

**Zeitschrift:** Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2007)

**Heft:** 3

**Artikel:** Analisi e controllo delle emissioni nell'atmosfera

**Autor:** Bettelini, Marco

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-133725>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 20.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



# Analisi e controllo delle emissioni nell'atmosfera

Marco Bettelini

## Emissioni e immissioni

Nuove infrastrutture di traffico vengono spesso realizzate per ridurre l'impatto del traffico sull'ambiente e sulla popolazione. Ad un beneficio globale corrisponde spesso un potenziale svantaggio locale. Così ad esempio nel caso delle immissioni legate a nuove gallerie. Le immissioni lungo la tratta vengono ridotte in modo drastico, mentre in vicinanza dei portali e di eventuali stazioni di ventilazione occorre adottare misure costruttive, tecniche e operative per controllare in modo ottimale il carico addizionale.

## Obiettivi

Le gallerie sono considerate impianti stazionari ai sensi dell'OIAT, mentre le strade sono considerate infrastrutture per i trasporti (Art. 2 OIAT). Le esigenze e limitazioni risultanti dall'OIAT concernono in entrambi i casi tanto le emissioni quanto le immissioni. Le immissioni massime sono fissate nell'Ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIAT). I principali valori rilevanti per infrastrutture di traffico sono:

- Diodio d'azoto ( $\text{NO}_2$ ):  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (valore annuo medio);  
 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (95% dei valori medi su  $\frac{1}{2}$  h di un anno)
- Ozono ( $\text{O}_3$ ):  
 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (98% dei valori medi su  $\frac{1}{2}$  h di un mese)
- Polveri fini in sospensione (PM10):  
 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Valore annuo medio);  
 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Valore medio su 24 h).

## Situazione attuale

La qualità dell'aria in Svizzera è monitorata da anni attraverso, tra l'altro, la rete di misura NABEL, che comprende 16 stazioni ripartite sull'intero territorio nazionale. La collocazione delle stazioni è rappresentativa per città (presso arterie di traffico e parchi), agglomerazioni, campagna ed alta montagna (Jungfraujoch). I dati attuali sono riassunti nella Fig. 1. Le immissioni sono in costante diminuzione, ma si registrano tuttora problemi a livello di  $\text{NO}_2$ , PM10 e Ozono. Per tutte queste sostanze il traffico motorizzato costituisce una delle cause principali.

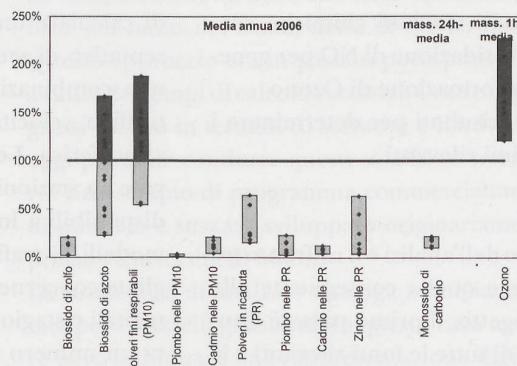


Fig. 1 – Valori di inquinamento attuali in Svizzera (dati NABEL)

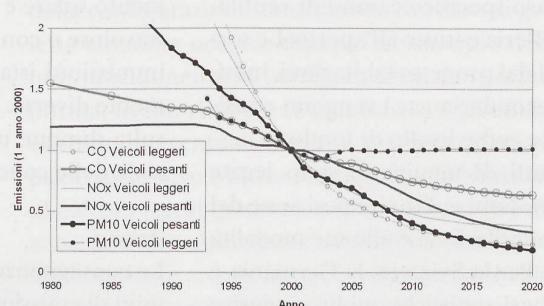


Fig. 2 – Emissioni specifiche del parco veicoli svizzero (1 = anno 2000, dati HBEFA 2.1)

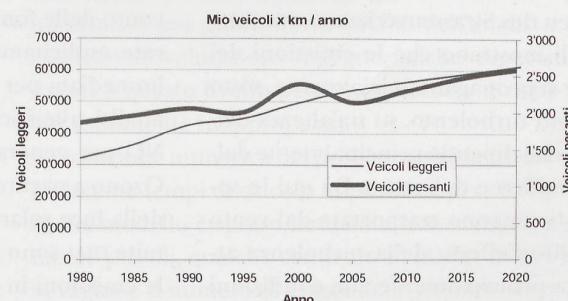


Fig. 3 – Evoluzione del numero di km percorsi in Svizzera

## Emissioni dei veicoli a motore

Il progresso tecnico dei veicoli a motore è stato notevole anche a livello di emissioni, Fig. 2. I miglioramenti tecnici sono però almeno parzialmente vanificati dall'evoluzione dei km percorsi, Fig. 3.

## **Propagazione degli inquinanti e calcolo delle immissioni**

### *Approccio*

La base per la verifica del rispetto delle prescrizioni legali per una data situazione è il calcolo delle immissioni. Le esigenze di fondo sono:

- modellizzazione accurata di tutte le sorgenti rilevanti per il progetto considerato
- calcolo della dispersione degli inquinanti per tutte le condizioni rilevanti. Occorre tenere in considerazione in particolare il traffico e le condizioni meteorologiche determinanti;
- analisi delle eventuali reazioni chimiche rilevanti, ad esempio l'ossidazione di NO per generare NO<sub>2</sub> oppure la formazione di Ozono
- analisi statistica dei risultati per determinare i valori medi e massimi rilevanti.

### *Emissioni*

Un obiettivo primario dell'analisi è il raffronto tra la situazione iniziale e quella conseguente alla realizzazione del progetto. Il primo passo è dunque l'identificazione di tutte le fonti rilevanti e la loro modellizzazione. Occorre considerare tutte le emissioni che vengono influenzate dal progetto in esame, nel caso specifico camini di ventilazione, portali di galleria e tratte all'aperto. Le sorgenti indipendenti dal progetto (abitazioni, industrie, rete viaria secondaria ecc.) vengono considerate globalmente come livello di fondo.

Le sorgenti rilevanti di inquinanti sono legate principalmente ai volumi e alla composizione del traffico, al tipo di ventilazione e alle sue modalità di funzionamento. Per la Svizzera, la Germania e l'Austria esistono basi statistiche molto estensive per la valutazione delle emissioni del traffico, in funzione della pendenza longitudinale, della velocità e della composizione del traffico («Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs», HBEFA). I dati disponibili mostrano che le emissioni dei veicoli a motore si propagano inizialmente, sotto l'influsso del moto turbolento, su un'altezza dell'ordine di 2-8 m che dipende principalmente dalla velocità del traffico e dal vento. Da qui le sostanze inquinanti vengono trasportate dal vento e diffondono sotto l'effetto della turbolenza atmosferica, legata principalmente alle condizioni meteorologiche. Altre sorgenti, quali i portali della galleria o eventuali camini di ventilazione, vengono normalmente trattate come sorgenti volumetriche di grandezza e forma variabili, sulla base di dati sperimentali rappresentativi.

### *Propagazione degli inquinanti*

A livello di modellizzazione gli approcci possibili sono:

### *- Approcci empirici*

### *- Modelli di tipo gaussiano*

*- Modelli basati sulla simulazione tridimensionale.* Approcci empirici, quali il modello MluS-92 tedesco, non richiedono il calcolo della propagazione degli inquinanti. Essi sono adatti per valutazioni preliminari veloci di determinate configurazioni.

I modelli più sviluppati verranno presentati brevemente nei prossimi capitoli. Un aspetto comune a questi livelli di modellizzazione è la necessità di calcolare un numero statisticamente rappresentativo di scenari, corrispondenti ciascuno ad una combinazione particolare di condizioni di traffico, velocità e direzione del vento e stabilità atmosferica. Le condizioni meteorologiche rilevate da stazioni automatiche sono normalmente disponibili a intervalli orari. Allo stesso modo i modelli di traffico consentono previsioni dettagliate concernenti le variazioni giornaliere, settimanali e stagionali dei flussi di traffico. Ne risulta un numero elevato di scenari spesso radicalmente diversi tra di loro. La dispersione atmosferica in condizioni di vento con forte irraggiamento solare è molto più elevata che in giornate nuvolose o con poco vento. A parità di traffico le immissioni istantanee risultanti sono completamente diverse. Dal calcolo di ciascun scenario risulta dunque una particolare distribuzione spaziale delle concentrazioni degli inquinanti.

### *Analisi*

Le conseguenze di un particolare progetto in termini di emissioni devono essere valutate sulla base dei valori limite fissati nell'OIAT. Occorre dunque calcolare valori medi e valori massimi delle immissioni nel perimetro considerato, tenendo conto delle fonti inquinanti esterne non considerate esplicitamente nel calcolo. La procedura è immediata per le componenti inerti ma richiede analisi ulteriori ad esempio per l'ossidazione di NO per generare NO<sub>2</sub> oppure la formazione di Ozono a partire dai suoi precursori, sotto l'effetto della luce solare. Per gli ossidi di azoto i valori limite OIAT sono riferiti al diossido di azoto mentre le emissioni in galleria avvengono principalmente sotto forma di monossido di azoto NO (ca. 90%). Il fenomeno di ossidazione è relativamente veloce e non può essere trascurato neppure nelle immediate vicinanze del portale di una galleria.

I risultati dei singoli scenari forniscono preziose indicazioni per la comprensione di eventuali situazioni critiche, che possono essere corrette ad esempio adeguando le modalità di ventilazione in condizioni particolari. Questi risultati costi-

tuiscono spesso un elemento cardine nel processo decisionale.

### Modelli gaussiani

I modelli di tipo gaussiano sono basati su soluzioni semplificate delle equazioni differenziali che governano la propagazione degli inquinanti. Questi modelli, pur molto diversi tra di loro, hanno una base fisica comune. In un campo di corrente uniforme la ripartizione spaziale della concentrazione di una sostanza emessa da un sorgente puntiforme ha una distribuzione di tipo gaussiano. Risultati analoghi valgono per una sorgente lineare, ad esempio una strada. La varianza verticale e orizzontale della distribuzione dipende dalle condizioni atmosferiche, primariamente intensità del vento e irraggiamento solare. I modelli di questo tipo sono particolarmente interessanti in quanto caratterizzati da una base empirica molto estesa e affidabile per tutte le condizioni rilevanti. Un esempio rappresentativo è costituito dal modello HIWAY sviluppato dall'Agenzia americana per la protezione dell'ambiente (EPA).

L'analisi avviene separatamente per ciascun episodio. Una volta definite le sorgenti e le condizioni meteorologiche viene calcolata la concentrazione degli inquinanti considerati in tutto il settore analizzato, che risulta essenzialmente dalla sovrapposizione della distribuzione gaussiana risultante da ciascuna sorgente considerata. Una risoluzione spaziale dell'ordine di 20-50 m è normalmente adeguata per condurre analisi su aree di qualche km quadrato. Grazie alla semplicità matematica della procedura è possibile analizzare un grande numero di scenari. Si adotta spesso l'opzione di calcolare separatamente tutte le 8'760 ore di un anno, in modo da poter basare l'analisi statistica su una base di dati analoga a quella risultante da una campagna di misure.

Modelli di questo tipo sono particolarmente efficienti in quanto consentono di ottenere risultati accurati senza esigenze di calcolo particolari. La loro debolezza intrinseca è legata alla capacità di prendere in considerazione solamente in modo approssimato le peculiarità geometriche della configurazione considerata. Essi devono dunque essere utilizzati con cautela in caso di situazioni particolarmente complesse in termini di configurazione dei portali o di conformazione del terreno e in presenza di grossi edifici nelle immediate vicinanze dei portali.

Modelli di questo tipo sono largamente utilizzati nella pratica. Essi consentono di analizzare in modo rapido e accurato un numero elevato di configurazioni diverse e sono applicabili su pe-

rimetri anche molto estesi. Essi costituiscono una base indispensabile per analizzare ad esempio l'effetto di varianti di un dato sistema di ventilazione di galleria come pure di ottimizzarne il funzionamento dal punto di vista ambientale.

### Modelli tridimensionali

Una risposta alle limitazioni intrinseche dei modelli gaussiani in caso di configurazioni complesse, particolarmente in ambito urbano, è la soluzione numerica diretta delle ben note equazioni alla base del moto dei fluidi, dette di Navier-Stokes. Questo approccio era in passato poco praticabile a causa dei tempi di calcolo eccessivi. Grazie ai progressi recenti in termini di software e hardware è oggi possibile condurre queste analisi su normali PC. Un esempio di programma commercialmente disponibile è MISKAM, sviluppato originariamente presso l'Università di Mainz.

La procedura di analisi è analoga a quella adottata per i modelli gaussiani. In questo caso occorre però sviluppare una rappresentazione digitale tridimensionale del terreno, che rappresenti in modo adeguato tutte le particolarità rilevanti della configurazione considerata. Nel caso di gallerie cittadine occorre dunque ad esempio definire precisamente la configurazione del portale (forma, livello rispetto al terreno ecc.), gli edifici circostanti, eventuali barriere antirumore ecc. Il passo successivo è la discretizzazione del dominio di calcolo («grid generation»). Il numero di celle considerato è tipicamente dell'ordine del milione. L'analisi è normalmente limitata a zone relativamente piccole per limitare la grandezza del modello numerico risultante e ridurre i tempi di calcolo a livelli accettabili. La generazione del modello geometrico e della griglia di calcolo sono cruciali per garantire la qualità dell'analisi e richiedono valutazioni ingegneristiche esperte. Errori a questo livello possono condurre a risultati totalmente inappropriati.

La soluzione numerica del problema richiede normalmente tempi di calcolo importanti, per cui l'uso del modello è spesso limitato a settori relativamente piccoli, qualche centinaio di m. Per la stessa ragione il numero di episodi che possono essere analizzati per una configurazione data è limitato. Un'ulteriore limitazione scaturisce anche in questo caso, seppure ad un livello diverso, dall'uso di modelli semiempirici, in prima linea la simulazione della turbolenza su piccole scale, basata spesso sul modello k- $\epsilon$ .

Il punto maggiore di forza di questi modelli risiede nella possibilità di rappresentare in modo estremamente accurato anche piccoli dettagli geome-

trici, quali barriere antirumore o simili. Questa famiglia di modelli è naturalmente predestinata per l'applicazione in ambito urbano. Un esempio tipico verrà presentato nel prossimo capitolo. Notevoli anche le possibilità di utilizzo a livello di ottimizzazione geometrica di dettaglio, che sino ad oggi non sono ancora state utilizzate a fondo.

### Il «Mittlerer Ring» di Monaco

#### *Introduzione*

Il «Mittlerer Ring», attualmente in corso di realizzazione, costituisce una delle principali arterie di traffico della metropoli bavarese, sulla quale confluisce approssimativamente 1/7 del volume totale di traffico della città. Studi molto approfonditi sono stati condotti per studiare in dettaglio gli effetti di un'espansione della capacità, basata tra l'altro sulla realizzazione di quattro nuove gallerie: il Petuel Tunnel (1.5 km) nella parte nord, una seconda galleria sul lato est (1.5 km) e due gallerie di lunghezza inferiore sul lato sud-ovest (1.2 e 0.6 km). L'obiettivo è quello di accrescere la capacità dell'arteria riducendone l'impatto ambientale. Gli inquinanti considerati erano:  $\text{NO}_2$  (media annuale 98esimo percentile), benzene e PM10.

Come spesso in queste situazioni, trattandosi di un progetto molto controverso, l'esame dell'impatto ambientale ha dovuto essere condotto con un'attenzione estrema. Le immissioni risultanti in vicinanza dei portali hanno costituito un elemento fondamentale nel processo di sviluppo e di approvazione del progetto.

Nei paragrafi seguenti vengono presentati alcuni esempi illustrativi tratti dalle analisi condotte a suo tempo dall'autore. L'obiettivo è di illustrare l'applicazione dei modelli presentati sopra, senza addentrarsi nella complessa problematica specifica del «Mittlerer Ring».

#### *Studio di varianti*

Un estratto dei risultati di uno studio di varianti per il settore sud-est è presentato nella Fig. 4. A volume di traffico dato vengono raffrontate le immissioni risultati dalla situazione antecedente e da tre varianti di galleria, caratterizzate da diverse lunghezze e posizioni dei portali. Lo scopo primario è esplorativo. Si tratta principalmente di caratterizzare rapidamente le diverse varianti e metterne in evidenza vantaggi e svantaggi. Un modello di tipo gaussiano è dunque ideale.

#### *Studio dettagliato*

Una volta identificata la soluzione ottimale, occorre studiarla in modo più approfondito, per verifi-



Fig. 4 – Settore sud-ovest del «Mittlerer Ring» di Monaco. Concentrazione media di  $\text{NO}_2$ , anno 2010, senza galleria (a sinistra) e con tre diverse varianti di galleria, caratterizzate da diverse posizioni dei portali (modello gaussiano)

care l'appropriatezza. Questo richiede la combinazione delle caratteristiche migliori di un modello gaussiano con quelle di un modello tridimensionale. L'esempio riguarda il settore est.

Una prima analisi è stata condotta dapprima per l'intera galleria e per le zone dei portali utilizzando il modello gaussiano. Un esempio è presentato nella Fig. 5. Da questo risultato sono scaturite una serie di domande concernenti in particolare la parte sud-est di questo settore, l'allacciamento alla A94 München-Mühldorf. Si tratta di una zona con densità elevata di popolazione, per la quale l'analisi gaussiana ha evidenziato possibili superamenti dei valori limite su superfici relativamente estese. In considerazione della complessità di questa zona, caratterizzata da diversi edifici di altezza importante, si è reso necessario ricorrere ad un'analisi tridimensionale per il settore in questione. I risultati sono presentati nella Fig. 6. Su questa base è stato possibile identificare e quantificare accuratamente i superamenti dei valori di riferimento, corrispondenti nel caso specifico a  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ . Da notare l'elevata concentrazione di fondo,  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### *Conclusioni*

La combinazione di modelli di tipo gaussiano con modelli tridimensionali, ha dimostrato di essere molto potente e versatile. Modelli gaussiani sono stati utilizzati per un rapido studio di varianti e per l'identificazione di zone potenzialmente critiche. La verifica finale delle zone più delicate è stata successivamente condotta utilizzando il modello tridimensionale, che ha permesso di approfondire svariate problematiche particolarmente critiche a livello progettuale. Anche in un contesto estremamente delicato come quello di Monaco, essa ha consentito valutazioni realistiche, che hanno molto aiutato il processo decisionale.

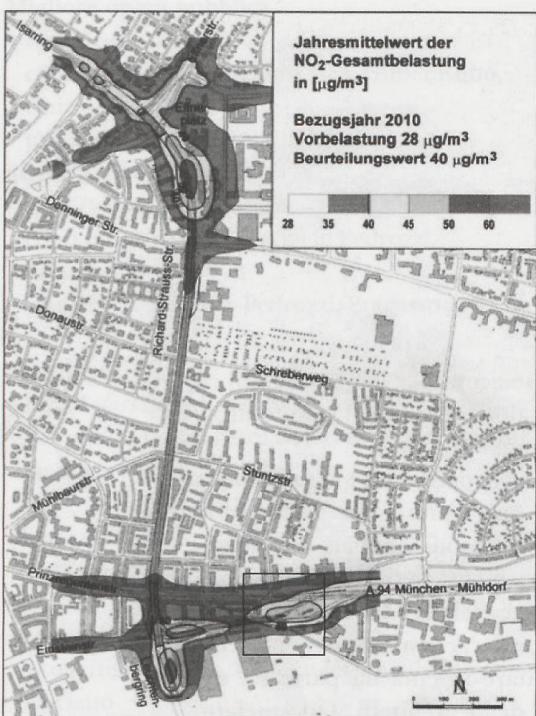


Fig. 5 – Settore est del «Mittlerer Ring» di Monaco. Concentrazione media di NO<sub>2</sub>, anno 2010 (modello gaussiano). Il riquadro nella parte bassa corrisponde al settore calcolato con il modello tridimensionale.

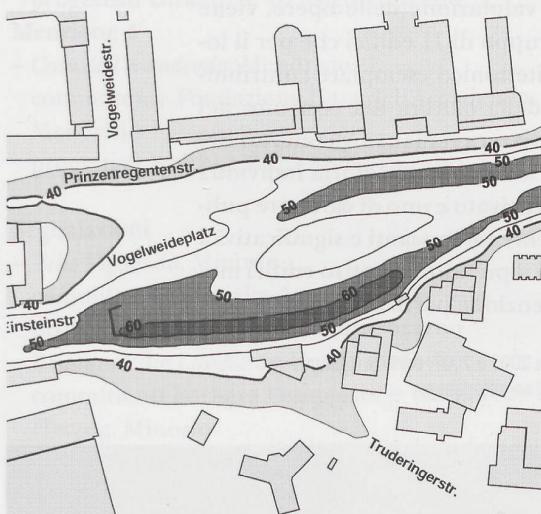


Fig. 6 – Settore est del «Mittlerer Ring» di Monaco. Concentrazione media di NO<sub>2</sub>, anno 2010 (modello tridimensionale). Il dominio di calcolo corrisponde al riquadro rappresentato nella Fig. 5).

#### «Riduzione delle emissioni»

La problematica della riduzione delle immissioni si propone inevitabilmente in quasi tutti i progetti di nuove gallerie, particolarmente per quelle in ambito urbano. Le misure più efficaci sono sempre legate al posizionamento dei portali ed alla loro configurazione. Limiti precisi sono di norma dettati dalla struttura della rete viaria esistente e dalle costruzioni.

Misure molto efficaci possono essere realizzate anche a livello di ventilazione. Nel caso di ventilazioni di tipo longitudinale è possibile realizzare sistemi di aspirazione dell'aria viziata dal vano traffico in prossimità dei portali. Si tratta normalmente di misure molto costose, sia in termini di investimento iniziale che di oneri di esercizio. In questi casi l'aria viziata viene espulsa attraverso camini di ventilazione dell'altezza di almeno 10 m rispetto al terreno. L'esperienza acquisita sulla base di analisi teoriche e misure realizzate sul terreno ha mostrato che le immissioni risultanti da un'espulsione dell'aria viziata attraverso un camino sono praticamente trascurabili, essendo di norma inferiore a 0.5-1 µg/m<sup>3</sup> NOx. Una soluzione di questo tipo è stata realizzata nella galleria Schlund, sulla A2 presso Lucerna.

La situazione è più semplice in caso di sistemi di ventilazione per i quali le esigenze di sicurezza impongono la realizzazione di una soletta intermedia e di una o più centrali di ventilazione. In questo caso è possibile ottenere eccellenti risultati ottimizzando il funzionamento del sistema di ventilazione in funzione delle necessità contingenti. Una ventilazione di questo tipo è in corso di realizzazione per la galleria Vedeggio-Cassarate a Lugano. Grazie alla presenza del camino intermedio sarà possibile ridurre drasticamente le immissioni.

Come complemento alle misure di ventilazione si discute spesso la possibilità di adottare misure di trattamento dell'aria. Le possibilità principali oggi sono:

- filtrazione delle particelle per mezzo di filtri elettrostatici;
- riduzione della concentrazione di CO, NOx ecc per mezzo di tecniche catalitiche o biologiche.

Tecnologie per la filtrazione delle particelle sono oggi disponibili ma molto poco applicate. Fa eccezione il Giappone e, in parte, la Norvegia. Nuove applicazioni sono in corso di realizzazione in Italia (Cesena) e Spagna (M30 Madrid). I filtri vengono di norma utilizzati per migliorare la qualità dell'aria all'interno delle gallerie, meno per ridurne l'impatto ambientale. Ad oggi esistono solo impianti pilota per il trattamento degli inquinanti gassosi, nessuno dei quali ha dato risultati veramente convincenti. Le tecnologie per il trattamento dell'aria viziata in galleria sono dunque poco attrattive. Questo è dovuto principalmente ai costi, ai rischi tecnologici, ai costi energetici e alla problematica dei residui. Misure adeguate a livello di ventilazione consentono normalmente di raggiungere risultati molto soddisfacenti in termini di immissioni.