

Elke Deux, Dr.-Ing., Geschäftsführerin, FILTRONtec GmbH, Starnberg/Bielefeld (D)

Gerd Johannemann, Dipl.-Ing., FILTRONtec GmbH, Starnberg/Bielefeld (D)

Karl Dickels, Dr. rer. pol., Geschäftsführender Gesellschafter, FILTRONtec GmbH, Starnberg/Bielefeld (D)

# Straßentunnel Central-Wan Chai Bypass, Hong Kong: Umweltschonende Lüftung mittels Luftfilteranlagen – Aufbau und Funktion der Luftfilter, Betriebssicherheit, Kosten

Der Tunnel Central-Wan Chai Bypass (CWB) ist Hauptbestandteil der neuen verkehrsstrategisch wichtigen Straßenverbindung (Länge 4,5 km) an der Nordseite von Hong Kong Island. Der Tunnel ist 3,7 km lang. Er besitzt zwei Fahrrohre mit je drei Fahrbahnen und eine kleinere Mittelröhre für Transport- und Rettungszwecke. 90.000 Fahrzeuge werden den Tunnel pro Tag nutzen. Baubeginn war 2009, die Inbetriebnahme ist für 2018 geplant. Für das Projekt sind Gesamtbaukosten von HKD 36 Mrd. (ca. € 3,9 Mrd.) veranschlagt. Die Tunnelröhre verläuft auf einer Teilstrecke unter der Wasseroberfläche. Für die Abführung der Tunnelluft aus den Fahrrohren besitzt der CWB-Tunnel drei Lüftergebäude: West-Mittel- und Ostgebäude. West- und Ostgebäude befinden sich an den beiden Ausgangsportalen. Dort wird die Tunnelluft abgesaugt und nach außen abgeführt. Im Mittelgebäude wird ein Teil der Luft gefiltert und in die Fahrrohre zurückgeführt und ein Teil nach außen abgeleitet. Der aus dem Tunnel abzuführende Luftvolumenstrom beträgt insgesamt 1.500 m<sup>3</sup>/s.

## 1 Eckdaten des CWB Straßenprojekts

Der Tunnel Central-Wan Chai Bypass (CWB) ist Hauptbestandteil der neuen, verkehrsstrategisch wichtigen Straßenverbindung an der Nordseite von Hong Kong Island. Sie besitzt eine Länge von 4,5 km und verläuft von Central über Wan Chai nach North Point.

Der Tunnel ist 3,7 km lang. Er besitzt zwei Fahrrohre mit je drei Fahrspuren und eine kleinere Mittelröhre für Transport- und Rettungszwecke. Wenn er fertig ist, bildet er als Teil der neuen Route 4 die Umgehung der viel befahrenen Straßen Connaught Road Central, Harcourt Road, Gloucester Road und Victoria Park Road. Die Tunnelröhre verläuft auf einer Teilstrecke unter der Wasseroberfläche.

Die Fahrzeugfrequenz (dvt) beträgt 90.000 Kfz. Das Projekt wurde 2009 begonnen. Die Inbetriebnahme des Tunnels ist für 2018 geplant. Die veranschlagten Gesamtbaukosten betragen 36 Mrd. HKD. Weitere Infos zum CWB-Projekt findet man unter: [www.cwb-hyd.hk/en](http://www.cwb-hyd.hk/en). Bild 1 zeigt den Streckenverlauf des CWB Straßenprojekts.

Während der Bauarbeiten wurde ein antikes Schiff im Baubereich der Trasse gefunden. Für die archäologische Untersuchung wurden die Bauarbeiten nahezu sechs Monate unterbrochen.

## Central-Wan Chai Bypass Road Tunnel, Hong Kong: Environmentally Gentle Ventilation with Air Filter Plant – Construction and Function of the Air Filters, Operational Safety, Costs

The Central-Wan Chai Bypass CWB tunnel is the main component of the new strategic road link (length 4.5 km) on the north side of Hong Kong Island. The tunnel is 3.7 km long. It has two driving tubes with three lanes each and a smaller centre tube for transport and rescue purposes. 90,000 vehicles will use the tunnel per day. The project started in 2009 and is planned to start operating in 2018. The construction costs are estimated to total HKD 36 billion (about € 3,9 billion). The tunnel tube runs under the surface of the water on a section of the tunnel. The CWB tunnel has three ventilation buildings: West, Central and East. The west and east buildings are located at the two exit portals. In the west and east buildings, the tunnel air is sucked off and led outwards. In the central building, part of the air is filtered and fed back into the driving tube and part of the air is diverted outwards. The total air volume flow to be discharged from the tunnel is 1,500 m<sup>3</sup>/s.

Bauherr und Hauptauftraggeber ist die Regierung der Sonderverwaltungszone Hongkong der Volksrepublik China. Unterauftragnehmer der Lüftergebäude ist Leighton Joint Venture (LJV) Ltd, Hongkong. Das Projekt wird von dem Ingenieurbüro AECOM Asia Company Limited, Hongkong, beratend begleitet.

## 2 Lüftungssystem des CWB Tunnels

Im Juni 2014 erhielt FILTRONtec Ltd, Hongkong als Unterauftrag von LJV den Auftrag für die Planung, Lieferung und Installation von acht Luftfilteranlagen zur Filterung der gesamten aus dem Tunnel Central-Wan Chai Bypass (CWB) abgeführten Tunnelluft. Damit wird erstmalig ein Tunnel in Hongkong komplett mit Abluftfilter ausgerüstet. Durch den Einsatz der Luftfiltertechnik entfallen hohe Abluftkamine und Luftkanäle. Die Entfernung der Schadstoffe aus der Tunnelabluft soll verhindern, dass durch die neue Verkehrsstraße die regionale Luftschadstoffbelastung ansteigt.

## Lüftungssystem mit Abluftfilterung



Bild 1 Streckenverlauf des Central-Wan Chai Bypass-Tunnels

Die Lüftung des Tunnels ist eine Halbquerlüftung. Die Zuführung von Frischluft erfolgt über einen Deckenkanal und die Ableitung über die Fahrrohre.

Für die Abführung der Tunnelluft aus den Fahrrohren besitzt der CWB-Tunnel drei Lüftergebäude: West-, Mittel- und Ostgebäude. West- und Ostgebäude befinden sich an den beiden Ausgangsportalen. Im West- und Ostgebäude wird die Tunnelluft abgesaugt und nach ihrer Filterung nach außen abgeführt. Im Mittelgebäude wird ein Teil der gefilterten Luft in die Fahrrohre zurückgeführt und ein Teil nach außen abgeleitet. Der aus dem Tunnel abzuführende und zu filternde Luftvolumenstrom beträgt insgesamt  $1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Die Abluftmenge teilt sich wie folgt auf die Lüftergebäude auf:

- Westgebäude:  $250 \text{ m}^3/\text{s}$
- Mittelgebäude:  $625 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ostgebäude:  $625 \text{ m}^3/\text{s}$

Für die Luftförderung in den Lüftergebäuden sind insgesamt 15 Ventilatoren eingebaut. Hiervon sind vier Standby-Ventilatoren.

Tabelle 1 zeigt die in den drei Lüftergebäuden zu filternden Luftvolumenströme, den maximalen Druckverlust und die Anzahl der Ventilatoren.

### 3 Filtertechnologie

Die Filterung der Abluft erfolgt in zwei Stufen. In einem Feinstaubfilter werden zunächst die Partikel aus der Abluft entfernt.

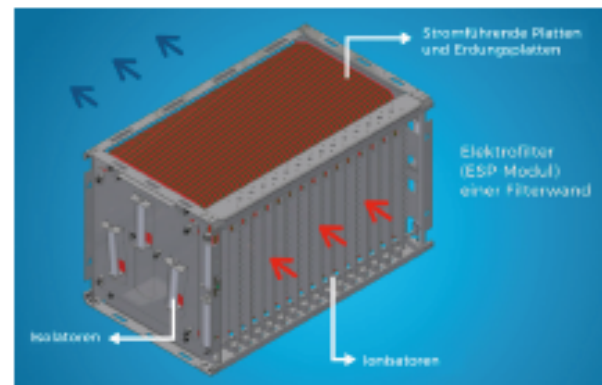


Bild 2 Elektrostatisches Filtermodul

In einem nachgeschalteten Filter erfolgt eine Abscheidung von Stickstoffdioxid und anderen Schadgasen wie u. a. Ozon und Benzole.

Der Feinstaubfilter ist ein zweistufiger speziell entwickelter Elektrofilter. Er besteht aus einem Ionisator und einem Kollektor und entfernt mehr als 85 % der Ruß- und Staubpartikel im Größenbereich von  $0,1$  bis  $10 \mu\text{m}$  aus dem Luftstrom. Dazu werden die Partikel im Ionisator elektrisch aufgeladen und anschließend am Kollektor abgeschieden. Ionisator und Kollektor sind in einem kompakten Filtermodul zusammengefasst. Die Abmessungen eines Filtermoduls betragen  $600 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm} \times 590 \text{ mm}$ . Bild 2 zeigt den Aufbau eines Filtermoduls.

Filtersegmente in den Lüftungsbauwerken	Durchflussleistung	maximaler Druckverlust	Hochleistungsventilatoren	Anmerkungen
WVB-APS-001	$250 \text{ m}^3/\text{s}$	850 Pa	WVB-TVF-004 bis 005	kein Standby
MVB-APS-001	$250 \text{ m}^3/\text{s}$	850 Pa	MVB-TVF-007 bis 008	MVB-TVF-010 (Standby)
MVB-APS-002	$125 \text{ m}^3/\text{s}$	850 Pa	MVB-TVF-009	MVB-TVF-012 (Standby)
MVB-APS-003	$125 \text{ m}^3/\text{s}$	850 Pa	MVB-TVF-011	MVB-TVF-013 (Standby)
EVB-APS-001 A, 001B und 001	$625 \text{ m}^3/\text{s}$ total	850 Pa	EVB-TVF-004 bis 009 (5 Ventilatoren in Betrieb)	EVB-TVF-004 bis 009 (1 Ventilator Standby)

Tabelle 1 Aufteilung der Luftvolumenströme auf die Filteranlagen



Bild 3 Montage eines Partikelfilters im Westgebäude des Central-Wan Chai Bypass-Tunnels

Die Filtermodule werden in einem Gerüst zu einer Filterwand montiert. Bild 3 zeigt eine solche Filterwand während des Aufbaus im Westgebäude. Durch den modularen Aufbau ist eine Anpassung an beliebige Raumquerschnitte möglich.

Der Partikelfilter ist für eine Luftgeschwindigkeit im Kanal von 2 bis 7 m/s ausgelegt. Der Druckverlust beträgt weniger als 100 Pa.

Die Abscheideraten für Partikel der Größen PM1, PM2,5 und PM10 liegen abhängig von der Luftgeschwindigkeit zwischen 80 und 95 %.

Sind die Kollektorplatten des Elektrofilters mit Feinstaub beladen, werden sie über Sprühdüsen mit Wasser gereinigt. Während des Waschvorgangs sind die Filtermodule spannungsfrei geschaltet. Um die Stillstandszeit des Filters kurz zu halten, erfolgt eine Vortrocknung mit Druckluft über die Sprühdüsen. Der Waschvorgang läuft vollautomatisch ab. Er dauert circa 30 Minuten und findet während der verkehrsfreien Nachtzeit statt.

Die abgewaschenen Filteranlagerungen werden in einer Ultrafiltrationsanlage aus dem Waschwasser herausgefiltert, das zu 90 % wieder für eine Filterreinigung verwendet wird. Der Wasserfilter arbeitet ohne Hilfsstoffe oder Zusatzstoffe.

Die Abscheidung von Stickstoffdioxid und von anderen Schadgasen wie Ozon oder Benzole erfolgt mit Aktivkohle, die eine sehr hohe Abscheidefähigkeit für Stickstoffdioxid besitzt. Die speziell behandelte Aktivkohle adsorbiert das Stickstoffdioxid aus dem Luftstrom. Gleichzeitig wird durch katalytische Dissoziation im Filter ein Teil des Stickstoffdioxids in unschädlichen Stickstoff und Sauerstoff umgewandelt. Die Filterkohle ist zu zylindrischen Stäbchen, sogenannten Pellets, mit einem Durchmesser von 4 mm gepresst. Dank ihrer porösen Struktur besitzt Aktivkohle eine sehr große spezifische Oberfläche. Die aktive Fläche von einem Gramm Kohle beträgt circa 1.000 m<sup>2</sup>.

Für die Gasabscheidung durchströmt die Tunnelluft ein Filterbett aus Aktivkohle mit einer üblichen Bettiefe von 400 mm. Die vertikale Strömungsgeschwindigkeit beträgt 0,4 bis 0,5 m/s. Die Abscheideraten des Aktivkohlefilters für Stickstoff, Ozon und Benzole betragen 85 %.

Die Mindestnutzungsdauer der Aktivkohle im Filter hängt vom Verkehrsaufkommen im Tunnel und von der Schadgaskon-

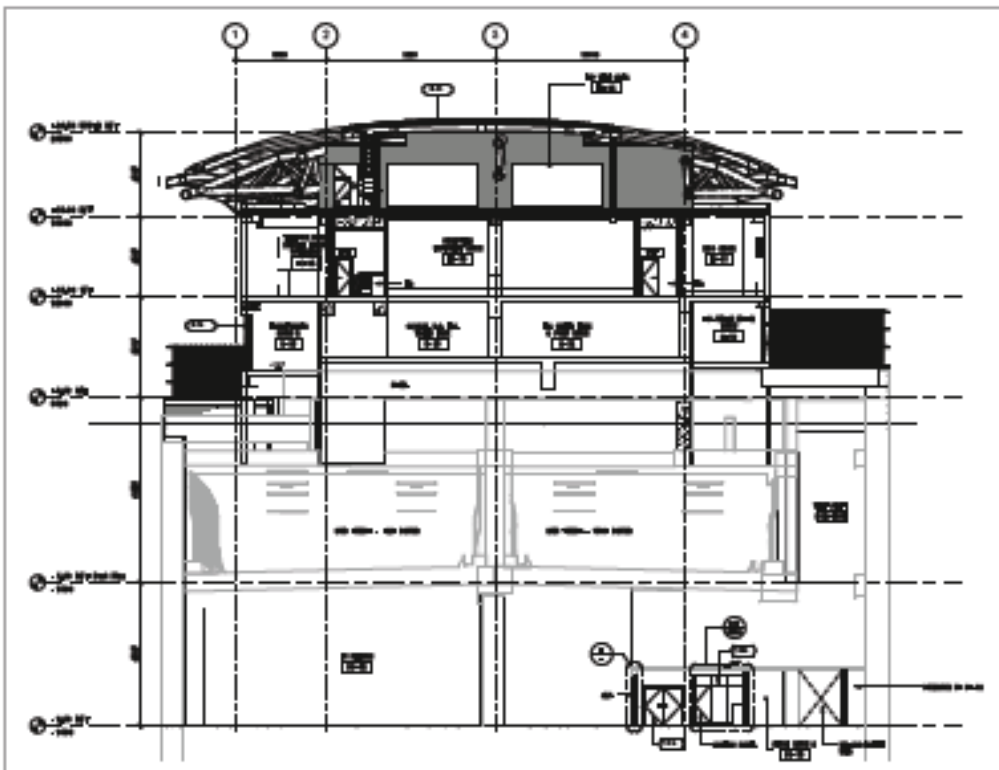


Bild 4 Querschnitt Westgebäude

## Lüftungssystem mit Abluftfilterung

zentration in der Tunnelluft ab. Für die maximal mögliche Nutzungsdauer der Filterkohlen im Tunnelbetrieb liegen noch keine abschließenden Erfahrungen vor. Auch nach einem zehnjährigen Betrieb musste bisher in keinem Tunnel die Filterkohle ausgetauscht werden. Versuche zeigen, dass im Betrieb eine teilweise Regenerierung der Filterkohle stattfindet.

Auf dem Markt werden geeignete Aktivkohlen von vielen Herstellern angeboten. Für eine Auswahl sind vorlaufende Labortests dringend zu empfehlen.

### 4 Ausführung der Filteranlagen

Nachfolgend wird beispielhaft die Luftfilteranlage im Westgebäude und die Integration in das Filtergebäude dargestellt. Bild 4 zeigt einen Querschnitt durch das Westgebäude. Die Räume für die Unterbringung der Luftfilter befinden sich unterhalb der Fahrbahn. Für Personen und Material ist ein Aufzug eingebaut. Die belastete Tunnelluft wird in der Weströhre seitlich aus der Tunnelröhre abgesaugt von oben über einen Luftschacht in den Filterraum geführt.

Bild 5 zeigt die Luftführung im Westgebäude WVb und die bauliche Integration des Luftfilters in den Filterraum. Um eine möglichst gleichmäßige Anströmung der Partikelfilter zu erreichen, sind an Umlenkungen von 90° im Luftkanal Leitbleche angeordnet. Die optimale Größe und die Anordnung wurden mit CFD-Berechnungen (CFD – Computational Fluid Dynamics) ermittelt.

### 5 Werkstoffe

Alle Komponenten und Bauteile der Filteranlage, die mit kontaminierte Tunnelluft in Berührung kommen, wie Elektrofilter,

Rohrleitungen, Düsen und Gerüste sind aus hochwertigem Edelstahl V4A (AISI 316 Ti) mit einer langen Lebensdauer hergestellt.

Vor den Aktivkohlefiltern sind Rolllöre angeordnet, die vor Beginn eines Waschprogramms selbsttätig schließen und nach Beendigung wieder öffnen. Sie verhindern, dass während des Waschvorgangs Wassertropfen auf die Aktivkohle geblasen werden, welche die Abscheideeffizienz der Kohle verringern.

Wasserbehälter, Wasseraufbereitung, Kompressor, Pumpen, Schalt- und Steuerschränke sind in einem Technikraum neben dem Filterraum untergebracht, was die Wartung und die Instandhaltung erleichtert.

Die Abluft durchströmt zunächst einen Vorfilter, der gleichzeitig als Schutzgitter dient. Anschließend strömt die Luft durch den aus Elektrofiltermodulen aufgebauten Partikelfilter. Das am Boden gesammelte Waschwasser mit den abgewaschenen Filteranlagerungen wird in einen Sammelbehälter im Technikraum gepumpt und nach dem Durchlaufen des Wasserfilters in einem Reinwasserbehälter zur Wiederverwendung gesammelt. Das im Filterrest verbleibende oder durch Verdunstung verlorene Wasser wird mit Frischwasser nachgefüllt.

Anschließend durchströmt die Abluft einen Aktivkohlefilter zur Abscheidung von Stickstoffdioxid, Ozon, Benzol und anderen Schadgasen. Der Aktivkohlefilter besteht aus mehreren Segmenten für die Aufnahme der Filterkohle. Ein Filtersegment besteht aus zwei parallel angeordneten gelochten Metallwänden mit einem Abstand von 400 mm, der somit die Tiefe des Filterbetts bildet. Die Aktivkohle wird in den Zwischenraum der Metallwände eingefüllt. Für eine Optimierung der Luftströmung sind die Filtersegmente in W-Form im Luftkanal angeordnet. Bild 6 zeigt den schematischen Aufbau eines Gasfilters im Westgebäude.

Die Filtersegmente werden mit einer vertikalen Luftgeschwindigkeit von 0,4 bis 0,5 m/s von der Tunnelluft durchströmt.

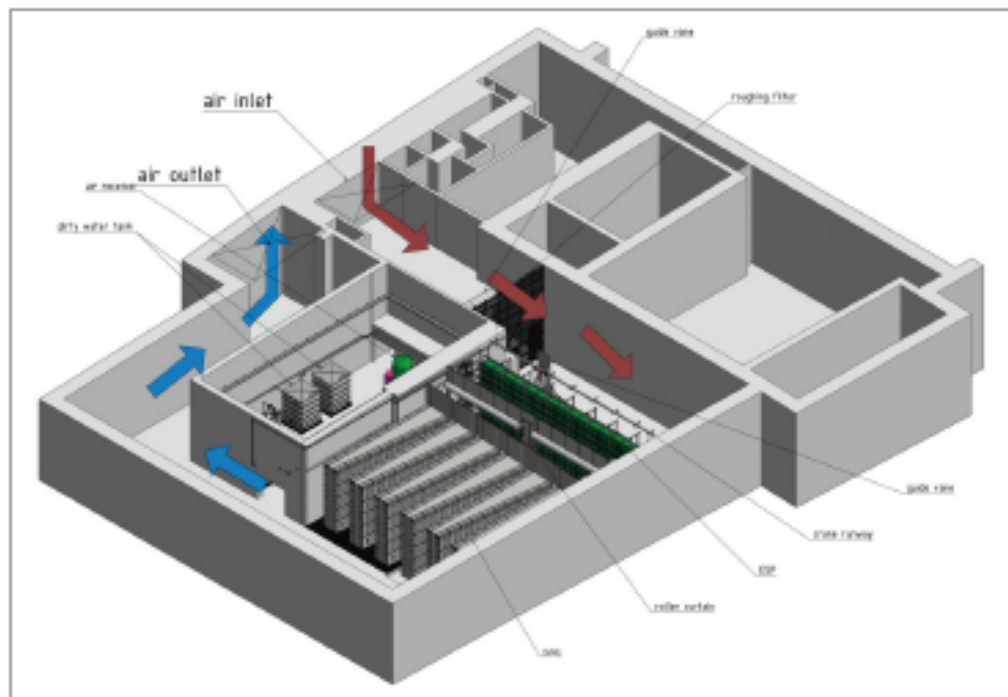


Bild 5 Integration der Luftfilteranlage in das Westgebäude

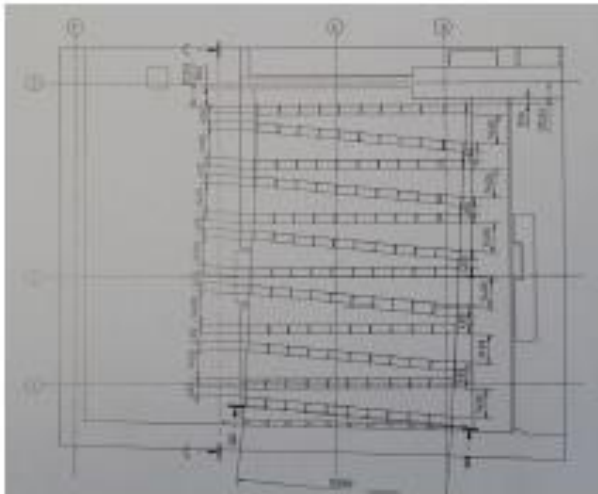


Bild 6 Aufbau des Aktivkohlefilters im Westgebäude des CWB-Tunnels

Der Druckverlust des Aktivkohlefilters beträgt ca. 750 Pa bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s.

Für die Filterung des gesamten Luftvolumenstroms von 1.500 m<sup>3</sup>/s sind ca. 900 t Filterkohle erforderlich. Für die Befüllung und die Entleerung der Filtersegmente hat der Hersteller in Zusammenarbeit mit der Applied Technology Integration (ATI) Limited, Hongkong, ein Verfahren entwickelt, das einen Austausch der Filterkohle in einer kurzen Zeit ermöglicht.

Der Partikelfilter ist für eine Betriebstemperatur bis 400 °C ausgelegt und wurde in Brandversuchen getestet. Die Aktivkohlen sind für einen Betrieb bis 200 °C zugelassen.

Bei einem Brandfall im Tunnel werden die Rauchgase im Westgebäude nicht durch den Filter geführt, sondern direkt nach außen abgeleitet. Die Filteranlage ist in diesem Fall durch eine Brandschutzklappe (nicht abgebildet) abgeschottet.

## 6 Messtechnik

Vor dem Elektrofilter und hinter dem Aktivkohlefilter sind Messstationen im Filterraum aufgestellt, die folgende Daten erfassen:

- Meteorologische Daten (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur),
- Partikelkonzentrationen PM2,5 und PM10,
- NO<sub>2</sub>-Konzentration.

Die Messdaten können im Technikraum und in der Tunnelzentrale abgelesen werden.

Bild 7 zeigt den Einbau des Luftfilters in das Ostgebäude (EVB). Der Luftvolumenstrom beträgt 625 m<sup>3</sup>/s. Der Filter ist in drei Filtersegmente unterteilt, die unabhängig betrieben werden können. Die Abbildung verdeutlicht die Dimension der Filteranlage. Aufbau und Funktion entsprechen dem Filter im Westgebäude.

Der gesamte Luftstrom von 625 m<sup>3</sup>/s ist wie folgt auf die drei Filtersegmente aufgeteilt: APS-001A = 187 m<sup>3</sup>/s, APS-001B = 208 m<sup>3</sup>/s, APS-001C = 203 m<sup>3</sup>/s.

Die Filteranlage ist wie im Westgebäude unterhalb der Fahrbahn angeordnet. Die Abluft wird von oben angesaugt und die gefilterte Luft nach oben abgegeben.

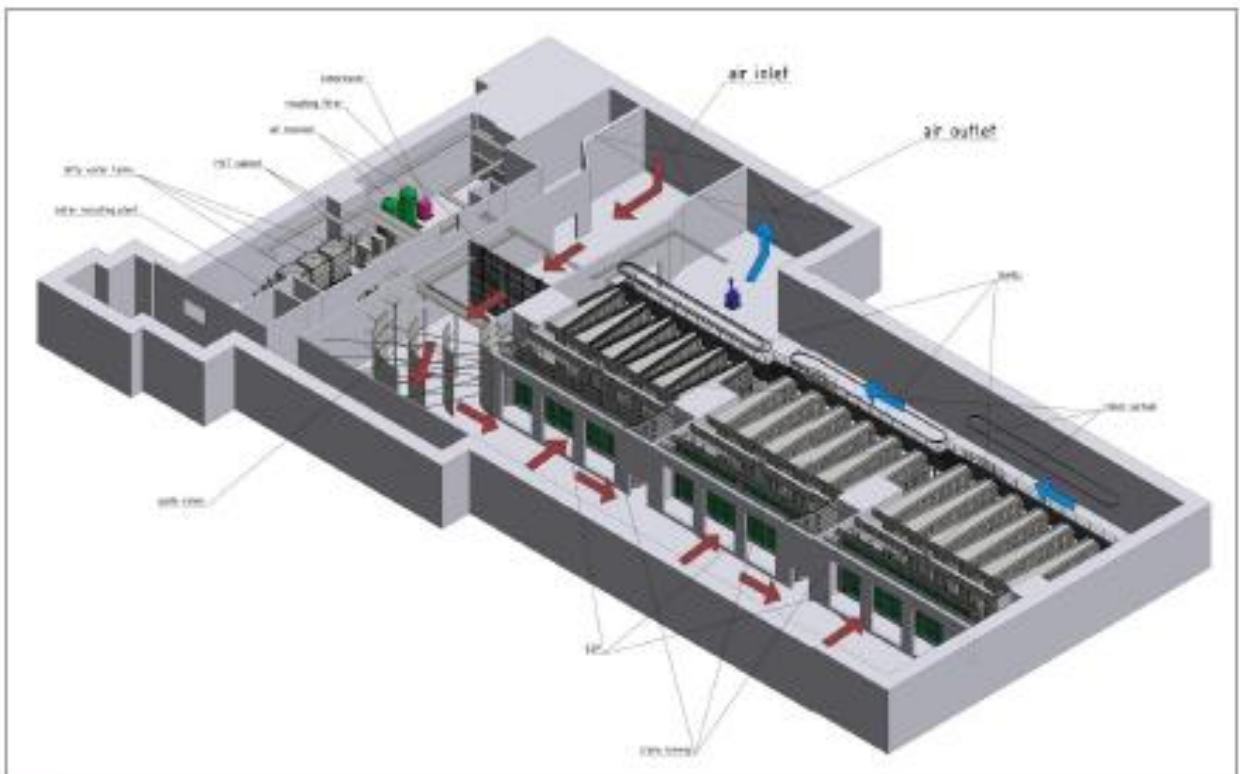


Bild 7 Integration der Luftfilteranlage im Ostgebäude (EVB)

## Lüftungssystem mit Abluftfilterung

	westl. Lüftungsgebäude	mittleres Lüftungsgebäude	östliches Lüftungsgebäude
Feinstaubbelastung für ESP-Filter	250 m³/s @ 0,115g/s für 4 h/Tag 125 m³/s @ 0,06g/s für 20 h/Tag	625 m³/s @ 0,3g/s für 4 h/Tag 375 m³/s @ 0,18g/s für 15 h/Tag 125 m³/s @ 0,06g/s für 5 h/Tag	625 m³/s @ 0,226g/s für 4 h/Tag 375 m³/s @ 0,135g/s für 15 h/Tag 125 m³/s @ 0,045 g/s für 5 h/Tag
NO <sub>2</sub> -Belastung für DeNO <sub>x</sub> -Filter	250 m³/s @ 1 ppm für 4 h/Tag 125 m³/s @ 1 ppm für 20 h/Tag	625 m³/s @ 0,5 ppm für 4 h/Tag 375 m³/s @ 0,5 ppm für 15 h/Tag 125 m³/s @ 0,5 ppm für 5 h/Tag	625 m³/s @ 0,5 ppm für 4 h/Tag 375 m³/s @ 0,5 ppm für 15 h/Tag 125 m³/s @ 0,5 ppm für 5 h/Tag

Tabella 2 Zu erwartende Schadstoffkonzentrationen

## 7 Regelung und Steuerung

Für die Regelung und Steuerung jeder Filteranlage ist eine SPS-Regeltechnik mit einem Touchscreen eingesetzt. Der Regel- und Steuerschrank ist im Technikraum aufgestellt. Von hier werden Signale wie Störmeldungen und die wesentlichen Betriebsdaten in die Tunnelbetriebszentrale übertragen.

## 8 Kosten der Filteranlage

Die Investitionen der Luftfilteranlagen betragen weniger als 1 % der Projektkosten. Sie teilen sich wie folgt auf:

- Feinstaubfilter: 75 % kompl. inkl. Hilfsaggregate,
- Aktivkohlefilter: 15 %,
- Aktivkohle: 10 %.

Zu erwartende Lebensdauer:

- Statistische Bauteile: 40 Jahre,
- Elektronische Komponenten: 10 Jahre,
- Mechanische Komponenten (Pumpen, Kompressor, Ventile): 15 Jahre.

Nachfolgend sind angenähert die Jahresbetriebskosten der gesamten Filteranlagen ermittelt. Die Berechnungen beruhen auf Messungen an einer Filteranlage mit einem Luftvolumenstrom von 200 m<sup>3</sup>/s.

Ausgangsdaten:

- Max. Druckverlust: 850 Pa,
- Luftvolumenstrom: 1.500 m<sup>3</sup>/s,
- Nutzungsdauer/Tag: 20 h,
- rechn. Vollaststunden/Tag: 6 h,
- Jahresbetriebsdauer: 300 Tage,
- Ventilatorwirkungsgrad: 0,78,
- Strompreis: 0,15 €/kWh.

Bei einer Hochrechnung auf den Luftvolumenstrom von 1.500 m<sup>3</sup>/s ergeben sich angenähert Betriebskosten von 480.000 €/Jahr bzw. 41.000 €/Monat. Nicht berücksichtigt sind Kostenminderungen durch Rationalisierungseffekte. So sind für die acht Filteranlagen nur drei Technikzentralen erforderlich.

## 9 Filtereffizienz

Nachfolgend ist die Filtereffizienz in Form der aus der Luft abgetrennten Mengen von Feinstaub und Stickstoffdioxid ermittelt.

Feinstaubmengen	Lüftungsgebäude
1.594 kg	WVB
4.032 kg	MVB
3.028 kg	EVB
8.654 kg	Gesamt

Tabella 3 Ermittelte Feinstaubmengen an den Lüftungsgebäuden.

Lüftungsgebäude	Stickstoffdioxid
WVB	6.176 kg
MVB	2.889 kg
EVB	2.889 kg
Gesamt	11.954 kg

Tabella 4 Ermittelte Mengen Stickstoffdioxid

Tabella 2 zeigt die zu erwartenden Konzentrationen von Feinstaub und Stickstoffdioxid an den drei Lüftungsgebäuden bei unterschiedlichen Verkehrsbelastungen des Tunnels über den Tagesverlauf. Aus den Werten wurden die an den Lüftungsgebäuden jährlich emittierten Feinstaubmengen berechnet (Tabella 3). Bei einer Abscheiderate von 85 % werden mit den Luftfilteranlagen jährlich ca. 7.400 kg Feinstaub aus der Umgebungsluft des Tunnels CWB entfernt.

In gleicher Weise wurden die emittierten Mengen an Stickstoffdioxid ermittelt. Hierzu wurden zunächst die ppm-Werte in Milligramm pro m<sup>3</sup> umgerechnet. Tabella 4 enthält die jährlich an den Lüftungsgebäuden emittierten Mengen Stickstoffdioxid. Bei einer Abscheiderate von 85 % werden jährlich 9.651 kg Stickstoffdioxid mit dem Aktivkohlefilter aus der Umgebungsluft entfernt.

## 10 Ausblick

Wie das Beispiel CWB-Tunnel zeigt, verringern Abluftfilter in Straßentunneln nicht nur die Schadstoffemissionen an den Portalen und Luftauslässen, sondern verbessern auch die regionale Luftqualität im Bereich der Verkehrsstraße. Die Investitionen sind mit 1 % der Tunnelbaukosten vergleichsweise niedrig. Die Betriebskosten werden von dem noch hohen Druckverlust (750 Pa) des Gasfilters bestimmt. Sie sind jedoch in Anbetracht des enormen Beitrags, den Abluftfilter zum Gesundheitsschutz der Bewohner leisten, sicherlich vertretbar.

Die weitere Entwicklung der Filtertechnologie ist auf eine Verringerung der Betriebskosten gerichtet. So soll der Druckverlust am Gasfilter nahezu halbiert werden.