mittlere Volumenstrom \dot{V}_m berücksichtigt den Zusammenhang zwischen dem auf der gesamten Länge eines Wetterweges konstanten Massenstrom der Wetter und der mittleren Wetterdichte ρ_m .

$$\dot{V}_m = \dot{m} / \rho_m = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 / \rho_m = \dot{V}_2 \cdot \rho_2 / \rho_m \quad (170)$$

Die durch Teufenunterschiede bedingte statische Druckerhöhung in geneigten Grubenbauen ergibt sich aus der Beziehung (siehe Kapitel 3.5):

$$\Delta p_{\text{statisch}} = \rho_m \cdot g \cdot (z_2 - z_1) \quad (171)$$

Die in einem Wetterweg durch Druckverbrauch verursachte Wetterleistung P lässt sich mit dem Massenstrom bzw. dem mittleren Volumenstrom und dem Normwiderstand wie folgt errechnen:

$$P = R_n \cdot \dot{m}^3 / (\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_n) = R_n \cdot (\dot{V}_m)^3 \cdot (\rho_m)^3 / (\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_n) \quad (172)$$

7.6.3 Einfaches kompressibles Wettermodell

Als Beispiel für eine kompressible Wetternetzberechnung wird ein sehr einfaches Wettermodell mit einem Einziehschacht, einer söhligigen Verbindungsstrecke, einem Ausziehschacht und einem übertägig angeordneten, saugend betriebenen Hauptgrubenventilator betrachtet (Bild 179). Dem Hauptgrubenventilator ist ein kurzer Wetterkanal vorgeschaltet. Ein- und Ausziehschacht haben jeweils eine Länge von 1000 m. Die beiden Schächte und die söhligige Verbindungsstrecke haben alle jeweils den gleichen Normwiderstand $R_n = 0,02 \text{ kg/m}^7$. Der Normwiderstand des Wetterkanals beträgt $R_{\text{Wetterkanal}} = 0,0001 \text{ kg/m}^7$. Die Wettertemperaturen an den Knotenpunkten sind dem Bild 179 zu entnehmen. Der Umgebungsdruck an der Tagesoberfläche beträgt 1000 hPa. Die Berechnung wird für einen Massenstrom von 290 kg/s durchgeführt, der das Grubengebäude durchlaufen soll.

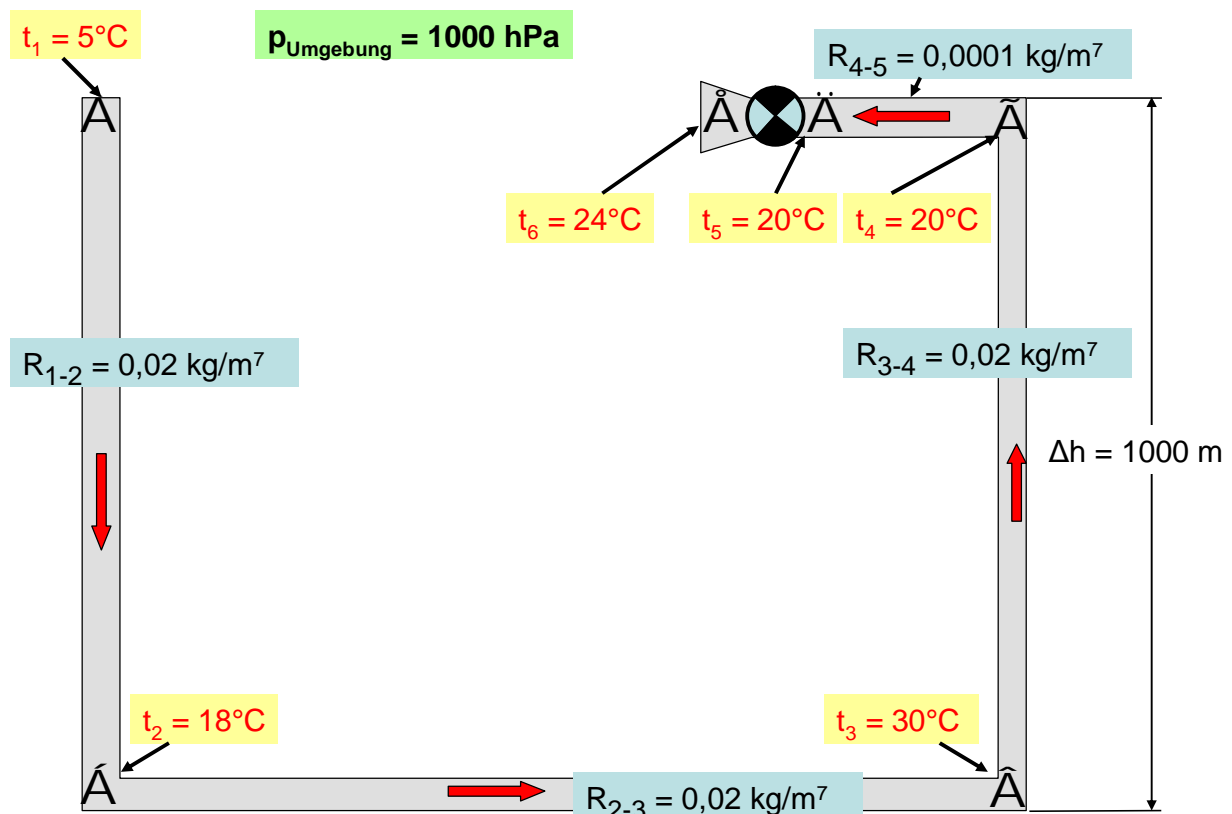


Bild 179: Einfaches kompressibles Wettermodell

Zunächst wird die Dichte der einziehenden Wetter am Knotenpunkt „1“ entsprechend der Gleichung (16) ermittelt:

$$\rho_1 = p_{\text{Umgebung}} / (R_F \cdot T_1) = 100000 \text{ Pa} / (287,14 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (273,15 + 5)\text{K})$$

$$\rho_1 = 1,252 \text{ kg/m}^3$$

Die Dichte der Wetter am Knotenpunkt „2“, dem Fuß des Einziehschachtes wird entsprechend Gleichung (16) ermittelt:

$$\rho_2 = p_2 / (R_F \cdot T_2) = p_2 / (287,14 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (273,15 + 18)\text{K})$$

Der statische Druck p_2 ist allerdings bisher noch nicht bekannt. Dazu muss einmal die durch den Teufenunterschied bedingte statische Druckerhöhung

$$\Delta p_{\text{statisch},2} = \rho_{m,1-2} \cdot g \cdot (z_2 - z_1) = \rho_m \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ m}$$

errechnet werden, andererseits der durch Reibung bedingte Druckverbrauch zwischen den Knotenpunkten „1“ und „2“ entsprechend Gleichung (168).

$$\Delta p_{\text{Verbrauch, 1-2}} = R_n \cdot \dot{m}^2 / (\rho_{m, 1-2} \cdot \rho_n) = 0,02 \text{ kg/m}^7 \cdot (290 \text{ kg/s})^2 / (\rho_{m, 1-2} \cdot 1,292 \text{ kg/m}^3)$$

Der statische Druck p_2 ist

$$p_2 = p_{\text{Umgebung}} + \Delta p_{\text{statisch, 2}} - \Delta p_{\text{Verbrauch, 1-2}}$$

Man erkennt, dass hier ein Zirkelbezug zwischen der Dichte ρ_2 und dem statischen Druck p_2 besteht. Eine mathematische Lösung ist hierbei nur durch ein Iterationsverfahren zu erreichen. Nachdem eine solche Iteration durchgeführt wurde, erhält man folgende Ergebnisse:

$$\rho_2 = 1,3359 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{m, 1-2} = (\rho_1 + \rho_2) / 2 = (1,2521 \text{ kg/m}^3 + 1,3359 \text{ kg/m}^3) / 2 = 1,2940 \text{ kg/m}^3$$

$$p_{\text{Umgebung}} + \Delta p_{\text{statisch, 1-2}} = 112689,7 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{\text{Verbrauch}} = 1006,1 \text{ Pa}$$

$$p_2 = 111683,6 \text{ Pa}$$

Die durch Druckverbrauch verursachte Wetterleistung im Einziehschacht errechnet sich nach Gleichung (172) mit

$$P_{1-2} = R_n \cdot \dot{m}^3 / (\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_n) = 0,02 \text{ kg/m}^7 \cdot (290 \text{ kg/s})^3 / (1,252 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,3359 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,292 \text{ kg/m}^3)$$

und beträgt

$$P_{1-2} = 225,71 \text{ kW.}$$

Im nächsten Schritt wird der statische Druck p_3 am Ende der söhligen Verbindungsstrecke berechnet. Da zwischen den Knotenpunkten „2“ und „3“ kein Teufenunterschied besteht, wird der statische Druck p_3 lediglich durch den durch Reibung bedingten Druckverbrauch $\Delta p_{\text{Verbrauch, 2-3}}$ beeinflusst:

$$p_3 = p_2 - \Delta p_{\text{Verbrauch, 2-3}}$$

$$\Delta p_{\text{Verbrauch, 2-3}} = R_n \cdot \dot{m}^2 / (\rho_{m, 2-3} \cdot \rho_n)$$

In der mittleren Wetterdichte $\rho_{m, 2-3}$ ist jedoch entsprechend der Gleichung (169)

$$\rho_{m, 2-3} = (\rho_2 + \rho_3) / 2$$

die bisher noch unbekannte Wetterdichte ρ_3 am Knotenpunkt „3“ enthalten. Diese errechnet sich gemäß Gleichung (16)

$$\rho_3 = p_3 / (R_F \cdot T_3)$$

Man erkennt hierbei wiederum den Zirkelbezug zwischen dem statischen Druck p_3 und der Wetterdichte ρ_3 , was mathematisch nur iterativ zu lösen ist. Als Ergebnis einer solchen Berechnung erhält man dann die Wetterdichte am Knotenpunkt „3“ mit

$$\rho_3 = 1,2716 \text{ kg/m}^3$$

und somit die mittlere Wetterdichte

$$\rho_{m, 2-3} = 1,3037 \text{ kg/m}^3$$

Der durch Reibung verursachte Druckverbrauch in der söhligen Verbindungsstrecke beträgt

$$\Delta p_{\text{Verbrauch, 2-3}} = 998,6 \text{ Pa}$$

und der statische Druck am Knotenpunkt „3“ ergibt damit

$$p_3 = 110685,1 \text{ Pa}$$

Die durch Druckverbrauch verursachte Wetterleistung in der söhligigen Verbindungsstrecke wird entsprechend der Gleichung (172) berechnet und beträgt

$$P_{2-3} = 222,25 \text{ kW}$$

Im dritten Schritt wird der statische Druck p_4 am oberen Ende des Ausziehschachtes berechnet. Dazu muss einmal die durch den Teufenunterschied bedingte statische Druckabnahme

$$\Delta p_{\text{statisch},4} = \rho_{m, 3-4} \cdot g \cdot (z_3 - z_4) = \rho_m \cdot 9,80665 \text{ m/s}^2 \cdot 1000 \text{ m}$$

errechnet werden, andererseits der durch Reibung bedingte Druckverbrauch zwischen den Knotenpunkten „3“ und „4“ entsprechend Gleichung (168).

$$\Delta p_{\text{Verbrauch}, 3-4} = R_n \cdot \dot{m}^2 / (\rho_{m, 3-4} \cdot \rho_n) = 0,02 \text{ kg/m}^7 \cdot (290 \text{ kg/s})^2 / (\rho_{m, 3-4} \cdot 1,292 \text{ kg/m}^3)$$

Der statische Druck p_4 ist

$$p_4 = p_3 - \Delta p_{\text{statisch}, 4} - \Delta p_{\text{Verbrauch}, 3-4}$$

Auch hier besteht ein Zirkelbezug zwischen der Dichte $\rho_{m, 3-4}$ beziehungsweise p_4 und dem statischen Druck p_4 . Nach durchgeführter Iteration erhält man folgende Ergebnisse:

$$\rho_4 = 1,1605 \text{ kg/m}^3$$

und somit

$$\rho_{m, 3-4} = 1,2161 \text{ kg/m}^3$$

Der durch Reibung verursachte Druckverbrauch im Ausziehschacht beträgt

$$\Delta p_{\text{Verbrauch}, 3-4} = 1070,6 \text{ Pa}$$

Die durch den Teufenunterschied im Ausziehschacht bedingte statische Druckabnahme beträgt

$$\Delta p_{\text{statisch},4} = 11925,4 \text{ Pa}$$

Der statische Druck am Knotenpunkt „4“ ergibt damit

$$p_4 = 97689,1 \text{ Pa}$$

Die durch Druckverbrauch verursachte Wetterleistung im Ausziehschacht wird entsprechend der Gleichung (172) berechnet und beträgt

$$P_{3-4} = 255,85 \text{ kW}$$

Im vierten Schritt wird der statische Druck p_5 am Ende des Wetterkanals berechnet. Da zwischen den Knotenpunkten „4“ und „5“ kein Teufenunterschied besteht, wird der statische Druck p_5 lediglich durch den durch Reibung bedingten Druckverbrauch $\Delta p_{\text{Verbrauch}, 4-5}$ beeinflusst:

$$p_5 = p_4 - \Delta p_{\text{Verbrauch}, 4-5}$$

$$\Delta p_{\text{Verbrauch}, 4-5} = R \cdot \dot{m}^2 / (\rho_{m, 4-5} \cdot \rho_n)$$

In der mittleren Wetterdichte $\rho_{m, 4-5}$ ist jedoch entsprechend der Gleichung (169)

$$\rho_{m, 4-5} = (\rho_4 + \rho_5) / 2$$

die bisher noch unbekannte Wetterdichte ρ_5 am Knotenpunkt „5“ enthalten. Diese errechnet sich gemäß Gleichung (16)

$$\rho_5 = p_5 / (R_F \cdot T_5)$$

Man erkennt hierbei wiederum den Zirkelbezug zwischen dem statischen Druck p_5 und der Wetterdichte ρ_5 , was mathematisch nur iterativ zu lösen ist. Als Ergebnis einer solchen Berechnung erhält man dann die Wetterdichte am Knotenpunkt „5“ mit

$$\rho_5 = 1,1605 \text{ kg/m}^3$$

und somit die mittlere Wetterdichte

$$\rho_{m, 4-5} = 1,1605 \text{ kg/m}^3$$

Die beiden Wetterdichten ρ_4 und ρ_5 unterscheiden sich erst voneinander, wenn man die fünfte Stelle hinter dem Komma anwenden würde. Der durch Reibung verursachte Druckverbrauch in der söhligigen Verbindungsstrecke beträgt lediglich

$$\Delta p_{\text{verbrauch, 4-5}} = 5,6 \text{ Pa}$$

und der statische Druck am Knotenpunkt „5“ ergibt damit

$$p_5 = 97683,5 \text{ Pa}$$

Die durch Druckverbrauch verursachte Wetterleistung im Wetterkanal wird entsprechend der Gleichung (172) berechnet und beträgt

$$P_{4-5} = 1,40 \text{ kW}$$

Im letzten Schritt wird die vom Hauptgrubenventilator zu erzeugende statische Druckerhöhung Δp_{5-6} berechnet. Diese Berechnung ist sehr einfach, denn der statische Druck p_6 hinter dem Ventilator ist identisch mit dem ursprünglich vorgegebenen Umgebungsdruck p_{Umgebung} an der Tagesoberfläche. Es gilt also

$$\Delta p_{5-6} = p_5 - p_{\text{Umgebung}} = 97683,5 \text{ Pa} - 100000 \text{ Pa} = -2316,5 \text{ Pa}$$

Die Wetterdichte ρ_6 am Knotenpunkt „6“ errechnet sich gemäß Gleichung (16)

$$\rho_6 = p_6 / (R_F \cdot T_6) = 100000 \text{ Pa} / (287,14 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \cdot (273,15 + 24)\text{K}) = 1,1720 \text{ kg/m}^3$$

und somit die mittlere Wetterdichte

$$\rho_{m, 5-6} = 1,1662 \text{ kg/m}^3$$

Im Kapitel 4.6.3 wurde die Förderleistung eines Ventilators behandelt. Nach Gleichung (103) errechnet man die Förderleistung

$$P_{\text{Ventilator}} = \dot{V} \cdot \Delta p_t$$

beziehungsweise bei kompressibler Betrachtungsweise

$$P_{\text{Ventilator}} = -\dot{m} \cdot \Delta p_{5-6} / \rho_{m, 5-6}$$

Es wurde hierbei lediglich die statische Druckerhöhung berücksichtigt, weil hinter dem Ventilator in der Regel ein Diffusor angeordnet ist, der den dynamischen Anteil an der Druckerhöhung weitgehend in statischen Druck umwandelt. Die Förderleistung des Hauptgrubenventilators beträgt damit

$$P_{\text{Ventilator}} = 576,03 \text{ kW}$$

Bildet man nun die Summe aller durch Druckverbrauch verursachten Wetterleistungen im Einziehschacht, in der söhligigen Verbindungsstrecke, im Ausziehschacht und im Wetterkanal

$$P_{1-2} + P_{2-3} + P_{3-4} + P_{4-5} = 225,71 \text{ kW} + 222,25 \text{ kW} + 255,85 \text{ kW} + 1,40 \text{ kW} = 705,21 \text{ kW},$$

dann stellt man fest, dass dieser Wert deutlich größer ist als die Förderleistung des Hauptgrubenventilators $P_{\text{Ventilator}}$. Die Differenz aus der Summe aller durch Druckverbrauch verursachten Wetterleistungen und der Förderleistung des Hauptgrubenventilators bezeichnet

man als „natürlichen Auftrieb“. Im konkreten Beispiel beträgt der natürliche Auftrieb des Systems

$$P_{1-2} + P_{2-3} + P_{3-4} + P_{4-5} - P_{\text{Ventilator}} = 129,19 \text{ KW.}$$

Der natürliche Auftrieb wird also bei positivem Wert durch die Wärmeaufnahme der Wetter unter Tage bewirkt. Bei konstanter Wetterdichte wäre die durch Reibung verursachte Wetterleistung gleich der Ventilatorleistung; dabei gibt es keinen natürlichen Auftrieb. Bei einer inkompressiblen Wetternetzberechnung kann demgemäß der natürliche Auftrieb nicht berücksichtigt werden.

In den Bildern 180 und 181 ist das Ergebnis der oben durchgeführten Berechnungen der besseren Übersicht wegen noch einmal grafisch zusammengestellt. Das Bild 180 zeigt zusätzlich noch die Wettervolumenströme in den einzelnen Wetterwegen. Die Wettervolumenströme werden auf die Wetterdichten jeweils am Anfang der einzelnen Wetterzweige bezogen, das heißt die Wettervolumenströme sind gleich dem Massenstrom dividiert durch die Wetterdichte am Anfang eines jeweiligen Zweiges.

$$\dot{V} = \dot{m} / \rho_{\text{Anfang}}$$

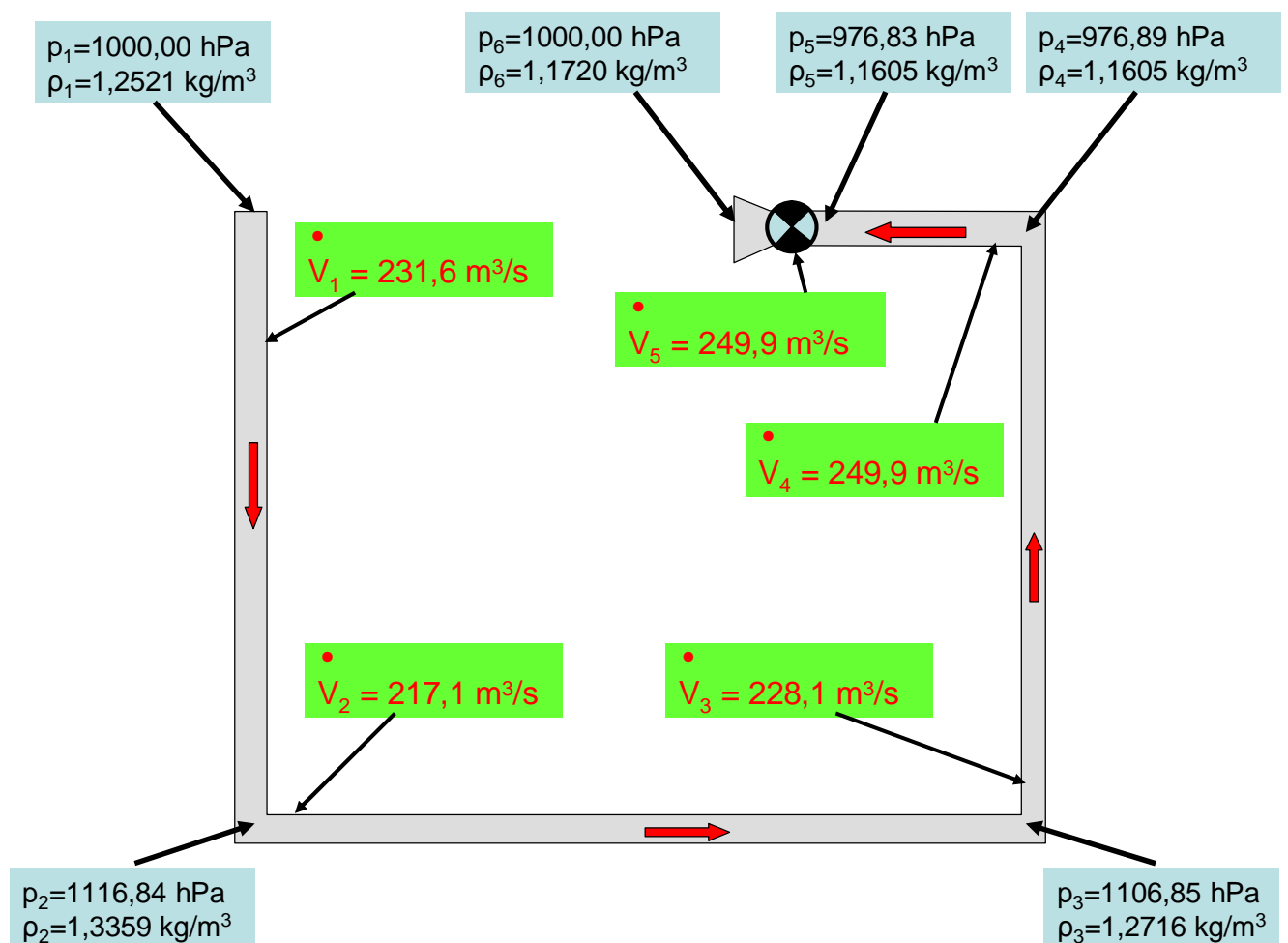


Bild 180: Einfaches kompressibles Wettermodell – Ergebnis der Berechnung: statische Drücke, Wetterdichten an den Knotenpunkten sowie Wettervolumenströme

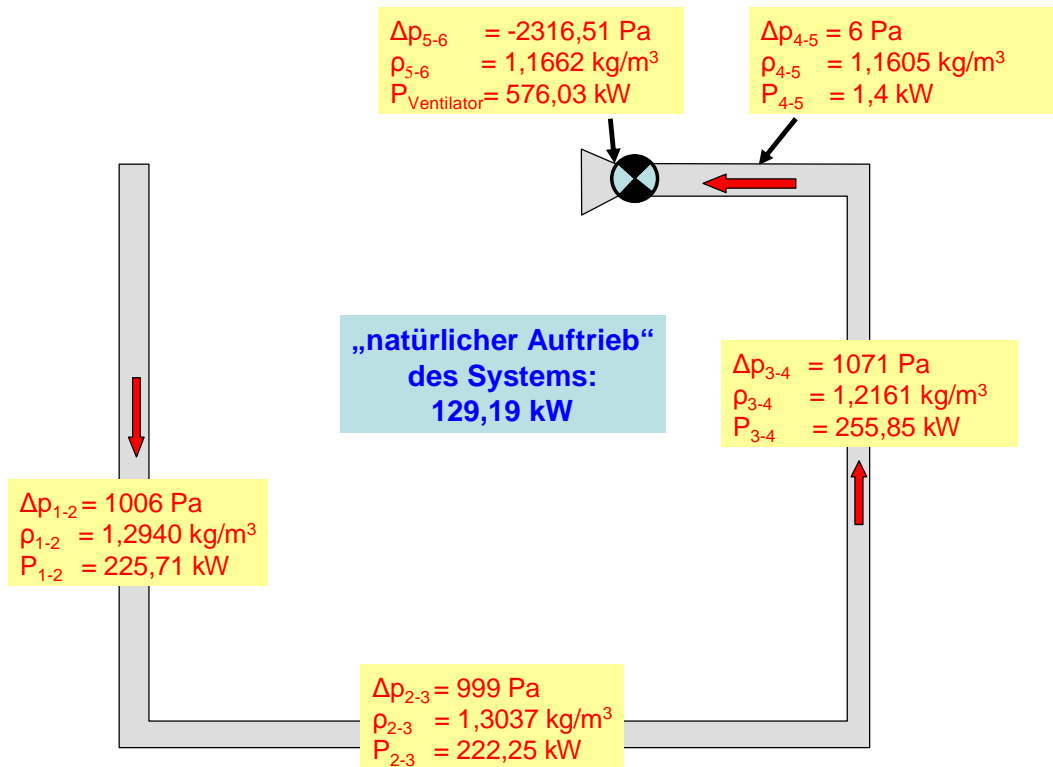


Bild 181: Einfaches kompressibles Wettermodell – Ergebnis der Berechnung: Druckverbräuche und mittlere Wetterdichten in den Wetterzweigen

7.6.4 Natürliche Bewetterung in einem System aus Stollen und Wetterschacht

Als Beispiel einer natürlichen Bewetterung soll ein System betrachtet werden, das aus einem im Tal gelegenen Stollen und einem nach oben offenen Wetterschacht besteht.

7.6.4.1 Natürliche Bewetterung in einem System aus Stollen und Wetterschacht im Winter

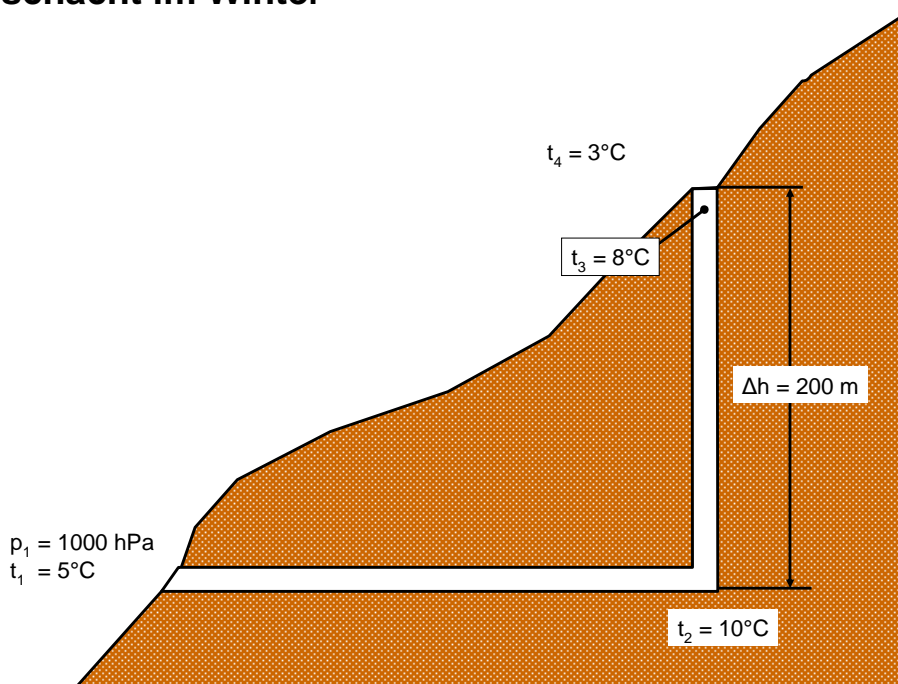


Bild 182: Natürliche Bewetterung im Winter

Vor dem Stollenmundloch herrscht eine Außentemperatur von $t_1 = 5^\circ\text{C}$, der Luftdruck beträgt dort $p_1 = 1000 \text{ hPa}$ (Bild 182). Im Stollentiefsten herrscht eine Wettertemperatur von $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Am obern Ende des 200 m langen Wetterschachtes beträgt die Wettertemperatur $t_3 = 8^\circ\text{C}$. Die Außentemperatur in der Umgebung des Wetterschachtes beträgt $t_4 = 3^\circ\text{C}$. Die Wetterwiderstände des Stollens und des Wetterschachtes haben jeweils einen Wert von $R = 0,02 \text{ kg/m}^7$. Welcher Wettervolumenstrom beziehungsweise welcher Wettermassenstrom fließt nun durch dieses System aufgrund des natürlichen Auftriebes? Eine Möglichkeit, dies zu berechnen besteht darin, dass man sich ein kompressibles Wettermodell mit einem saugend betriebenen imaginären Ventilator entsprechend Bild 183 vorstellt.

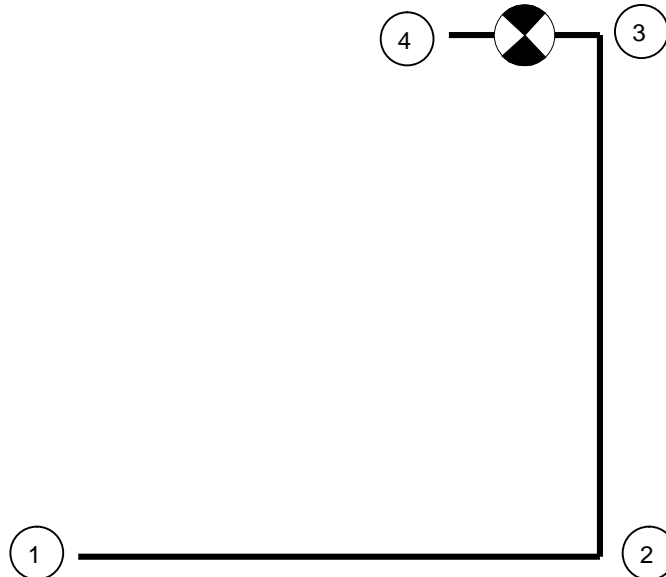


Bild 183: Natürliche Bewetterung mit imaginärem Ventilator im Winter

Die Wetterdichte am Knotenpunkt „1“ lässt sich nach Gleichung (16) berechnen und beträgt $\rho_1 = 1,2521 \text{ kg/m}^3$

Um den Druckverbrauch $\Delta p_{\text{Verbrauch}}$ zwischen den Knotenpunkten „1“ und „2“ entsprechend Gleichung (168) sowie die Wetterdichte ρ_2 zu berechnen, muss ein Wettermassenstrom geschätzt werden. Damit lässt sich der statische Druck p_2 an Knotenpunkt „2“ entsprechend der Gleichung

$$p_2 = p_1 - \Delta p_{\text{Verbrauch}, 1-2}$$

ermitteln. Das Gleiche gilt für den Druckverbrauch zwischen den Knotenpunkten „2“ und „3“ sowie für die Wetterdichte ρ_3 . Beim statischen Druck p_3 an Knotenpunkt „3“ ist jedoch noch der Teufenunterschied zu berücksichtigen, so dass die entsprechende Gleichung lautet:

$$p_3 = p_2 - \Delta p_{\text{statisch}, 3} - \Delta p_{\text{Verbrauch}, 2-3}$$

Der Umgebungsdruck p_4 in der Nähe des Wetterschachtes lässt sich berechnen durch

$$p_4 = p_1 - g \cdot \Delta h \cdot (\rho_1 + \rho_4) / 2$$

Mit den im Bild 182 enthaltenen Angaben erhält man nach Iteration $p_4 = 97565,5 \text{ Pa}$. Die vom imaginären Ventilator zu erzeugende Druckerhöhung Δp_{3-4} zwischen den Knotenpunkten „3“ und „4“ ist identisch mit der Differenz zwischen den Drücken p_4 und p_3 . Da es sich in diesem konkreten Fall aber um eine natürliche Bewetterung handelt, das heißt eine Wetterbewegung, die lediglich aufgrund thermischer Vorgänge und ohne Einwirkung eines Ventilators zustande kommen soll, muss die Druckerhöhung Δp_{3-4} gleich Null sein. Durch Probieren ist der anfangs geschätzte Wettermassenstrom, der durch das System fließt, so zu verändern, bis diese Bedingung erfüllt ist und die Druckerhöhung $\Delta p_{3-4} = 0$ wird. Die Tabelle 17 zeigt für diese Bedingung das Ergebnis der Berechnungen an.

Knotenpunkt	Teufe	Wetterdichte	mittlere dichte	statischer Druck	Druckverbrauch bzw. Druckerzeugung	Wettermassenstrom	Wettervolumenstrom
	[m]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Pa]	[Pa]	[kg/s]	[m ³ /s]
1	0	1,2521		100000			33,16
			1,2409		21,51	41,52	
2	0	1,2297		99978,5			33,77
			1,2191		21,89	41,52	
3	+200	1,2085		97565,5			34,36
			1,2195		0	41,52	
4	+200	1,2304		97565,5			

Tabelle 17: Natürliche Bewetterung in einem System aus Stollen und Wetterschacht im Winter nach Bild 183

Wie man erkennt, strömt im Winter bei den vorgegebenen atmosphärischen Bedingungen ein Wettermassenstrom $\dot{m} = 41,52 \text{ kg/s}$ durch das System aus Stollen und Wetterschacht, ohne dass ein Ventilator an dieser Wetterbewegung beteiligt ist. Die Strömungsrichtung ist dabei am Stollenmundloch eintretend, durch den Stollen und im Wetterschacht aufwärts gerichtet. Die angegebenen Wettervolumenströme beziehen sich auf die Wetterdichten am Anfang des jeweiligen Wetterzweiges.

7.6.4.2 Natürliche Bewetterung in einem System aus Stollen und Wetterschacht im Sommer

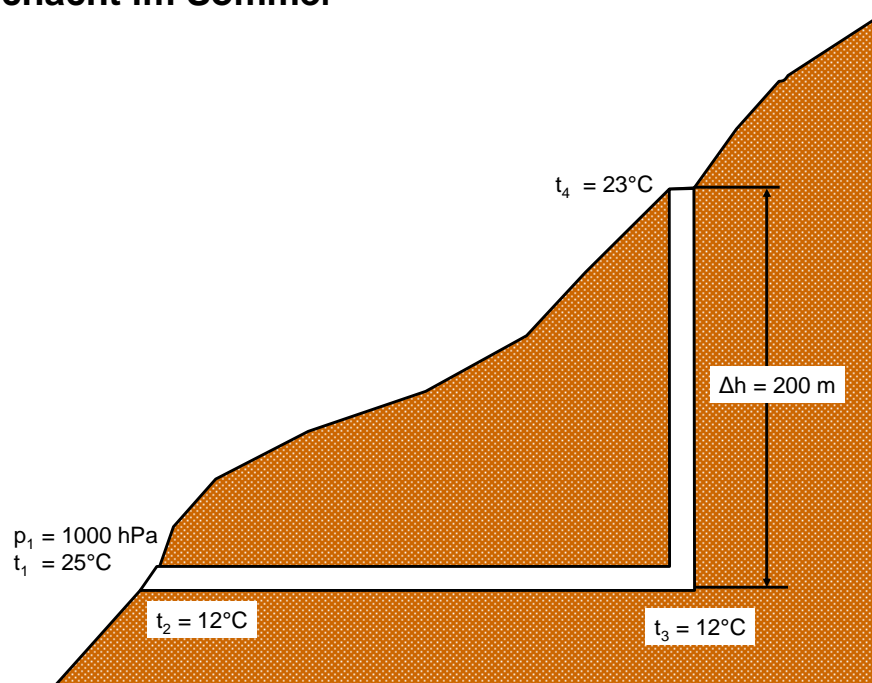


Bild 184: Natürliche Bewetterung im Sommer

Vor dem Stollenmundloch herrscht eine Außentemperatur von $t_1 = 25^\circ\text{C}$, der Luftdruck beträgt dort $p_1 = 1000 \text{ hPa}$ (Bild 184). Im Stolleneingang beträgt die Wettertemperatur $t_2 = 12^\circ\text{C}$. Im Stollentiefsten herrscht eine Wettertemperatur $t_3 = 12^\circ\text{C}$. Die Außentemperatur in der Umgebung des Wetterschachtes beträgt $t_4 = 23^\circ\text{C}$. Die Wetterwiderstände des Stollens und des Wetterschachtes haben jeweils einen Wert von $R = 0,02 \text{ kg/m}^7$. Welcher Wettervolumenstrom beziehungsweise welcher Wettermassenstrom fließt durch dieses System aufgrund des natürlichen Auftriebes? Eine Möglichkeit, dies zu berechnen besteht darin, dass man sich ein kompressibles Wettermodell mit einem saugend betriebenen imaginären Ventilator entsprechend Bild 185 vorstellt.

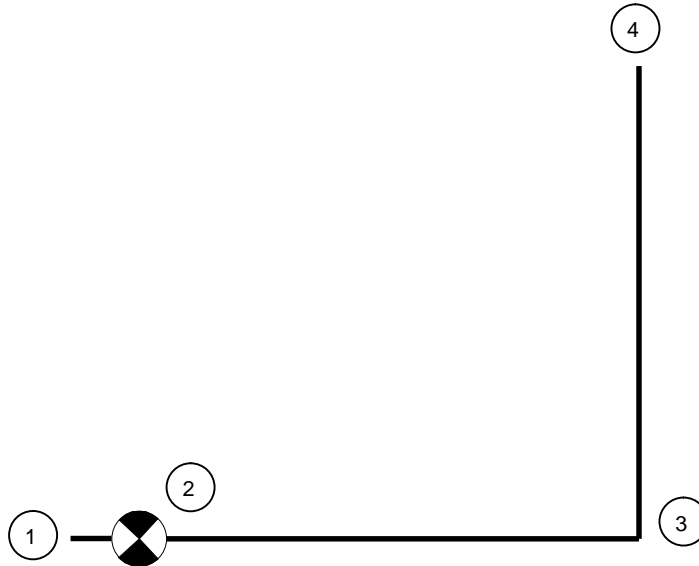


Bild 185: Natürliche Bewetterung mit imaginärem Ventilator im Sommer

Wie aufgrund der Temperaturverteilung im Stollen zu ersehen ist, deutet alles darauf hin, dass im Sommer die Wetter von oben nach unten im Wetterschacht ziehen werden.

Die Wetterdichte am Knotenpunkt „1“ vor dem Stollenmundloch lässt sich nach Gleichung (16) berechnen und beträgt $\rho_1 = 1,1681 \text{ kg/m}^3$.

Der Umgebungsdruck p_4 in der Nähe des Wetterschachtes lässt sich berechnen durch

$$p_4 = p_1 - g \cdot \Delta h \cdot (\rho_1 + \rho_4) / 2$$

Mit den im Bild 184 enthaltenen Angaben erhält man nach Iteration $p_4 = 97727,5 \text{ Pa}$ und $\rho_4 = 1,1492 \text{ kg/m}^3$.

Der statische Druck p_3 an Knotenpunkt „3“ lässt sich entsprechend der Gleichung

$$p_3 = p_4 + \Delta p_{\text{statisch, 3}} - \Delta p_{\text{Verbrauch, 4-3}}$$

bestimmen. Dabei ist

$$\Delta p_{\text{statisch, 3}} = g \cdot \Delta h \cdot (\rho_4 + \rho_3) / 2$$

Um den Druckverbrauch $\Delta p_{\text{Verbrauch, 4-3}}$ zwischen den Knotenpunkten „4“ und „3“ entsprechend Gleichung (168) sowie die Wetterdichte ρ_3 zu berechnen, muss ein Wettermassenstrom geschätzt werden.

Der statische Druck p_2 an Knotenpunkt „2“ lässt sich entsprechend der Gleichung

$$p_2 = p_3 - \Delta p_{\text{Verbrauch, 3-2}}$$

bestimmen.

Die vom imaginären Ventilator zu erzeugende Druckerhöhung Δp_{2-1} zwischen den Knotenpunkten „2“ und „1“ ist identisch mit der Differenz zwischen den Drücken p_2 und p_1 . Da es

sich in diesem konkreten Fall aber um eine natürliche Bewetterung handelt, das heißt eine Wetterbewegung, die lediglich aufgrund thermischer Vorgänge und ohne Einwirkung eines Ventilators zustande kommen soll, muss die Druckerhöhung Δp_{2-1} gleich Null sein. Durch Probieren ist der anfangs geschätzte Wettermassenstrom, der durch das System fließt, so zu verändern, bis diese Bedingung erfüllt ist und die Druckerhöhung $\Delta p_{2-1} = 0$ wird. Die Tabelle 18 zeigt für diese Bedingung das Ergebnis der Berechnungen an.

Knotenpunkt	Teufe	Wetterdichte	mittlere dichte	statischer Druck	Druckverbrauch bzw. Druckerzeugung	Wettermassenstrom	Wettervolumenstrom
	[m]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Pa]	[Pa]	[kg/s]	[m ³ /s]
4	+200	1,1492		97727,5			39,32
			1,1854		26,66	45,18	
3	0	1,2216		100025,9			36,99
			1,2215		25,87	45,18	
2	0	1,2213		100000			37,00
			1,1947		0	45,18	
1	0	1,1681		100000			

Tabelle 18: Natürliche Bewetterung in einem System aus Stollen und Wetterschacht im Sommer nach Bild 185

Im Sommer strömt bei den vorgegebenen atmosphärischen Bedingungen ein Wettermassenstrom $\dot{m} = 44,18 \text{ kg/s}$ durch das System aus Stollen und Wetterschacht, ohne dass ein Ventilator an dieser Wetterbewegung beteiligt ist. Die Wetterrichtung ist in diesem Fall im Wetterschacht abwärts, durch den Stollen und aus dem Stollenmundloch an die Atmosphäre austretend. Die angegebenen Wettervolumenströme beziehen sich auf die Wetterdichten am Anfang des jeweiligen Wetterzweiges.

Betrachtet man die Ergebnisse im Sommer- und Winterbetrieb mit den sich unterschiedlich einstellenden Wetterrichtungen, dann lässt sich unschwer daraus folgern, dass bei diesem System zwischendurch auch Zustände mit instabiler Bewetterung beziehungsweise mit Wetterstillständen eintreten werden.

7.6.5 Brandauftrieb

Ein offener Grubenbrand kann die wettertechnischen Bedingungen in einem Bergwerk wesentlich beeinflussen. Dies geschieht sowohl durch eine Drosselwirkung als auch durch eine Auftriebswirkung.

Einesteils beruht die Drosselwirkung auf einer Erhöhung des Wettervolumenstroms infolge des Temperaturanstieges am Grubenbrand.

$$\dot{V}_2 / \dot{V}_1 = T_2 / T_1 \tag{173}$$

Dabei ist der erhöhte Druckbedarf

$$\Delta p = R \cdot T_2 / T_1 \cdot \dot{V}_1^2 \quad (174)$$

In den Gleichungen (173) und (174) sind

T_1 die absolute Wettertemperatur von dem Brand,

T_2 die durch den Brand erhöhte absolute Wettertemperatur und

\dot{V}_1 der Wettervolumenstrom ohne Brandbeeinflussung,

\dot{V}_2 der durch Brandbeeinflussung erhöhte Wettervolumenstrom.

Zusätzlich wird der Wettermassenstrom durch entstehende Brandgase vergrößert. Erhöht sich beispielsweise der Wettermassenstrom durch das Einmischen von Wasserdampf, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid um 10%, dann tritt alleine dadurch – ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses – eine Erhöhung des Druckbedarfs von

$$\Delta p = R \cdot 1,1^2 \cdot \dot{V}_1^2 = R \cdot 1,21 \cdot \dot{V}_1^2 \quad (175)$$

das heißt um 21% auf.

Die Brandauftriebswirkung kommt dadurch zustande, dass Luftsäulen miteinander in Verbindung stehen und infolge der Erwärmung durch den Brand unterschiedliche Wetterdichten aufweisen. Der Auftriebsdruck kann durch Gleichung (176) beschrieben werden, wobei Δh für den Teufenunterschied steht.

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (176)$$

Bei Brandversuchen auf der Versuchsrube Tremonia in Dortmund wurden mit Holzmengen bis 1500 kg und bei Wettergeschwindigkeiten bis 2,5 m/s Maximalwerte der Wettertemperaturen von $t_{\text{Brand}} = 800 \text{ °C}$ gemessen [150] [151]. Die Brandwettertemperatur $t(x)$ in Abhängigkeit vom Abstand x vom Brand kann mit der empirischen Beziehung

$$t(x) = t_{\text{Gebirge}} + \frac{t_{\text{Brand}} - t_{\text{Gebirge}}}{e^{s \cdot x}} \quad (177)$$

beschrieben werden und entspricht dem im Bild 186 dargestellten roten Kurvenverlauf.

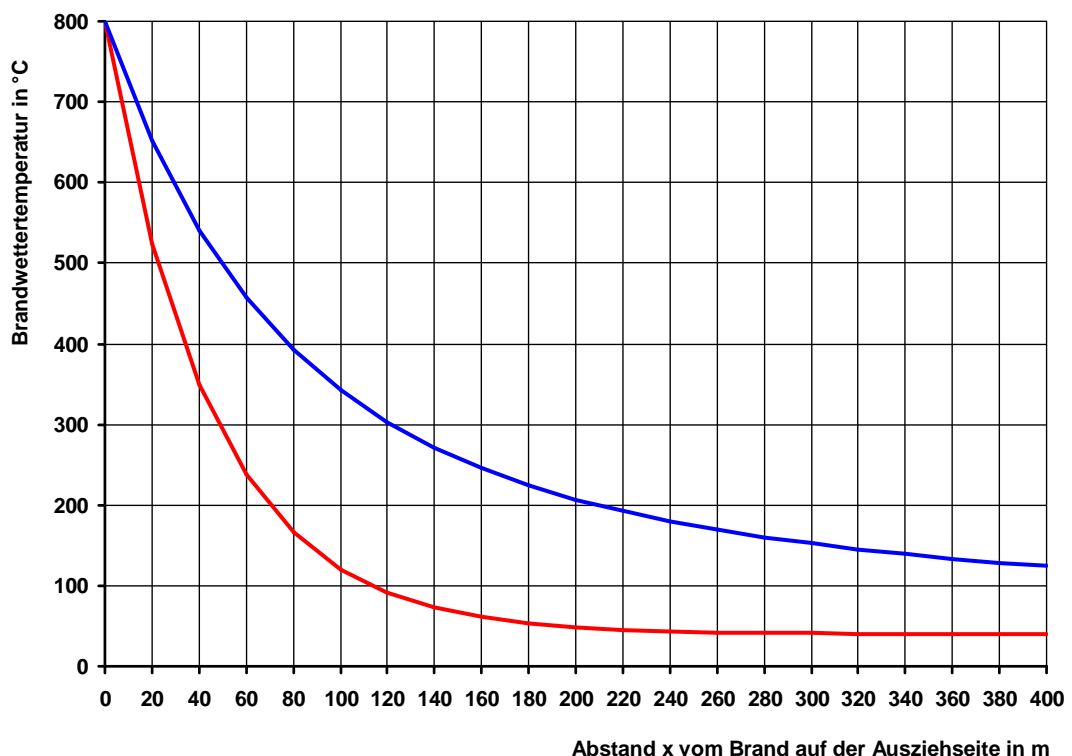


Bild 186: Brandwettertemperaturverlauf auf der Ausziehseite offener Grubenbrände

Die empirisch ermittelte Größe s berücksichtigt den Einfluss des Streckenumfangs, des Wetterstroms und der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges und wurde mit dem Wert $s = 0,0225 \text{ m}^{-1}$ bestimmt.

Im Abstand von $x = 200 \text{ m}$ hinter dem Brand beträgt somit die Brandwettertemperatur bei einer Standard-Gebirgstemperatur von $t_{\text{Gebirge}} = 40 \text{ °C}$ noch etwa $t = 50 \text{ °C}$. Im Bild 186 ist als blauer Kurvenverlauf die mittlere Temperatur t_{mi} der Brandgase in dem von ihnen durchlaufenen Wetterwegstück durch Bildung von

$$t_{\text{mi}}(x) = 1/x \cdot \int_0^x t(x) dx \quad (178)$$

$$t_{\text{mi}}(x) = t_{\text{Geb}} + \frac{t_{\text{Brand}} - t_{\text{Gebirge}}}{s \cdot x} - \frac{t_{\text{Brand}} - t_{\text{Gebirge}}}{s \cdot x \cdot e^{s \cdot x}} \quad (178a)$$

dargestellt.

Die Druckerzeugung eines offenen Grubenbrandes Δp_{Brand} in einem seigeren Wetterweg in Abhängigkeit vom seigeren Abstand Δh vom Brand wird im Bild 187 gezeigt.

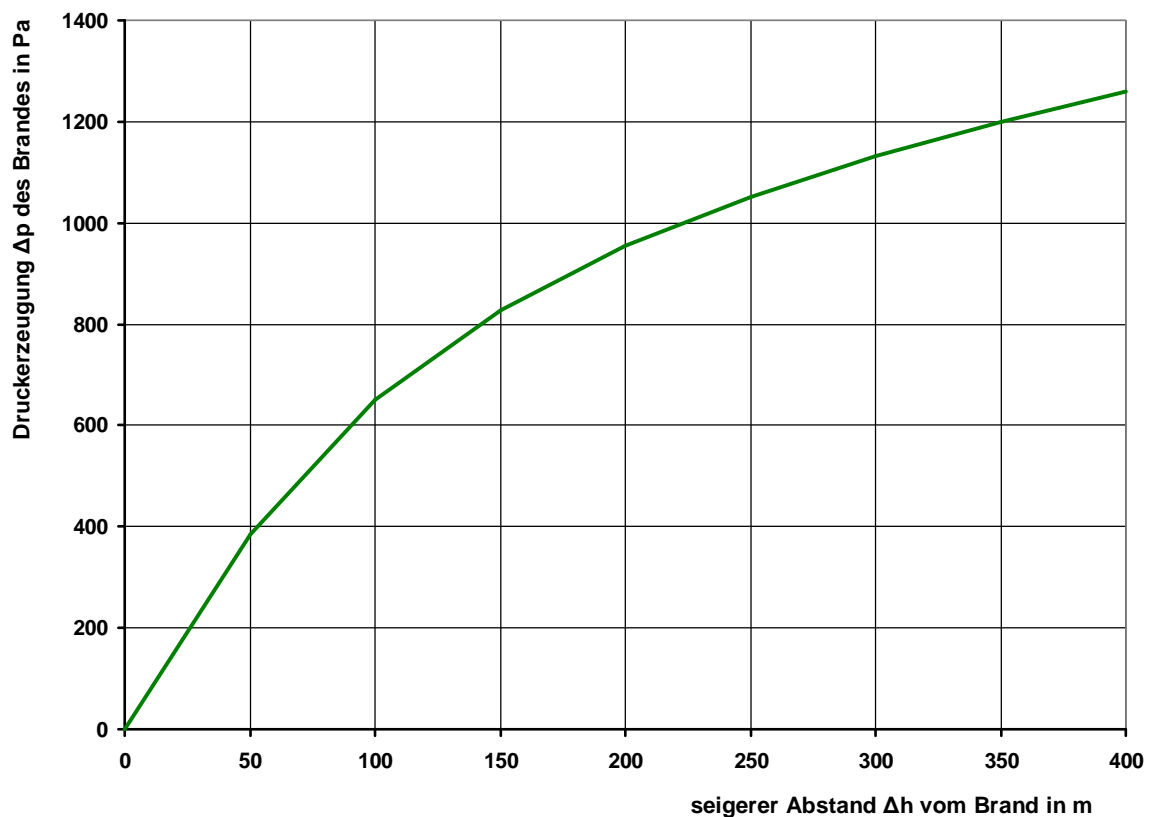


Bild 187: Druckerzeugung offener Grubenbrände in seigeren Wetterwegen

Der Kurvenverlauf entspricht dabei der Gleichung (179).

$$\Delta p_{\text{Brand}} = \frac{p_{\text{Umgebung}} \cdot g}{R_F \cdot (t_1 + 273,15)} \cdot \frac{t_{\text{mi}} - t_1}{t_{\text{mi}} + 273,15} \cdot \Delta h \quad (179)$$

Bei der Berechnung wurde ein Standard-Umgebungsdruck $p_{\text{Umgebung}} = 1100 \text{ hPa}$ sowie eine Standard-Wettertemperatur vor dem Brand von $t_1 = 25 \text{ °C}$ zugrunde gelegt.

Das Diagramm (Bild188) kann zur Abschätzung der Druckerzeugung eines offenen Grubenbrandes Δp_{Brand} in geneigten Wetterwegen benutzt werden. Die jeweilige Druckerzeugung wird hierbei ebenfalls nach Gleichung (179) berechnet, wobei der Teufenunterschied Δh dem

jeweiligen Wert auf der Ordinate entspricht und die darin enthaltene mittlere Temperatur t_{mi} der Brandgase nach Gleichung (178a) mit der jeweiligen Länge x des geneigten Wetterweges, der auf der Abszisse aufgetragen ist, berechnet wurde.

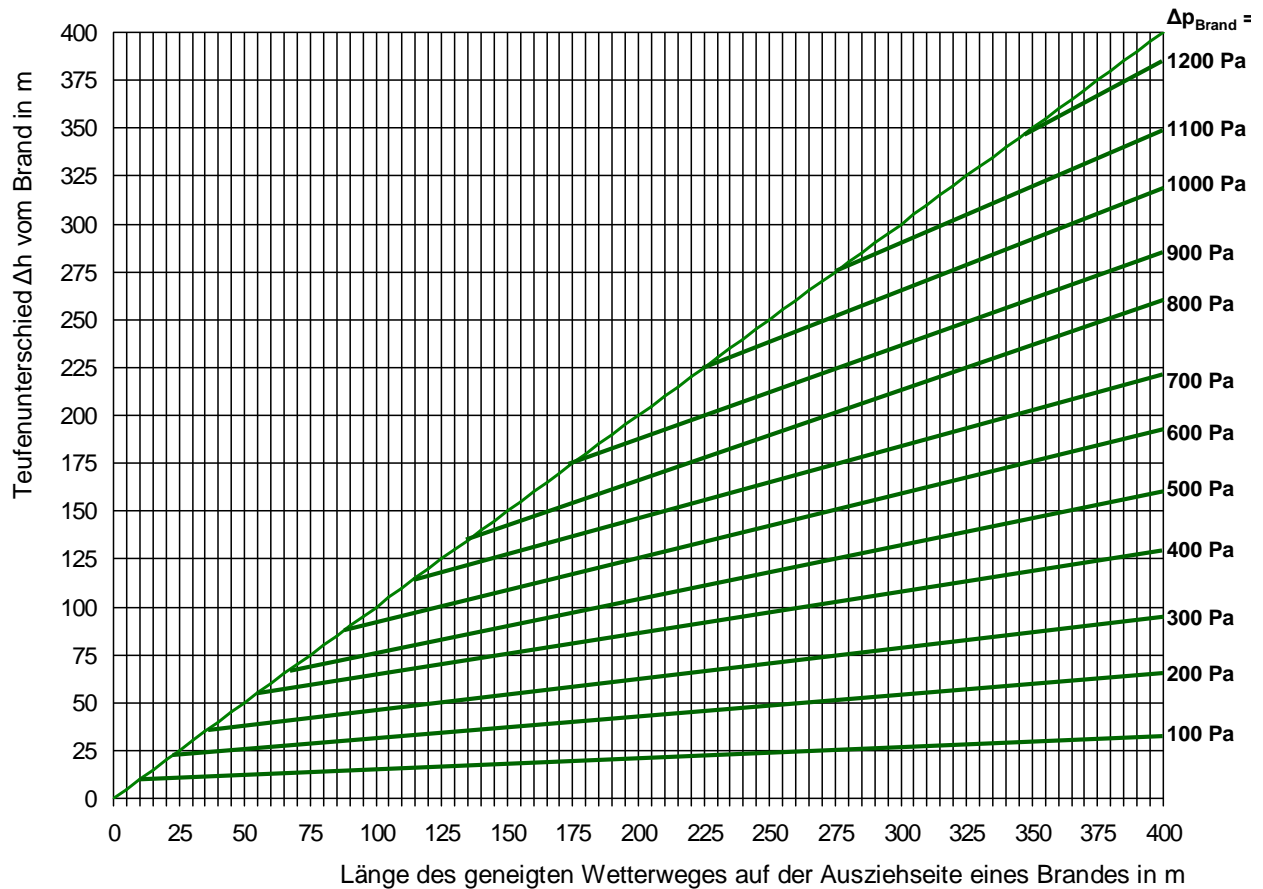


Bild 188: Druckerzeugung offener Grubenbrände in geneigten Wetterwegen

Die eingangs zu diesem Kapitel erwähnte Drosselwirkung ist bei einem offenen Grubenbrand aufgrund der Volumen- und Massenstromvergrößerung immer vorhanden. Die Auftriebswirkung dagegen kann nur in Grubenbauten mit Teufenunterschied Δh entstehen. Dies ist auch aus der Gleichung (176) ersichtlich.

7.6.5.1 Wechselwirkung zwischen Aufwärtsbewetterung und offenem Grubenbrand

Bei einer Aufwärtsbewetterung erhöht sich der zum offenen Grubenbrand ziehende Wetterstrom wegen der zusätzlich auftretenden Druckquelle. Die durch den Brand bedingte Drosselwirkung lässt jedoch den Wetterstrom nicht unbegrenzt größer werden. Diese zusätzliche Druckquelle verstärkt die Wirkung der regulär vorhandenen Druckquellen wie Ventilatoren und natürlicher Auftrieb. Wenn heiße Brandgase aufwärts ziehen, verstärkt sich folglich der Wetterstrom im brennenden Wetterweg, allerdings verringern sich zugleich die Wetterströme in parallelen Wetterwegen; seine Richtungen können dort sogar umgekehrt werden.

Die Stärke eines Brandauftriebes hängt wesentlich von der Lage des Brandes ab. Befindet sich beispielsweise ein offener Grubenbrand in einem söhligem Abschnitt eines Grubenbaus, der bei Aufwärtsbewetterung einem ansteigend geneigten Grubenbau vorgelagert ist, dann hängt die Intensität des Auftriebes davon ab, mit welcher Temperatur die Brandwetter zum aufwärts bewetterten geneigten Grubenbau gelangen. Der Brandauftrieb wird umso geringer sein, je größer der Abstand zwischen dem Brand und dem Fußpunkt des geneigten Grubenbaus ist.

Befindet sich der offene Grubenbrand unmittelbar am Fußpunkt eines ansteigend geneigten Grubenbaus, dann entsteht der höchste Brandauftrieb, weil dort die maximalen Brandwettertemperaturen auftreten und der gesamte Teufenunterschied des geneigten Grubenbaus für die Entstehung des Auftriebsdruckes zur Verfügung steht.

Ein offener Grubenbrand im oberen Teil eines ansteigend geneigten Grubenbaus wird wegen des geringeren wirksamen Teufenunterschieds auch einen geringeren Auftriebsdruck erzeugen als ein Brand am Fußpunkt des geneigten Grubenbaus.

Bei einem offenen Grubenbrand in einem söhligem Abschnitt eines Grubenbaus, der einem ansteigend geneigten Grubenbau nachgeschaltet ist, wird – bezogen auf den vorgelagerten geneigten Grubenbau – kein zusätzlicher Auftriebsdruck erzeugt. Die wettertechnische Auswirkung eines solchen Brandes besteht lediglich darin, dass der zum Brand ziehende Wetterstrom gedrosselt wird.

7.6.5.2 Wechselwirkung zwischen Abwärtsbewetterung und offenem Grubenbrand

Bei einer Abwärtsbewetterung wirkt die durch einen offenen Grubenbrand bedingte zusätzliche Druckquelle den regulär vorhandenen Druckquellen wie Haupt- oder Zusatzventilatoren entgegen. Daher benennt man bei Abwärtsführung der Wetter die zusätzliche Druckquelle als Gegentrieb. Gegentrieb und Drosselwirkung summieren sich dabei, so dass der zum Brand ziehende Wetterstrom abnimmt und unter Umständen sogar Wetterstillstand eintritt. Brände in abwärts bewetterten Grubenbauen breiten sich deshalb langsamer aus als bei aufwärts bewetterten Grubenbauen. Bei Abwärtsbewetterung verringert sich also der Wetterstrom im brennenden Wetterweg bis hin zur Richtungsumkehr. Allerdings erhöhen sich zugleich die Wetterströme in parallelen Wetterwegen.

Die wettertechnischen Auswirkungen eines Gegentriebes hängen wesentlich von der Lage des Brandes ab. Während ein Brandauftrieb nur bei einem wirksamen Teufenunterschied oberhalb eines Brandes entsteht, entsteht ein Gegentrieb nur bei einem wirksamen Teufenunterschied unterhalb eines Brandes.

Befindet sich beispielsweise ein offener Grubenbrand in einem söhligem Abschnitt eines Grubenbaus, der einem abwärts bewetterten geneigten Grubenbau vorgelagert ist, dann entsteht im söhligem Wetterweg eine Drosselwirkung als Folge der Volumen- und Massenzunahme. Der zum Brand ziehende Wetterstrom wird dementsprechend verringert. Wenn noch heiße Brandgase abwärts geführt werden und zusätzlich einen Gegentrieb bewirken, kann die Drosselwirkung darüber hinaus verstärkt werden.

Ein Phänomen, das auch bei Bränden in rein söhligem Wetterwegen zu beobachten ist, besteht darin, dass Brandgase vom Brand aus über eine begrenzte Wetterweglänge in einem Teil des Grubenbau-Querschnitts gegen den Wetterstrom ziehen. Dieses Phänomen wird als Rückstau bezeichnet und ist keine Wetterumkehr im eigentlichen Sinne. Der Rückstau ist auf die große Wettervolumenstromzunahme am Brand und auf die Bildung von Brandgasschichten zurückzuführen, die dem Wetterstrom entgegenziehen. Die Schichtenbildung wird durch Temperaturunterschiede hervorgerufen. Bei der Bewegung der Schichten gegen die allgemeine Wetterrichtung nehmen ihre Temperaturen rasch ab. Deshalb sind die Ausdehnungen solcher Schichten sehr begrenzt.

Befindet sich der offene Grubenbrand unmittelbar am oberen Ende eines abwärts bewetterten geneigten Grubenbaus, dann entsteht der höchste Gegentrieb, weil dort die maximalen Brandwettertemperaturen auftreten und der gesamte Teufenunterschied des geneigten Grubenbaus für die Entstehung des Gegentriebes zur Verfügung steht. Der Gegentrieb kann so stark sein, dass zwischenzeitlich Wetterstillstand eintritt. Eine regelrechte Wetterumkehr kann nicht eintreten, solange sich der Brand an der höchsten Stelle des abwärts bewetterten Grubenbaus befindet. Wenn aber brennendes Material von einem Brand an der höchsten

Stelle des abwärts bewetterten Grubenbaus herab fällt und an einer tiefer gelegenen Stelle einen weiteren Brand entstehen lässt, können damit die Voraussetzungen für eine anhaltende Wetterumkehr erfüllt sein.

Ein offener Grubenbrand inmitten eines abwärts bewetterten geneigten Grubenbaus wird wegen des geringeren wirksamen Teufenunterschieds auch einen geringeren Gegentrieb erzeugen als ein Brand am oberen Ende des geneigten Grubenbaus. Jedoch kann auch hierbei ein Wetterstillstand eintreten. Da oberhalb des Brandes ein wirksamer Teufenunterschied vorhanden ist, der obendrein einen Auftriebsdruck erzeugt, kann sich in diesem Fall sogar eine anhaltende Wetterumkehr entwickeln.

Befindet sich ein offener Grubenbrand in einem söhlichen Abschnitt eines Grubenbaus, der einem abwärts bewetterten geneigten Grubenbau nachgeschaltet ist, dann entsteht im söhlichen Wetterweg eine Drosselwirkung als Folge der Volumen- und Massenzunahme. Der zum Brand ziehende Wetterstrom wird dementsprechend verringert.

7.6.6 Berechnung eines kompressiblen Wetternetzes

Zur Berechnung eines kompressiblen Wetternetzes wird das gleiche Beispiel wie im Kapitel 7.5.2 mit den gleichen Wetterwiderständen verwendet. Um die Wetterbewegung jedoch als kompressibel berechnen zu können, sind dazu jedoch zusätzliche Angaben wie Umgebungsluftdruck an der Tagesoberfläche, Teufenunterschiede und Wettertemperaturen an den jeweiligen Knotenpunkten erforderlich (Bild 189). Die vom Hauptgrubenventilator erzeugte Druckerhöhung soll, wie auch bereits im Bild 173 gezeigt, $\Delta p_{\text{Ventilator}} = -2673 \text{ Pa}$ betragen.

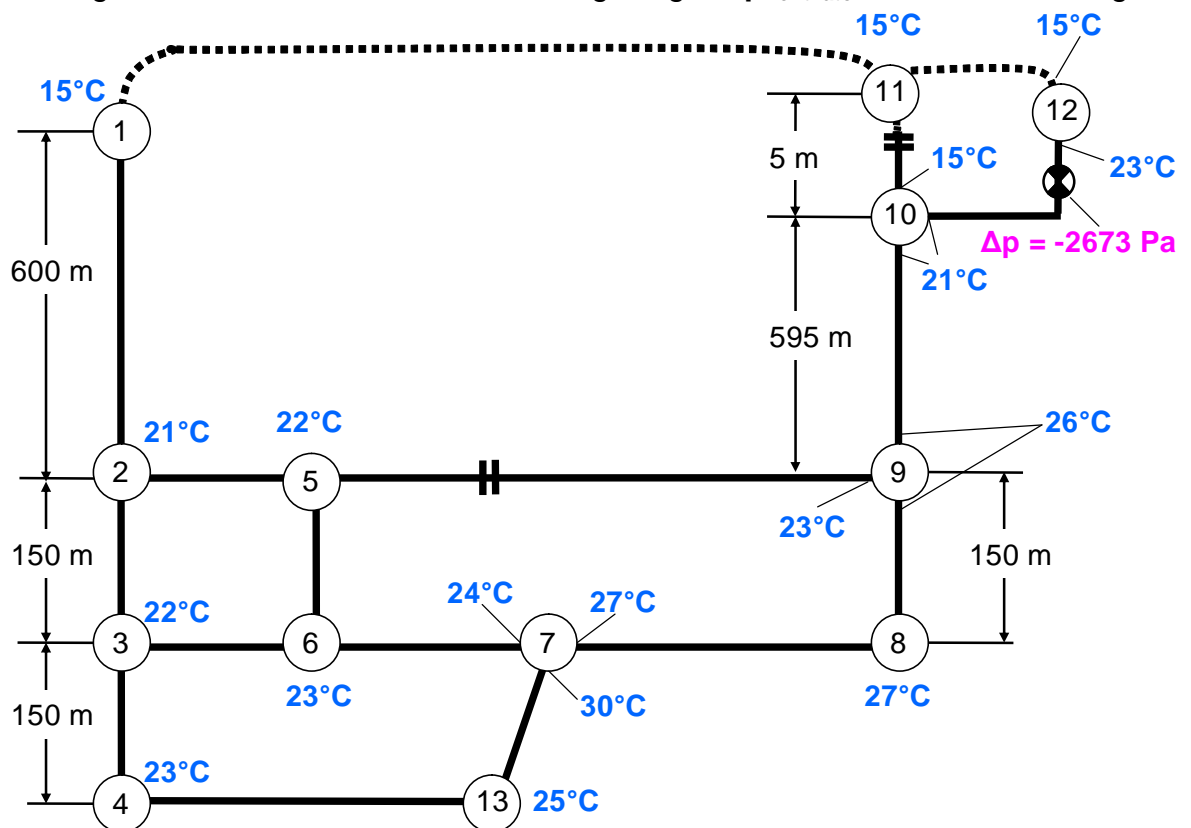


Bild 189: Schematische Darstellung eines kompressiblen Wettermodells

Der Algorithmus zur Berechnung dieses kompressiblen Wettermodells ist sinngemäß wie das von Hardy Cross vorgeschlagene Iterationsverfahren (siehe Kapitel 7.5.1). Hierbei muss jedoch zusätzlich für jeden einzelnen Knotenpunkt die Wetterdichte ρ , wie im Kapitel 7.6.3 beschrieben, bestimmt werden. Es würde den Rahmen dieses Aufsatzes bei weitem sprengen, wenn wiederum jeder einzelne Rechenschritt vorgeführt würde. Stattdessen wird in der Tabelle 19 das Ergebnis dieser kompressiblen Wetternetzrechnung vorgestellt.

Knotenpunkt		Teufen- unterschied	Temperatur		Umgebungs- druck		Dichte		Massen- strom	Volu- men- strom	Druck- ver- brauch	Wetter- leistung
Anfang	Ende		Anfang	Ende	Anfang	Ende	Anfang	Ende				
		m	°C	°C	hPa	hPa	kg/m ³	kg/m ³	kg/s	m ³ /s	Pa	kW
1	2	-600	15	21	995	1065	1,203	1,261	248,4	206,5	233	46,9
2	3	-150	21	22	1065	1083	1,261	1,278	179,7	142,5	30	4,2
2	5	0	21	22	1065	1063	1,261	1,254	68,7	54,5	199	10,8
3	4	-150	22	23	1083	1102	1,278	1,296	63,9	50,0	4	0,2
3	6	0	22	23	1083	1080	1,278	1,271	115,8	90,6	277	25,2
4	13	0	23	25	1102	1101	1,296	1,287	63,9	49,3	78	3,9
5	6	-150	22	23	1063	1080	1,254	1,271	59,2	47,2	97	4,5
5	9	0	22	23	1063	1044	1,254	1,228	9,5	7,6	1869	14,3
6	7	0	23	24	1080	1070	1,271	1,255	175,0	137,7	1019	141,2
7	8	0	27	27	1070	1064	1,242	1,235	238,9	192,3	646	124,6
8	9	150	27	26	1064	1044	1,235	1,216	238,9	193,5	162	31,6
9	10	595	26	21	1044	968	1,216	1,146	248,4	204,3	728	153,1
10	12	5	21	23	968	994	1,146	1,169	257,2	224,4	-2673	-593,7
11	10	-5	15	15	995	968	1,203	1,170	8,7	7,3	2731	20,1
13	7	150	25	30	1101	1070	1,287	1,230	63,9	49,7	1256	63,8
12	11	0	15	15	994	995	1,202	1,203	257,2	214,0	0	0,0
11	1	0	15	15	995	995	1,203	1,203	248,4	206,5	0	0,0

Tabelle 19: Ergebnis der Wetternetzrechnung für ein kompressibles Wettermodell nach Bild 190

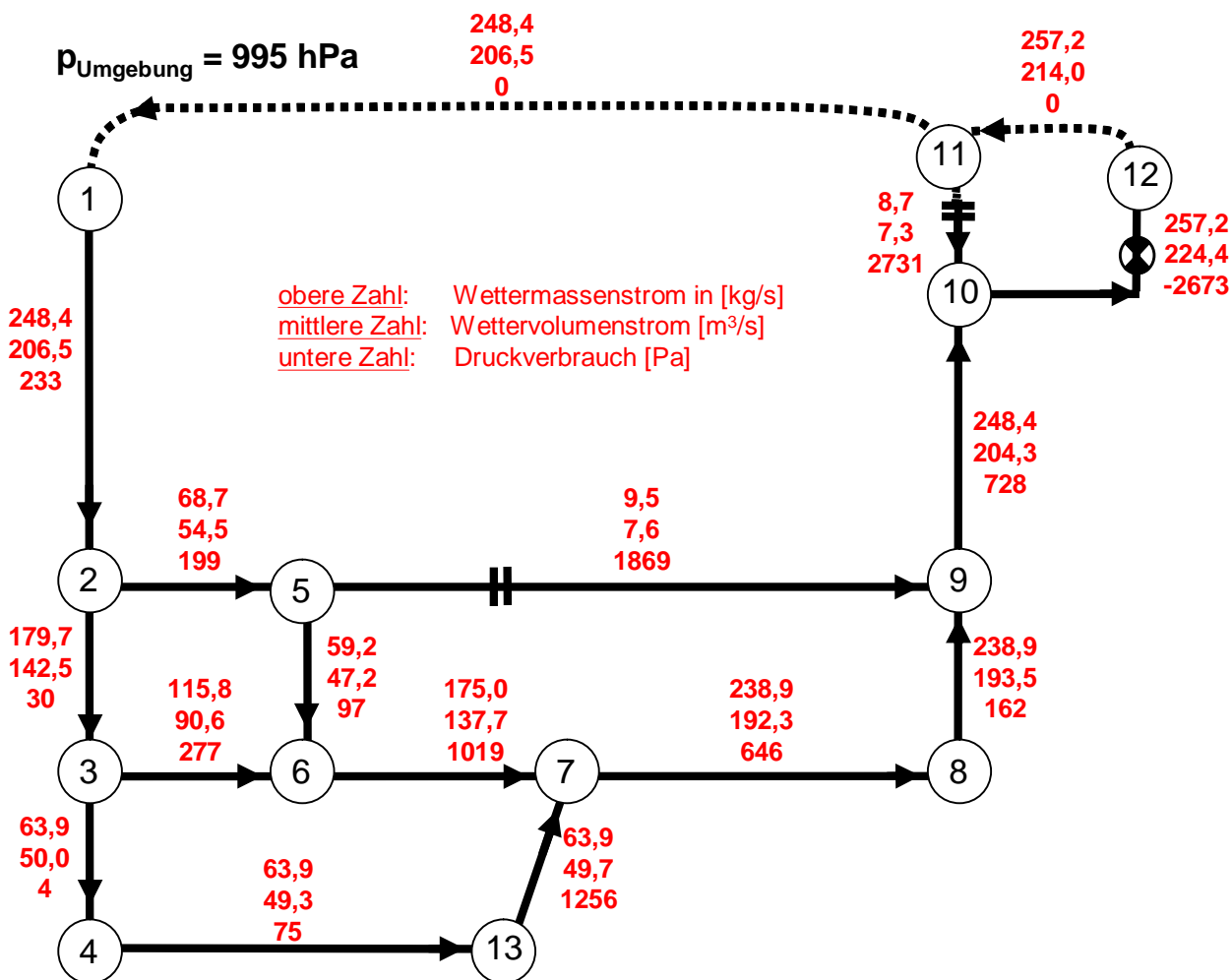


Bild 190: Ergebnis der Wetternetzrechnung für ein kompressibles Wettermodell nach Bild 190

Zur besseren Veranschaulichung sind im Bild 191 an jedem einzelnen Wetterweg der Wettermassenstrom, der Wettervolumenstrom sowie der Druckverbrauch angezeigt.

Verglichen mit dem Ergebnis den ansonsten gleichen Vorgaben hinsichtlich der Wetterwiderstände und der Druckerzeugung des Hauptgrubenventilators aus der inkompressiblen Wetternetzrechnung (Bild 173), strömt durch das kompressible Wettermodell ein deutlich höherer Wettervolumenstrom. Dies hat seine Ursache im natürlichen Auftrieb, der durch die Wärmeaufnahme der Wetter unter Tage erzeugt wird.

Schließlich sollen mit Hilfe des kompressiblen Wettermodells die Auswirkungen eines offenen Grubenbrandes simuliert werden. Dazu wird ein Brand mit einer Brandwettertemperatur von 800°C an den Fußpunkt des Wetterberges (Knotenpunkt 13) gedanklich nachgeahmt. Der Wetterberg hat eine Länge von 200 m und einen Teufenunterschied von 150 m. Am oberen Ende des Wetterberges vor dem Knotenpunkt 7 ist die Brandwettertemperatur auf 50°C abgekühlt. Nach der Vermischung mit dem Wetterstrom aus dem Wetterzweig $\overset{\text{A}}{\text{A}} - \overset{\text{E}}{\text{E}}$ beträgt die Wettertemperatur hinter dem Knotenpunkt 7 noch 33°C .

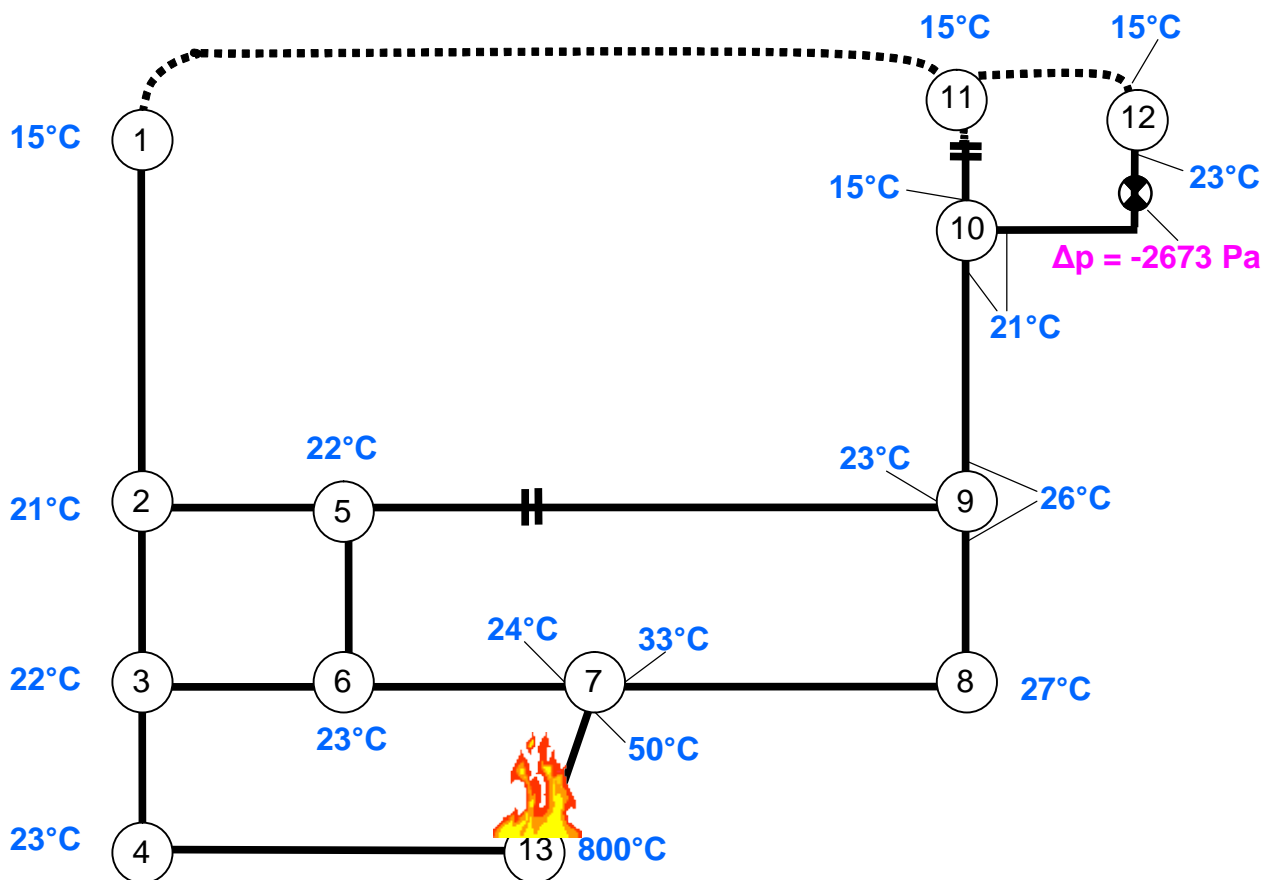


Bild 191: Schematische Darstellung eines kompressiblen Wettermodells mit offenem Grubenbrand

Das Ergebnis dieser Wetternetzrechnung ist in der Tabelle 20 angegeben. Zur besseren Veranschaulichung sind im Bild 192 an jedem einzelnen Wetterweg der Wettermassenstrom, der Wettervolumenstrom sowie der Druckverbrauch angezeigt.

Interessant bei diesem Ergebnis ist, dass der Massenstrom im brennenden Wetterberg leicht von $63,9 \text{ kg/s}$ auf $62,0 \text{ kg/s}$ gedrosselt wird. Es erfolgt also keine Massenstromzunahme. Aufgrund der sehr geringen Dichte der Brandwetter von $\rho = 0,357 \text{ kg/m}^3$ stellt sich ein deutlich erhöhter Wettervolumenstrom von $\dot{V} = 49,7 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $\dot{V} = 173,6 \text{ m}^3/\text{s}$ am unteren Ende des Wetterberges ein. Der Druckverbrauch in diesem Wetterweg steigt durch den Brand bedingt um 715 Pa auf $\Delta p = 1971 \text{ Pa}$ an. Dies entspricht der Größenordnung des Brandauf-

triebs nach Bild 188.

Knotenpunkt		Teufen- unter- schied	Temperatur		Umgebungs- druck		Dichte		Massen- strom	Volumen- strom	Druck- ver- brauch	Wetter- leistung
An- fang	Ende		Anfang	Ende	Anfang	Ende	Anfang	Ende				
		m	°C	°C	hPa	hPa	kg/m ³	kg/m ³	kg/s	m ³ /s	Pa	kW
1	2	-600	15	21	995	1065	1,203	1,261	247,3	205,5	231	46,3
2	3	-150	21	22	1065	1083	1,261	1,278	178,4	141,4	29	4,1
2	5	0	21	22	1065	1063	1,261	1,254	68,9	54,7	201	11,0
3	4	-150	22	23	1083	1102	1,278	1,296	62,0	48,5	4	0,2
3	6	0	22	23	1083	1081	1,278	1,271	116,3	91,0	279	25,5
4	13	0	23	800	1102	1101	1,296	0,357	62,0	47,8	115	8,6
5	6	-150	22	23	1063	1080	1,254	1,271	59,4	47,4	97	4,6
5	9	0	22	23	1063	1044	1,254	1,228	9,5	7,6	1876	14,4
6	7	0	23	24	1081	1070	1,271	1,255	175,7	138,3	1028	143,0
7	8	0	33	27	1072	1063	1,218	1,235	237,8	195,3	646	125,2
8	9	150	27	26	1063	1044	1,235	1,216	237,8	192,6	161	31,2
9	10	595	26	21	1044	968	1,216	1,146	247,3	203,4	721	151,0
10	12	5	21	23	968	994	1,146	1,169	256,0	224,4	-2673	-591,1
11	10	-5	15	15	995	968	1,203	1,170	8,7	7,3	2731	20,1
13	7	150	800	50	1101	1070	0,357	1,154	62,0	173,6	1971	161,8
12	11	0	15	15	994	995	1,201	1,203	256,0	213,0	0	0,0
11	1	0	15	15	995	995	1,203	1,203	247,3	205,5	0	0,0

Tabelle 20: Ergebnis der Wetternetzberechnung für ein kompressibles Wettermodell nach Bild 191

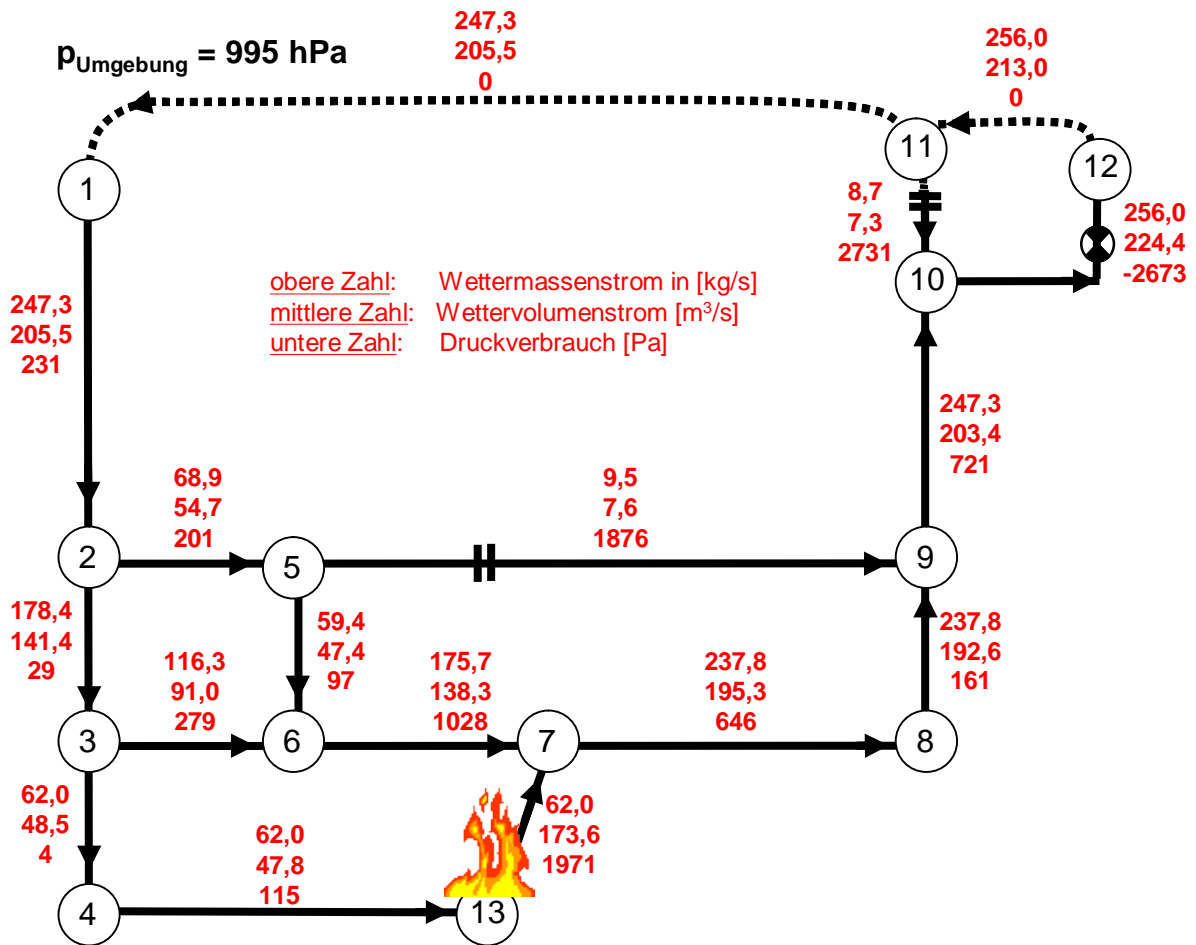


Bild 192: Ergebnis der Wetternetzberechnung für ein kompressibles Wettermodell nach Bild 191

7.7 Literaturverzeichnis

- [127] Cross, Hardy: *Analysis of flow in networks of conduits or conductors*. Urbana 1936. Bulletin. University of Illinois. Engineering Experiment Station. Nr. 286.
- [128] Düpre, Günter P. J. Hofbauer: *Die Berechnung von Wetternetzen bei Berücksichtigung der Kompressibilität*. Glückauf-Forschungshefte 35 (1974), H. 3, S. 95 – 102.
- [129] Flügge, Günther: *Druckgefälle zur Beurteilung der Stabilität von Wetterströmen*. Glückauf-Forschungshefte 30 (1969), H. 3, S. 135 – 145.
- [130] Greuer, Rudolf: *Die Berechnung von Wetternetzen mit elektronischen Digitalrechnern*. Glückauf 95 (1959), H. 12, S. 769 – 773.
- [131] Greuer, Rudolf: *Der Wetterwiderstand von Schächten*. Bergbau-Archiv 21 (1960), H. 1, S. 1 – 26.
- [132] Greuer, Rudolf: *Einige Angaben über den Wetterwiderstand von Grubenbauen*. Glückauf 96 (1960) H. 3, S. 165 – 171.
- [133] Greuer, Rudolf: *Die Bedeutung der Druckmessungen und die Darstellung ihrer Ergebnisse*. Glückauf 97 (1961), H. 18, S. 1076 – 1085.
- [134] Greuer, Rudolf: *Der natürliche Auftrieb*. Bergbau-Archiv 25 (1964), H. 3, S. 39 – 59.
- [135] Greuer, Rudolf: *Die wettertechnischen Grundlagen zur Berechnung und Planung von Wetternetzen*. Bergbauwissenschaften 11 (1964), H. 4, S. 73 – 80.
- [136] Greuer, Rudolf: *Der Einfluss von Änderungen an den Einbauten auf den Wetterwiderstand eines Schachtes*. Glückauf 101 (1965), H. 10, S. 602 – 607.
- [137] Hermanns, Peter: *Die klimatischen und sicherheitlichen Vorzüge und Nachteile der abfallenden Wetterführung*. Glückauf 89 (1953), H. 31/32, S. 773 – 782.
- [138] Linhard, Jan, R. Pollak: *Beeinflussung der Bewetterung durch fallendes Material in Schächten*. Glückauf-Forschungshefte 44 (1983), H. 1, S. 11 – 16.
- [139] Linhard, Jan, W. Heyn, W. Foit: *Auswirkungen von Fördergurt-Bränden in einem geneigten, fallend bewetterten Grubenbau*. Bergbau 8/87, S. 364 – 367.
- [140] Linhard, Jan: *Untersuchung der Grubenbewetterung hinsichtlich ihrer Stabilität*. Glückauf 126 (1990), Nr. 9/10, S. 434 – 441.
- [141] Mücke, Gerhard, R. Wehr: *Über den Wetterwiderstand von Abbaustrecken mit Rechteckquerschnitt und von Streben mit schreitendem Ausbau*. Glückauf 106 (1970), Nr. 4, S. 172 – 177.
- [142] Noack, Klaus, G. Fitzner: *Die Verbreitung der Abwärtsbewetterung im bundesdeutschen Steinkohlenbergbau*. Glückauf 108 (1972), Nr. 8, S. 303 – 305.
- [143] Pollak, Rolf, J. Thomek: *Das Zeichnen von Wetternetzplänen mit EDV-Anlagen*. Glückauf 116 (1980), Nr. 9, S. 437 – 441.
- [144] Pollak, Rolf: *Wetternetzberechnung unter Berücksichtigung der Kompressibilität der Wetter*. Glückauf-Forschungshefte 46 (1985) H. 2, S. 87 – 92.
- [145] Pollak, Rolf: *Bedeutung der Kompressibilität der Wetter für die praktische Wetternetz-berechnung*. Glückauf 121 (1985), Nr. 9, S. 681 – 686.
- [145] Pollak, Rolf, H.-J. Christensen: *Berechnung instationärer Strömungsvorgänge in Wetternetzen*. Glückauf-Forschungshefte 48 (1987), H. 1, S. 35 – 42.
- [146] Pollak, Rolf, H.-J. Christensen: *Bedeutung und Verfahren der Druckmessung in der Wettertechnik*. Bergbau 8/90, S. 338 – 343.

- [147] Pollak, Rolf, H.-J. Christensen, L. Luhmann: *Strömungsmodelle für den Bruchbau von Abbaubetrieben*. Glückauf-Forschungshefte 58 (1997), H. 3, S. 96 – 103.
- [148] Reuther, Ernst-Ulrich: *Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlenbergbaus*. Erster Band. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1989.
- [149] Schläger, Paul: *Strahlventilatoren zur Stabilisierung von Wetterströmen*. Glückauf-Forschungshefte 46 (1985) H. 5, S. 261 – 264.
- [150] Schmidt, Wilhelm, K. Grumbrecht, H. J. Böhm, H. Blümel: *Probleme der gegenseitigen Beeinflussung von offenen Grubenbränden und Wetterführung*. Glückauf-Forschungshefte 34 (1973), H. 6, S. 213 – 220.
- [151] Schubert, Eduard, W. Both: *Die Maßnahmen zur Stabilisierung der Bewetterung bei Auftreten offener Grubenbrände*. Glückauf 110 (1974), Nr. 1, S. 22 – 25.
- [152] Trutwin, Waclaw, A. Wala: *Über einige Probleme der automatischen Regelung der Grubenbewetterung*. Vortrag. Bergbau Ostrava '72, Ostrau 10.-15.04.1972.