

## Gas inquinanti dei motori Diesel nella costruzione di gallerie

### Bollettino 3:

Più aria o meno gas inquinanti ?  
Misure di ventilazione al posto del trattamento dei gas inquinanti

#### 1. Problematica

I cantieri di costruzione gallerie devono essere ventilati artificialmente per evitare che le esalazioni da brillamento mine, la polvere rocciosa, la polvere del cemento spruzzato e i gas inquinanti dei motori Diesel abbiano a pregiudicare la qualità dell'aria ambiente. Negli anni 80 venne introdotto per i motori Diesel un valore di ventilazione pari a 4 m<sup>3</sup>/kWmin che risultava consoni ai concetti su cui ci si basava allora in merito alla qualità dell'aria ambiente. Tutta la problematica è ritornata d'attualità grazie alle conoscenze acquisite nel frattempo sul pericolo della cancerogenesi associata alle particelle di sostanze solide presenti nei gas di scarico dei motori Diesel. Per poter rispettare i valori limite vigenti oggi per questa categoria di sostanze nocive, sarebbe necessario potenziare ulteriormente la ventilazione artificiale il che provocherebbe un aumento notevole dei costi di costruzione e creerebbe difficoltà pressoché insuperabili nella sua realizzazione pratica. L'alternativa su cui

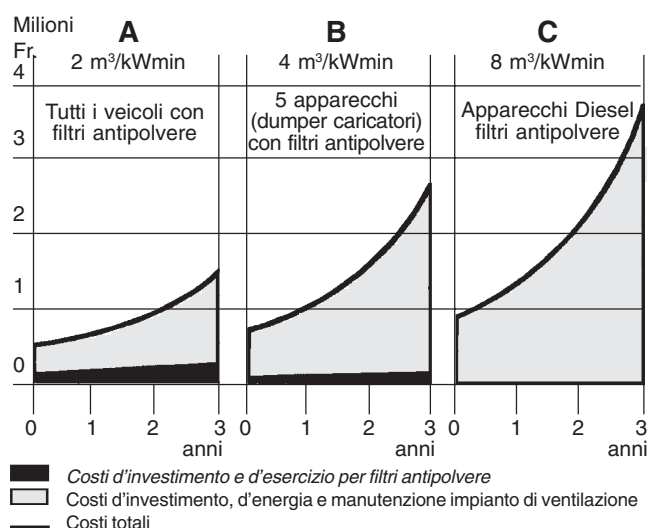


Figura 1: Riduzione dei costi della ventilazione con il trattamento dei gas di scappamento. Grafico relativo all'esempio di calcolo descritto al punto 6.

si sta discutendo è la riduzione dei gas inquinanti prodotti dai motori Diesel, in particolare l'equipaggiamento dei motori con filtri antipolvere. Si intende qui esaminare quali di queste due soluzioni – più aria per la rarefazione dei gas oppure meno emanazione di gas inquinanti – va considerata vantaggiosa dal punto di vista qualità dell'aria ambiente, realizzabilità tecnica e anzitutto economicità.

### Editoriale

Al fine di rispettare i valori limite vigenti per legge dal 1994 per l'aria ambiente sui posti di lavoro dei cantieri di costruzione gallerie, occorre adottare misure che vanno decisamente oltre a quanto finora normalmente richiesto. Con il presente bollettino si vuol dimostrare l'impossibilità di raggiungere l'obiettivo ricorrendo unicamente alla ventilazione della galleria. Solo la riduzione dell'emanazione di sostanze nocive prodotta dagli aggregati Diesel in dotazione nelle gallerie costituisce una soluzione realistica. Si è constatato anche che le misure di un trattamento dei gas di scappamento sono di molto più economiche di quelle richieste per potenziare maggiormente la ventilazione della galleria. Il trattamento dei gas di scappamento permette di rinunciare a ricerche laboriose per la produzione di motori da usare in cantieri sotterranei. Con la riduzione delle sostanze nocive alla fonte si riduce contemporaneamente la quantità totale delle sostanze emesse inquinanti l'ambiente.

È probabile che l'uso di motori sempre più moderni e il trattamento dei gas di scappamento permetteranno di ridurre il valore dell'aria da insufflare di 4 m<sup>3</sup>/kWmin.

AUVA, Suva, TBG

VERT significa „Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau“ (Riduzione delle emissioni prodotte da macchinari già in dotazione nella costruzione di gallerie). Si intendono qui i motori esistenti sui cantieri e non quelli in fase di futuro sviluppo. Circa i motivi e gli obiettivi del progetto VERT consultare il bollettino VERT 1, giugno 1995, e circa i risultati delle prove fatte con filtri antipolvere consultare il bollettino VERT 2, dicembre 1995.

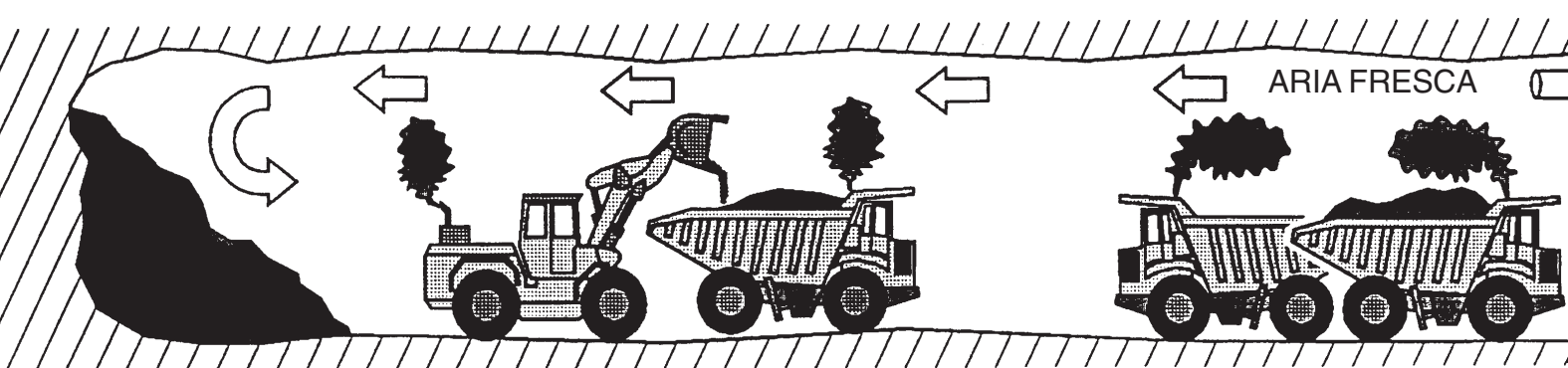
#### 2. Gas inquinanti nei lavori di costruzione gallerie

Tabella 1

Gas inquinanti mg/Nm <sup>3</sup>	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	HC	Particelle
Emissioni da motori Diesel	1000	3000	350	400	250
Obiettivo delle emissioni secondo valore MAC	35	NO 30 NO <sub>2</sub> 6		5	0.2 0.1*
Fattore di rarefazione	28	100	70		2500

\* Valore d'allarme TRGS 554 – Germania

La prima linea della tabella indica il valore rappresentativo degli odierni motori Diesel [1]. La seconda linea porta i requisiti relativi alla qualità dell'aria ambiente secondo i valori attualmente valevoli per la concentrazione massima ammissibile sui posti di lavoro (MAC) [2]. La terza linea indica il rispettivo grado di rarefazione che occorrerebbe raggiungere a funzionamento normale dei motori e a miscelazione



totale – una rappresentazione idealizzata. Finora il NO era considerata la principale sostanza inquinante l'aria ambiente: nel frattempo questo ruolo è stato assunto dalle particelle (particolato di sostanze solide). Di conseguenza il richiesto grado di rarefazione dei gas dovrebbe essere molto più elevato e la ventilazione dovrebbe andare assai oltre a ciò che finora sembrava più che sufficiente.

### 3. Il comportamento delle sostanze nocive in galleria

Nel traffico stradale si parte dal presupposto che le sostanze nocive che escono dai tubi di scappamento si rarefanno rapidamente in misura tale da non più costituire un pericolo tossico imminente e da rallentare di molto la loro catena di reazioni successive. Nelle gallerie valgono altre condizioni:

- la concentrazione delle sostanze nocive aumenta in mancanza della necessaria ventilazione;
- nella zona attorno alle macchine operatrici si hanno elevate concentrazioni di sostanze nocive;
- Le cosiddette goccioline di flusso a concentrazione elevata che si formano all'interno delle gallerie, si spostano lentamente verso l'esterno così da raggiungere posti di lavoro in zona di trasporto e rifinitura. Essendo troppo dispendioso l'ottenimento di una miscela omogenea dei gas, si rivela praticamente vano il tentativo di ridurre questi picchi di concentrazione;
- I gas inquinanti si trasformano:
  - $\text{SO}_2$  si ossida lentamente trasformandosi in  $\text{SO}_3$ . Con l'acqua condensata derivante dalla combustione si formano aerosoli a base di acidi solforosi e acidi solforici. Queste sostanze irritanti intaccano gli occhi e le vie della respirazione già a basse concentrazioni;

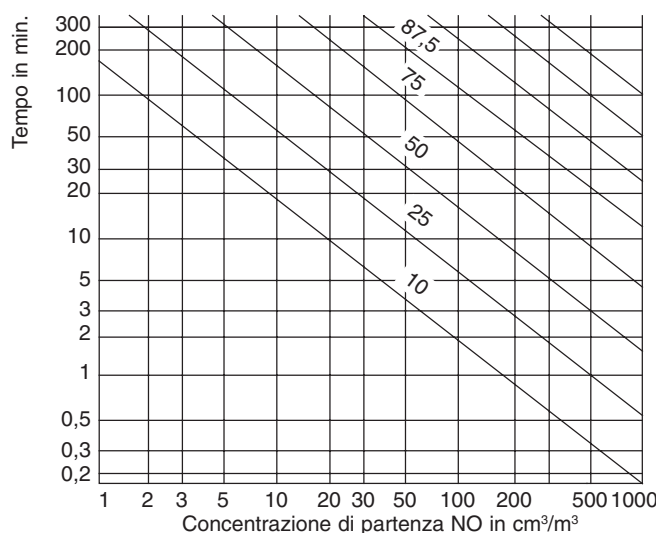


Figura 2: Ossidazione di NO in  $\text{NO}_2$  in % [3].

- NO, percentualmente il maggiore fra gli ossidi di azoto, continua a ossidare trasformandosi in  $\text{NO}_2$  di molto più tossico (fig. 2): la velocità di questa reazione è enorme. Se si tien conto di un tipico periodo di permanenza di 100 minuti, che è pari a una lunghezza di galleria di 2-3 km a una velocità di deriva normale, si deve prevedere una decomposizione del 75% circa a una concentrazione di partenza di 50 ppm del gas di scappamento rarefatto.
- Circa la trasformazione degli idrocarburi non si sa ancora molto: sono possibili molteplici reazioni, quali le reazioni degli idrocarburi e degli ossidi di azoto, i due precursori dell'ozono.

### 4. Immissioni a ventilazione standard

La tabella 2 mostra quali possono essere i valori di immissioni ottenuti con una ventilazione standard di  $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  e con emissioni pari a quelle indicate nella tabella 1. Per un motore Diesel fatto girare quasi a pieno regime, si calcola un consumo medio di aria di  $6 \text{ m}^3/\text{kWh}$ . Con una miscelazione completamente omogenea, il grado effettivo di rarefazione è quindi di 40: in realtà bisogna però sempre prevedere una ripartizione non omogenea.

Tabella 2

Gas di scappamento in $\text{mg}/\text{Nm}^3$	CO	NOx	$\text{SO}_2$	HC	Particelle
Obiettivo immissioni	35	30	5		0.2
Valori calcolati	25	67	8	10	6
Valori misurati	15	12	0.6		fino a 2.0

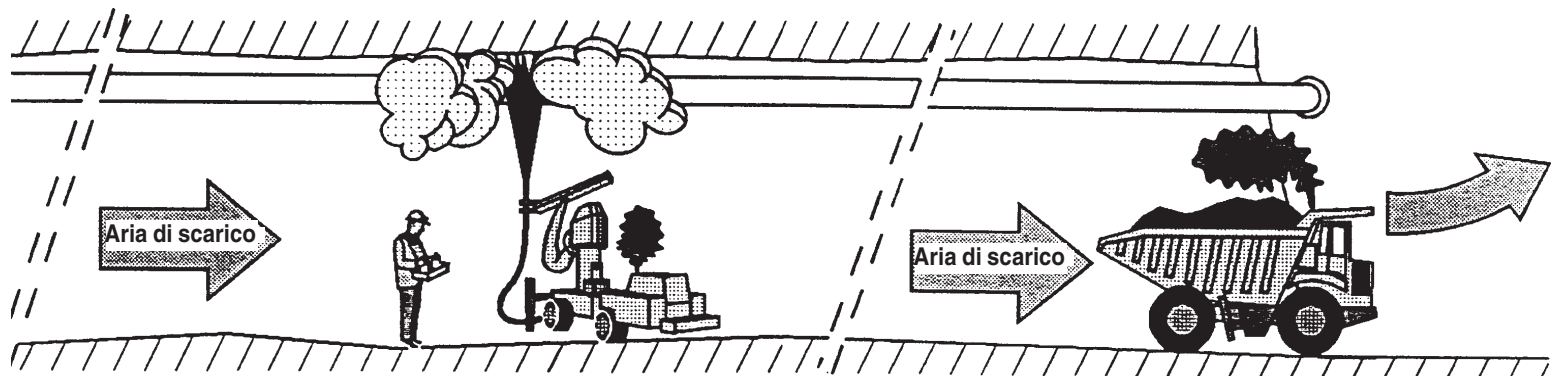
I valori misurati di CO, NOx e  $\text{SO}_2$  sono quelli tolti dalle misurazione eseguite dalla Suva in gallerie [4]. Sono indicati i valori di misurazione al limite superiore: i valori medi sono inferiori del 50%. I valori di misurazione delle particelle sono quelli tolti da controlli TBG e AUVa effettuati su cantieri di costruzione gallerie.

Il motivo per cui i valori misurati durante gli effettivi lavori di costruzione gallerie si trovano al di sotto di quelli calcolati, va dovuto al fatto che il grado di sfruttamento dei motori Diesel è inferiore al 20%.

Risulta quindi evidente che una ventilazione pari a  $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  è di regola sufficiente per rispettare il valore limite di immissione delle sostanze nocive gassose, mentre non basta se si tratta di particelle.

### 5. Ventilazione necessaria

Riteniamo opportuno indicare come esempio quali misure drastiche occorrerebbe adottare dal punto di vista ventilazione, limitazione della potenza in dotazione risp. della durata di sfruttamento degli apparecchi al fine di poter ri-



spettare i valori mirati senza modificare la qualità delle emissioni prodotte da motori Diesel. Supponendo 4 m<sup>3</sup>/kWmin di gas di scappamento stabiliti per kW dei motori Diesel, si avranno a disposizione sull'arco di 8 ore di lavoro 1920 m<sup>3</sup> d'aria rarefatta. Il tenore di particolato Diesel ammissibile all'interno di una galleria è di:

- 1.15 g/kWh – valore limite 0.6 mg/m<sup>3</sup>
- 0.38 g/kWh – valore limite 0.2 mg/m<sup>3</sup>
- 0.29 g/kWh – valore limite 0.1 mg/m<sup>3</sup>

Supponendo una emissione media di 1.5 g/kWh registrabile dagli odierni motori Diesel [1] si avrebbe 12 g/kWh effettivi di particolato da motori Diesel calcolati sull'arco di 8 ore. Da ciò risulta che il valore limite del particolato di 0.2 mg/m<sup>3</sup> verrebbe già superato a un grado di sfruttamento medio di un motore Diesel in galleria di solo il 10%. Se si dovesse rispettare il valore d'allarme di 0,1 mg/m<sup>3</sup> (secondo TRGS 554) il grado di sfruttamento di un motore Diesel dovrebbe essere ridotto all'1.6%: cosa completamente irrealistica.

Per garantire l'osservanza del valore limite nei lavori sotterranei sarebbe quindi necessario aumentare la quantità di aria insufflata per diluire sufficientemente le sostanze nocive emesse. L'esempio mostra che bisognerebbe quintuplicare la quantità di aria insufflata per consentire un grado di sfruttamento degli apparecchi di almeno il 15 per cento. Il quantitativo d'aria dovrebbe essere portato a 20 m<sup>3</sup>/kWmin, cosa del tutto utopica per motivi sia tecnici che economici, come lo dimostra quanto esposto qui di seguito.

## 6. Costi della ventilazione

Per evidenziare il problema essenziale dei costi riportiamo qui di seguito un altro esempio molto semplificato:

Lunghezza della galleria 5 km, durata dei lavori 3 anni

Messa in dotazione di 5 apparecchi Diesel sul fronte d'avanzamento

Potenza nominale totale 800 kW

Quantità d'aria totale sul posto

Velocità dell'aria nella tubazione < 20 m/s

Pressione d'esercizio 10'000 Pa

Calcolo secondo SIA 196

Ammortamento: ventilatori 10 anni, tubazioni 6 anni

Costi d'energia: 0.20 DM/kWh

Utilizzazione: 6000 h/a, grado di sfruttamento 0.5

Esempi	A	B	C
Quantità d'aria m <sup>3</sup> /kWmin	2	4	8
Potenza ventilatore kW	440	1000	1600
Diametro tubazione m	1.6	2.0	2.6
Perdita di pressione ca. Pa	9'500	10'500	10'500
Tipo di ventilazione	GAL140	AL20	AL25
Numero ventilatori pezzi	2	4	4
Costi ventilatori DM	60'000	166'000	242'000
Costi tubazioni/m DM	93	115	166
Costi tubazioni DM	232'000	288'000	415'000
Investimenti DM	292'000	454'000	657'000
Con interessi+manut. DM	388'000	604'000	874'000
Costi d'energia in milioni DM	0.79	1.80	2.88
Costi totali in milioni DM	1.18	2.40	3.75
Costi/100 kW DM	147'500	300'000	468'750
Costi/Motore DM	236'000	480'000	750'000

La messa in atto del concetto di ventilazione influisce enormemente sui costi della ventilazione!

Un ulteriore aumento della potenza della ventilazione sarebbe ben difficilmente realizzabile con un ulteriore aumento del diametro della ventilazione. Se il diametro rimane invece invariato, la potenza della ventilazione e i costi d'esercizio si eleverebero alla terza potenza del volume d'aria di ventilazione (fig. 1).

Si è calcolato qui unicamente con un raddoppiamento del quantitativo d'aria portandolo da 4 a 8 m<sup>3</sup>/kWmin. Tuttavia questo aumento si rivela di gran lunga insufficiente per raggiungere l'obiettivo prefisso, come lo dimostrano gli esempi citati ai punti 4 e 5. Risulta quindi evidente l'impossibilità di condurre la cosa a buon fine anche ricorrendo a tutte le possibilità tecniche (adattamento della sezione delle tubazioni alle condizioni esistenti sul posto, miglioramento della ripartizione della ventilazione nella zona di formazione e convogliamento delle sostanze nocive). Già il raddoppiamento del quantitativo dell'aria per la ventilazione va oltre i limiti del fattibile.

## 7. Carenze della ventilazione in sotterraneo

Senza toccare il problema finanziario, in via generale il modello di diluizione delle sostanze nocive con una maggiore insufflazione di aria è destinato a fallire per i seguenti motivi:

- Le tubazioni della necessaria sezione non trovano posto all'interno della sezione della galleria.
- La velocità di deriva all'interno della galleria – essa è attualmente di 0.5-1 m/s – verrebbe portata a 3-5 m/s.

- Anche se si dovesse scendere al di sotto del valore limite valevole per il particolato, bisognerà pur sempre tener conto del fatto che sui posti di lavoro possono esserci concentrazioni di sostanze nocive di molto superiori al valore limite.
- Non da ultimo il quantitativo di sostanze nocive immesso nell'ambiente attraverso l'aria inquinata scaricata all'aperto permane elevato. Una situazione questa che, per motivi di impatto sull'ambiente, si rivela problematica a seconda dei luoghi d'ubicazione dei cantieri, specialmente di quelli situati all'interno di zone abitate.

## 8. Vantaggi delle misure da adottare alla fonte

I motori a benzina con catalizzatori vengono considerati oggi come sistemi globali e si sono quindi imposti su vasta scala. Ciò è l'unico metodo che permette di raggiungere valori di emissione accettabili.

È quindi opportuno applicare questa logica anche ai motori Diesel: ossia equipaggiarli in modo analogo con un sistema di trattamento dei gas inquinanti regolato in funzione delle emissioni specifiche Diesel. Questo è l'unico sistema da adottare nella costruzione di gallerie.

- I filtri antipolvere permettono una riduzione leggermente inferiore al 10% del particolato di sostanze solide presenti nei gas di scarico dei motori Diesel. Questi filtri sono disponibili sul mercato (vedere bollettino VERT 2 [6]) e risolvono in modo efficace il problema delle emissioni di particolato. Per molti di questi sistemi di filtraggio il costo è già oggi inferiore a 125 DM/kW, anche utilizzando piccole quantità di filtri.
- I catalizzatori permettono di ridurre l'emissione di componenti HC e di CO in misura di poco inferiore al 10%. Ciò premette comunque l'uso di un carburante avente un tenore di zolfo estremamente basso. I catalizzatori sono disponibili sul mercato ma il loro impiego in galleria non si rivela assolutamente indispensabile, visto che le emissioni tipiche dei motori Diesel non possono essere ridotte che in misure insignificanti.
- Esistono catalizzatori speciali, di cui sono già da tempo dotati i motori stazionari e la cui produzione su vasta scala è stata estesa oggi anche ai veicoli, permettono una riduzione delle emissioni NOx nella misura del 5-10%. Tuttavia questa tecnica molto auspicabile per i lavori di costruzione gallerie non è ancora disponibile.

Facendo ricorso a tutte le misure atte a ridurre alla fonte le emissioni di particolato è possibile diminuire sensibilmente il

quantitativo di aria insufflato da un sistema di ventilazione. Determinante sono qui le emissioni gassose dei motori Diesel e i gas prodotti dallo sparo mine. In taluni casi sarà persino possibile ridurre i valori della ventilazione a 2 m³/kWmin.

I tre enti, Suva, TGB e AUVA, sono disposti a ridurre in tale senso le esigenze vigenti in materia, non appena l'affidabilità del sistema di trattamento dei gas di scappamento lo permetterà.

L'obiettivo da perseguire, dal punto di vista della protezione sia dei lavoratori che dell'ambiente, sarà quindi quello di ridurre l'emissione di sostanze nocive prodotte da ogni singolo motore Diesel per mezzo di un sistema di trattamento secondario dei gas di scappamento applicato direttamente al motore.

## 9. Confronto dei costi

Le cifre comparative indicate qui di seguito valgono per una macchina da cantiere dotata di un motore Diesel di 100 kW in servizio in galleria per la durata di 3 anni.

### Spesa complessiva per il trattamento dei gas di scappamento

Filtri antipolvere, montaggio compreso	12'500 DM
Manutenzione	5'000 DM
Maggiore consumo di carburante	3'000 DM
Additivo rigenerativo	3'000 DM
Totale	23'500 DM

### Spesa complessiva per la ventilazione

con 8 anziché 2 m³/kWmin >300'000 DM

Anche se l'adozione di tali misure di equipaggiamento supplementare degli impianti a motore in dotazione sui cantieri sotterranei, basata attualmente ancora su scarse esperienze, dovesse richiedere una maggiore manutenzione e un ricorso occasionale a pezzi di ricambio, il vantaggio finanziario di questo sistema è più che mai evidente rispetto alle misure di ventilazione.

## 10. Quintessenza

Dal punto di vista finanziario e tecnico, l'unica via praticabile per ridurre l'inquinamento da sostanze nocive emesse da motori Diesel sui posti di lavoro in sottoterraneo è quella di ridurre le emissioni alla fonte. Per i motori già in dotazione, ciò può essere realizzato, a breve termine, usando filtri antipolvere per motori Diesel e carburante povero di zolfo.

## Bibliografia

1. Schadstoffemission und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Bericht Nr. 23 UFAFP/Berna 94
2. Valeurs limites au poste de travail, 1994; Suva/Lucerna
3. Verhalten von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid in kleinen Konzentrationen in Abwettern, Glückauf-Forschungshefte 51 (1990) Nr. 1
4. Schadstoffmessungen im Tunnelbau, Ein Vergleich GESTERN (1975-82) und HEUTE (1986-89), Suva/Lucerna, Bericht 90.218.1990
5. Bollettino VERT n. 1, Problemi, obiettivi e programma
6. Bollettino VERT n. 2, Filtro per particelle

## Abbreviazioni

Suva Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni  
 AUVA Allg. Unfallversicherungsanstalt - Austria  
 TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft - Germania  
 MAC Concentrazione massima sul posto di lavoro  
 RTSP Regole tecniche per le sostanze pericolose

**Direzione del progetto:** Studio d'ingegneria TTM, A. Mayer Fohrhölzistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf  
 Tel. 0041/(56)496 64 14 Fax 0041/(56)496 64 15

### Commissione dei committenti del progetto

AUVA: E. Bigga 0043(3842)24317  
 TBG: Prof. D. Kieser 0049(761)73135  
 Suva: W. Scheidegger 0041(41)419 50 60

### Ordinazione del bollettino:

**AUVA:** Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
 Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheiten-  
 bekämpfung  
 Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Vienna (Signora Radosztics)  
 Tel. 0222-33111-418 fax 0222-33111-347  
 Numero di ordinazione AUVA-Report 4/2

**TBG:** Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft  
 Am Knie 6 D-81241 Monaco di Baviera  
 Tel. (089) 8897 505 fax (089) 8897 494

**Suva:** Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni, Servizio centrale clienti, casella posta, 6002 Lucerna  
 Tel. 041/419 58 51 fax 041/419 59 17