

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

**Herausgeber:** Società Svizzera Ingegneri e Architetti

**Band:** - (2003)

**Heft:** 5

**Artikel:** Sicurezza in galleria

**Autor:** Bettelini, Marco

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-132717>

#### 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:** 29.12.2025

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



# Sicurezza in galleria

## 1. Introduzione

La problematica della sicurezza in galleria ha fatto molto parlare negli scorsi anni, a livello svizzero in particolare dopo la tragedia nella galleria del San Gottardo. Al di là dei fenomeni scontati di allarmismo e sensazionalismo, di breve durata e scarso effetto, si tratta ora di «consolidare» gli insegnamenti tratti da questi incidenti, in termini di normativa e di «stato dell'arte», a livello nazionale ed internazionale.

Questo articolo tratta la problematica della sicurezza in galleria da un punto di vista prevalentemente impiantistico. Esso è basato su uno studio dal titolo «Tunnel Safety – Active Risk Reduction» preparato dall'autore nell'ambito del corso di specializzazione «Risiko und Sicherheit», organizzato congiuntamente dai Politecnici di Zurigo e Losanna e dall'Università di San Gallo. Si cercherà di evidenziare le grandi linee della problematica, rinunciando per quanto possibile a dettagli tecnici che appesantirebbero inutilmente la lettura. Per lo specialista si fa riferimento, per una trattazione più esauriente dei diversi temi, allo studio completo (in lingua inglese).

## 2. Recenti incendi in galleria

Scorrendo oggi una lista dei maggiori incendi in galleria compilata alla fine del 1998 dalla AIPCR /PIARC se ne ricava un'immagine completamente diversa rispetto all'attuale. Gli incendi nelle gallerie del Monte Bianco (24 marzo 1999, 39 vittime), Tauern (29 maggio 1999, 12 vittime) e San Gottardo (24 ottobre 2001, 11 vittime) non solo hanno causato un numero di vittime molto superiore ai casi precedenti, ma sono anche qualitativamente diversi. In precedenza infatti in un solo caso, durante l'incendio nel tunnel Nihonzaka (Giappone) nel luglio 1979 (7 vittime e 173 veicoli, di cui 66 veicoli pesanti, completamente distrutti, durata 159 ore) si era perso in modo altrettanto completo il controllo dello sviluppo dell'incendio all'interno della galleria. Una seconda eccezione, molto particolare in quanto legata ad una guerra, è la catastrofe più grave mai registrata in assoluto, nella

quale hanno perso la vita oltre 200 membri di un convoglio sovietico in Afghanistan nel Novembre 1982 (tunnel Salang, Mazar-e-Sharif – Kabul, con incendio di almeno un veicolo cisterna, causato forse dall'esplosione di una mina). Allo stesso modo le ripercussioni economiche sono state pesanti: il traforo del Monte Bianco ad esempio è rimasto chiuso per tre anni ed suo rinnovamento radicale ha richiesto più di 350 milioni di Euro, oltre ad enormi costi indiretti.

Questi incidenti hanno diversi elementi in comune, dai quali occorre trarre insegnamenti utili per migliorare il livello di sicurezza generale delle gallerie.



1 – Drammatiche immagini dell'incendio del 24 Ottobre 2001 nella galleria del San Gottardo  
foto Claudio Grassi

## 2.1 Gallerie che invecchiano

Tutti gli impianti di sicurezza delle gallerie toccate dalle recenti catastrofi erano all'origine all'avanguardia, al punto da colpire ancora oggi l'occhio esperto per la lungimiranza di talune solu-

zioni, ma ormai almeno parzialmente obsoleti al momento dell'incendio. Ciò non stupisce, considerato l'anno di apertura situato tra il 1965 (Monte Bianco) ed il 1980 (San Gottardo). Questo vale in particolare per gli impianti di ventilazione, per i quali le esigenze legate alla sicurezza sono molto aumentate nel frattempo, e per gli impianti più tecnologici (sistema informatico di gestione ecc.), soggetti ad un «invecchiamento» molto rapido. Scorrendo la lista delle maggiori gallerie europee si constata come molti impianti risalgano all'incirca alla stessa epoca del Monte Bianco (Gran San Bernardo 1964, San Bernardino 1967 ecc.) e del San Gottardo (Arlberg 1978, Seelisberg e Fréjus 1980). L'adeguamento dei livelli di sicurezza delle gallerie esistenti allo stato attuale della tecnica, assume dunque un'importanza notevole.

## 2.2 Traffico in aumento

Il livello generale di rischio in galleria, quantificabile in prima approssimazione per mezzo della ben nota espressione

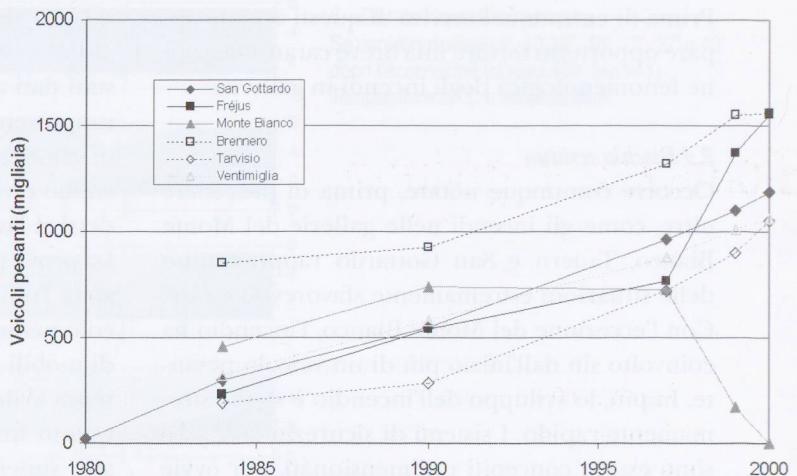
$$\text{Rischio} = \text{probabilità} \times \text{conseguenze}$$

è legato indissolubilmente ai volumi di traffico. Essi determinano direttamente la probabilità che si verifichino incidenti o incendi ed indirettamente la portata delle conseguenze, in ragione del maggior numero di veicoli e persone presenti in galleria. Il rischio aumenta dunque – *ceteris paribus* – almeno proporzionalmente con i volumi di traffico. Ciò vale in particolare per il traffico pesante. Correttivi sono possibili a livello di prevenzione (ad esempio un maggiore controllo dei veicoli e dei conducenti in entrata), di limitazione del volume di traffico e di miglioramenti tecnici.

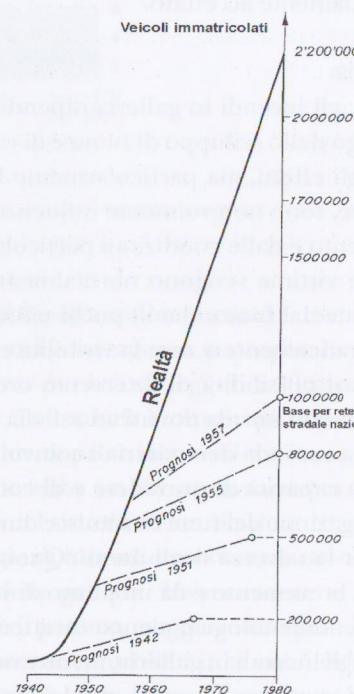
L'evoluzione del traffico pesante transalpino è rappresentata nella fig. 2. L'aumento registrato negli scorsi anni è impressionante. Ne risulta ovviamente un livello di rischio accresciuto, che deve essere ridotto per mezzo di adeguate misure di sicurezza. È d'altra parte interessante osservare come i volumi previsti di traffico alla base del dimensionamento di una galleria stradale possano essere drasticamente errati. Le previsioni ufficiali concernenti il numero di veicoli immatricolati in Svizzera, alla base delle previsioni di traffico utilizzate in molti progetti, sono state in passato sistematicamente e largamente superate dalla realtà (fig. 3).

## 2.3 Quali insegnamenti?

Alcune lezioni di fondo impartite tragicamente dai recenti incidenti devono essere considerate con particolare attenzione. Astraendo dalle peculiarità



2 – Transiti annuali di veicoli pesanti attraverso le Alpi



3 – Numero di veicoli immatricolati in Svizzera, previsioni e sviluppo reale

di ciascun incendio, ci sembra di poter evidenziare alcuni temi chiave di interesse generale:

- vie di fuga;
- impianto di ventilazione;
- informazione degli utenti;
- gestione della galleria in condizioni normali di funzionamento ed in caso di incendio.

L'interdipendenza di questi aspetti è ovvia. Basti pensare alla tragica inutilità delle vie di fuga se gli utenti vengono avvertiti troppo tardi del pericolo, oppure se il sistema di ventilazione non è in grado di garantire una visibilità sufficiente per la fuga.

Prima di entrare nel merito di questi aspetti, appare opportuno fornire una breve caratterizzazione fenomenologica degli incendi in galleria.

#### 2.4 Rischio residuo

Occorre comunque notare, prima di procedere oltre, come gli incendi nelle gallerie del Monte Bianco, Tauern e San Gottardo rappresentino delle situazioni estremamente sfavorevoli e rare. Con l'eccezione del Monte Bianco, l'incendio ha coinvolto sin dall'inizio più di un veicolo pesante. In più, lo sviluppo dell'incendio è stato estremamente rapido. I sistemi di sicurezza non possono essere concepiti e dimensionati, per ovvie ragioni economiche, che per le tipologie di incendio più frequenti. Ne consegue direttamente ed inevitabilmente un «rischio residuo», consciamente o inconsciamente accettato.

#### 3. Incendi in galleria

I pericoli legati agli incendi in galleria dipendono in primo luogo dallo sviluppo di fumo e di calore. Entrambi gli effetti, ma particolarmente le loro conseguenze, sono notevolmente influenzate dal confinamento e dalle condizioni particolari in galleria. Le vittime vengono normalmente dapprima bloccate dal fumo, che in pochi minuti può ridurre praticamente a zero la visibilità ed impedire qualsiasi possibilità di intervento o di fuga. I decessi sono di norma dovuti ad asfissia o avvelenamento, a seconda dei materiali coinvolti nell'incendio. La capacità di prevedere e di controllare la propagazione dei fumi costituisce dunque la chiave per la salvezza degli utenti. Questo capitolo tratterà brevemente e da un punto di vista puramente fenomenologico alcune caratteristiche salienti degli incendi in galleria, mentre nei capitoli seguenti verranno descritti gli elementi di sicurezza fondamentali in galleria, in particolare le possibilità esistenti per controllare la propagazione dei fumi.

#### 3.1 Esperienze in grande scala

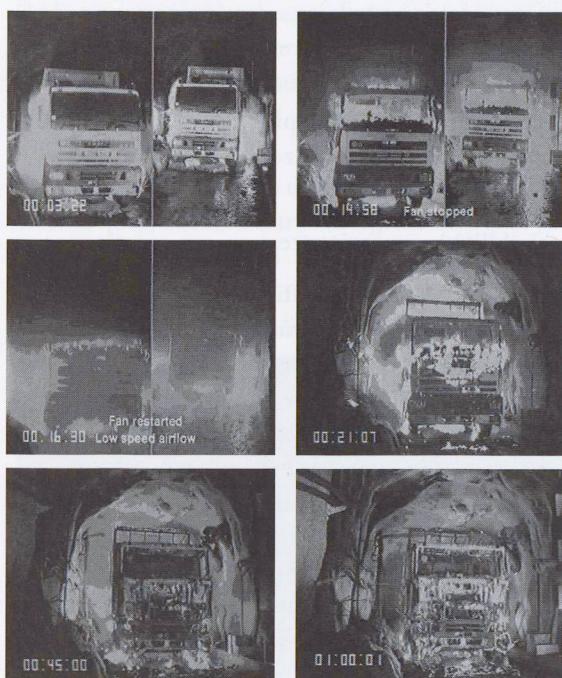
Le conoscenze sulle caratteristiche degli incendi in galleria derivano principalmente da prove condotte in scala reale in condizioni controllate. Le più importanti sono:

- Ofenegg, 1965 (Svizzera);
- EUREKA 499 «Firetun», 1991-1992 (progetto europeo di ricerca, Norvegia);
- Memorial Tunnel, 1993-1995 (USA).

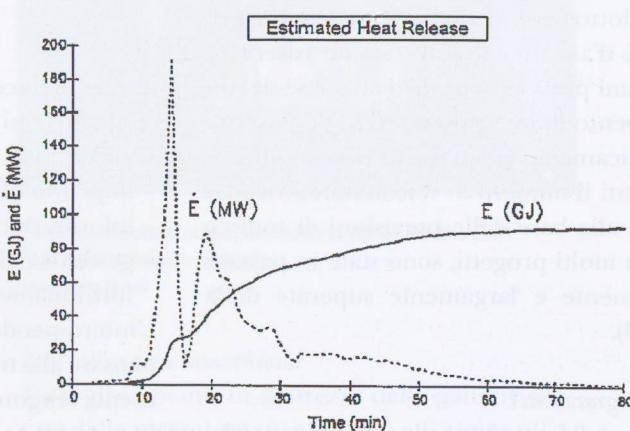
Le migliori informazioni sulla dinamica e sulla potenza sviluppata da incendi in galleria derivano dalle prove condotte all'interno di una miniera abbandonata nel Reppafjord norvegese nel

quadro del progetto europeo EUREKA 499. Una grande varietà di veicoli stradali e ferroviari sono stati dati alle fiamme in condizioni controllate e rappresentative. Ne sono scaturite informazioni di valore enorme per la sicurezza in galleria, il cui studio è vivamente raccomandato a tutti gli «addetti ai lavori».

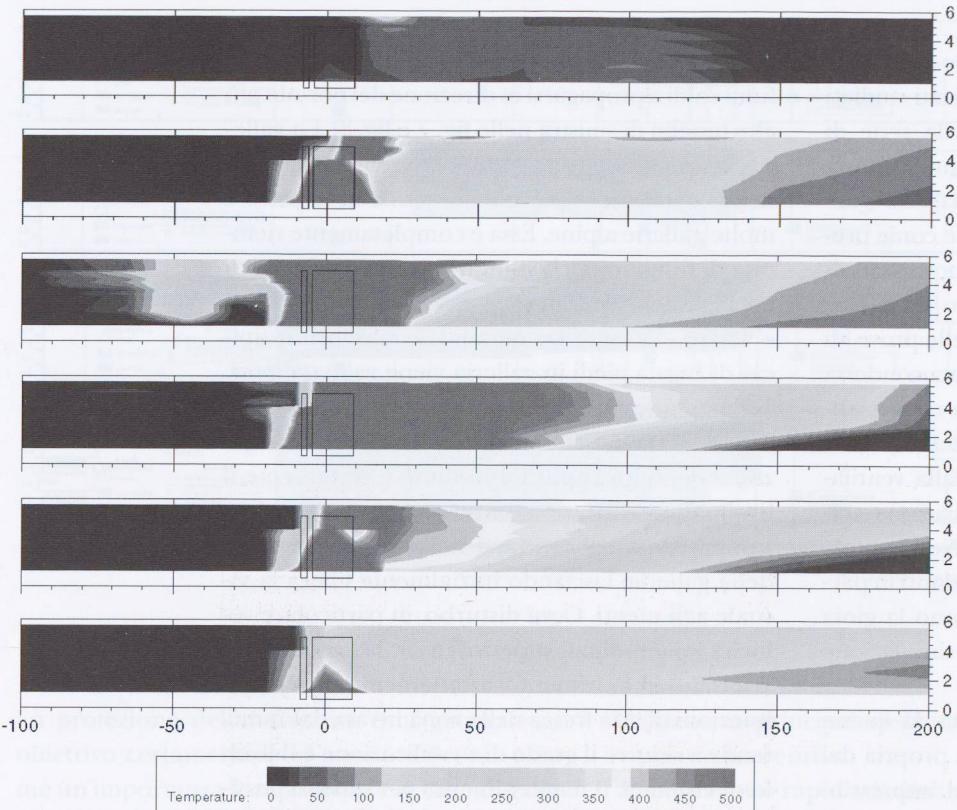
La prova più interessante nel presente contesto è stata l'ultima della serie ed ha coinvolto un veicolo pesante con carico modesto, ca. 2 tonnellate di mobili (test HF1, fig. 4). L'evoluzione della potenza sviluppata, fig. 5, mostra chiaramente che questo incendio, della potenza nominale di 30 MW, supera temporaneamente i 100 MW, nonostante il carico modesto del veicolo. Gli impianti



4 – Sviluppo temporale dell'incendio di un veicolo pesante (EUREKA 499, test HF1)



5 – Potenza e sviluppo complessivo di calore per un veicolo pesante con carico modesto, 2 t di mobili (EUREKA 499, test HF1)



6 – Distribuzione di temperatura.  
Sezioni longitudinali 9°, 13'30", 16°, 20°, 27° e 40°  
dopo l'accensione (EUREKA 499, test HF1).  
Temperature in °C e distanze in m

di ventilazione vengono di norma concepiti e dimensionati per una potenza di incendio pari a 30 MW, e non sono normalmente in grado di controllare interamente l'incendio in ogni sua fase.

### 3.2 Incendi reali e di dimensionamento

Le tipologie di incendio, e dunque le loro caratteristiche in termini di sviluppo di calore e fumo, sono virtualmente illimitate. I parametri principali da considerare sono:

- la quantità di fumi sviluppata, determinante per il dimensionamento dell'impianto di estrazione fumi;
- la potenza sviluppata dall'incendio, che ha un impatto diretto sul riscaldamento del rivestimento della galleria, e quindi sul potenziale per danni materiali, ma soprattutto un'influenza fondamentale sulla velocità di propagazione dei fumi;
- il contenuto energetico totale, uno dei parametri principali che influenzano la potenza e la durata dell'incendio.

Tutti questi parametri soggiacciono a variazioni notevoli, a dipendenza in particolare del tipo di veicolo e di carico, dell'origine dell'incendio, delle caratteristiche della galleria e delle condizioni di ventilazione. Un primo passo volto a limitare l'arbitrarietà dei criteri di scelta e dimensionamento dei sistemi di ventilazione è quello di sta-

bilire degli incendi di dimensionamento. Si osserva attualmente una convergenza verso potenze dell'ordine di 5 MW per veicoli leggeri e 30 MW per veicoli pesanti. Potenze di incendio più elevate vengono raramente prese in considerazione, in quanto ne risulterebbe un dimensionamento inutilmente severo del sistema di ventilazione, in funzione di tipologie di incendio molto rare nella maggior parte delle gallerie. Inversamente si accetta che incendi di potenza maggiore non possono venire interamente controllati in termini di ventilazione.

Veicolo	Potenza	Sviluppo fumi	Energia
Veicolo leggero	2.5 - 5 MW	20 - 30 m <sup>3</sup> /s	3'000 - 7'000 MJ
Furgone	15 MW	50 m <sup>3</sup> /s	
Bus	20 MW	60 - 80 m <sup>3</sup> /s	40'000 MJ
Veicolo pesante	20 - 30 (- 100) MW	80 - 90 (- 200) m <sup>3</sup> /s	60'000 - 100'000 MJ
Autocisterna	100 - 300 MW	100 - 300 m <sup>3</sup> /s	1'500'000 MJ

tab. 1 – Tipologie «tipiche» di incendi in galleria (valori tratti da diverse fonti)

Tipologia	Potenza	Sviluppo fumi	Sviluppo	Durata
Veicoli leggeri	5 - 10 MW	20 - 30 m <sup>3</sup> /s	5 min.	20 min.
Veicolo pesante	20 - 30 MW	60 - 80 m <sup>3</sup> /s	10 min.	60 min.
Merci pericolose	100 - 200 MW	300 m <sup>3</sup> /s	10 min.	60 min.

tab. 2 – Tipici incendi di dimensionamento

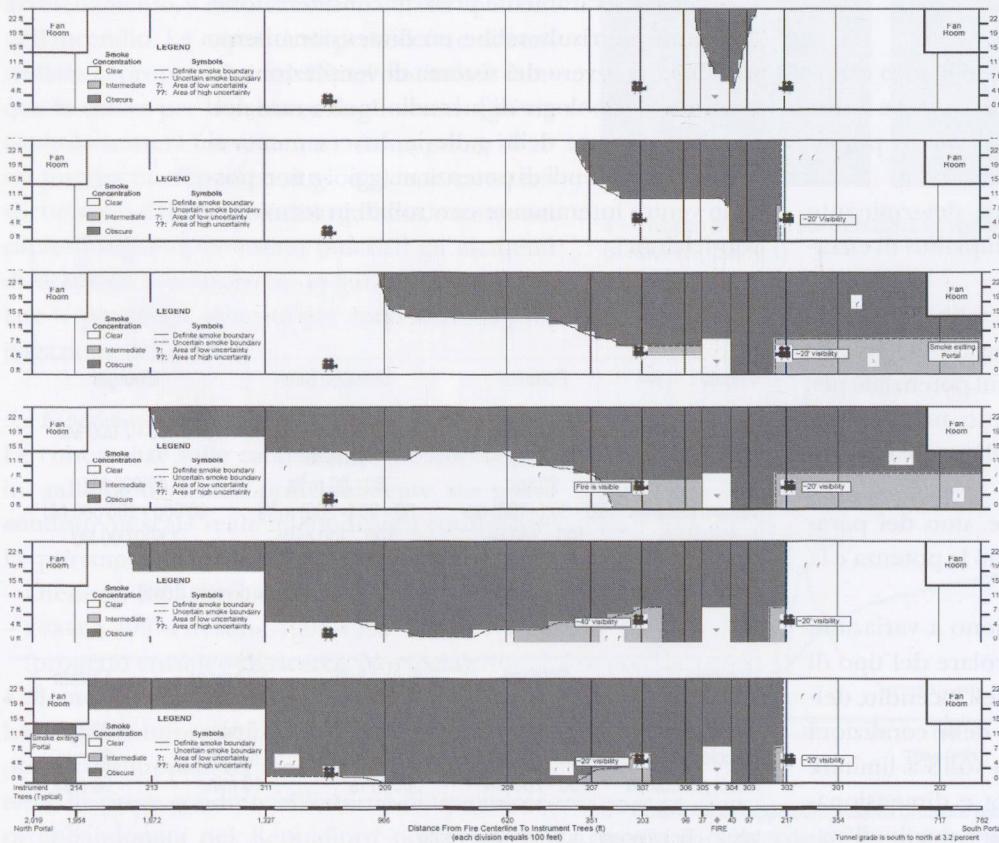
### 3.3 Propagazione dei fumi

La propagazione dei fumi, come pure le possibilità e i limiti legati al loro controllo, sono stati studiati con particolare approfondimento nella serie di prove eseguite nel Memorial Tunnel, una galleria stradale abbandonata situata in Virginia, USA. Questa serie di prove è stata eseguita anche come preparazione alla progettazione della nuova rete di gallerie di Boston («Central Artery» o famigliariamente «Big Dig»). La maggior parte delle prove, di potenza variabile tra 10 e 100 mw, è stata condotta in condizioni molto ben controllate e rappresentative. Sono state in particolare analizzate tutte le principali tipologie di ventilazione, dalla ventilazione puramente naturale alla ventilazione trasversale con aspirazione concentrata. Ne sono scaturite indicazioni fondamentali riguardanti in particolare la dinamica dei fumi, che fanno la gioia non da ultimo degli specialisti della simulazione numerica.

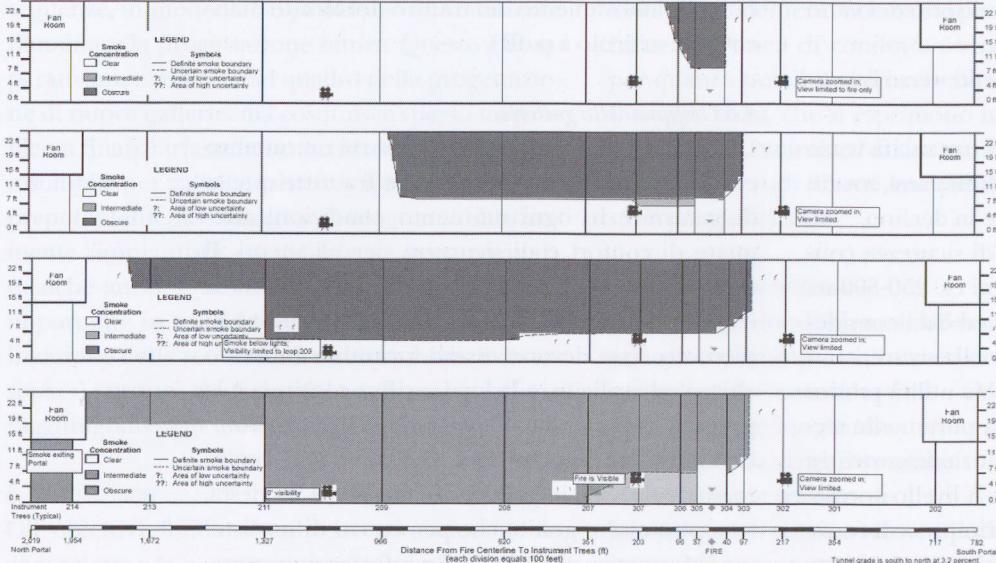
Un'indicazione fondamentale scaturita da queste prove concerne la possente dinamica propria dei fumi. I risultati forse più istruttivi ed impressionanti concernono l'evoluzione dei fumi in caso di ventilazione naturale (quindi senza possibilità di influenzare il movimento dell'aria in galleria), fig. 7 e fig. 8. La velocità di propagazione dei fumi in

questo caso è determinata esclusivamente dal cosiddetto «effetto camino», dalla tendenza cioè dei fumi caldi a propagarsi in direzione del portale più alto (quello di sinistra nelle fig. 7 e fig. 8). La galleria ha una lunghezza totale di 854 m e una pendenza del 3.2%, relativamente modesta rispetto a molte gallerie alpine. Essa è completamente riempita di fumo in pochissimi minuti, con velocità di propagazione comprese tra 2.5 – 3 m/s (20 mw) e 4 – 4.5 m/s (50 mw). Da notare che la velocità «tipica» di fuga a piedi in galleria viene valutata in ca. 1-2 m/s, a seconda delle condizioni.

Tra le caratteristiche fisiche relative alla propagazione dei fumi la più importante è certamente il livello di stratificazione. I fumi caldi tendono naturalmente a concentrarsi nella parte superiore della galleria, lasciando inizialmente libera la visuale agli utenti. Ogni disturbo, in particolare velocità longitudinali superiori a ca. 1-2 m/s, veicolati fermi o in movimento, azionamento di *jet fans* o iniezioni di aria fresca nella zona invasa dal fumo, tende a ridurre il grado di stratificazione e il livello di visibilità. Il mantenimento per quanto possibile della stratificazione naturale è un obiettivo di sicurezza fondamentale, in particolare in caso di ventilazioni longitudinali in gallerie con traffico bidirezionale.



7 – Memorial Tunnel (lunghezza 854 m), test 501, 20 mw. Propagazione fumi 0, 1, 2, 3, 4 e 5 min. dopo l'accensione



8 – Memorial Tunnel (lunghezza 854 m), test 502, 50 mw. Propagazione fumi 0, 1, 2 e 3 min. dopo l'accensione

### 3.4 Elementi strutturali

La protezione della struttura è in generale un obiettivo certamente non trascurabile, ma assume un'importanza fondamentale in caso di gallerie realizzate in condizioni particolari, ad esempio sott'acqua oppure in condizioni geologiche difficili (es. imbocco galleria di base del San Gottardo a Bodio). I risultati sperimentali mostrano che le temperature massime alla parete raggiungono approssimativamente i valori seguenti:

- Auto 400 °C
- Bus / piccolo camion 700 °C
- Veicolo pesante 1'000 °C
- Cisterna 1'200 - 1'400 °C

### 4. Sicurezza in galleria

#### 4.1 Gli incendi in galleria sono rari

Incendi in galleria sono fortunatamente fenomeni estremamente rari, come testimoniato da dati statistici pur molto incerti:

Evento	Tipo	Casi / 10 <sup>6</sup> veicoli, km
Guasti		500 - 1'500
Incidenti	totale	50
	con feriti	10
	con vittime	1
Incendi	veicoli leggeri	2 - 10 - (25)
	veicoli pesanti	10
	con danni alla struttura	1
	con merci pericolose	2 (stima)

tab. 3 – Frequenza statistica di incendi in galleria

Nonostante i gravi incendi degli scorsi anni, le cifre di mortalità in galleria sono certamente modeste se confrontate con il numero di vittime annuali della strada, ca. 600 in Svizzera e ca. 120'000 nei paesi dell'OECD.

#### 4.2 Misure di sicurezza

Gli elementi principali di sicurezza in galleria sono:

- misure preventive;
- rilevamento rapido di situazioni anomale e potenzialmente pericolose;
- informazione tempestiva degli utenti;
- possibilità adeguate di fuga;
- misure tecniche per la protezione degli utenti, in particolare a livello di ventilazione;
- attivazione rapida di tutte le misure di sicurezza e gestione adeguata dell'evento;
- intervento rapido.

La complessa problematica della prevenzione esula in gran parte dalle competenze del progettista. Per ciascuno degli altri elementi esistono soluzioni tecniche e organizzative adeguate, che possono di norma essere progettate e implementate senza particolari problemi. La problematica non risiede dunque nell'identificazione e realizzazione di soluzioni settorialmente corrette, quanto piuttosto nella perfetta integrazione funzionale dei diversi elementi.

#### 4.3 Vie di fuga

Vie di fuga adeguate costituiscono indubbiamente un elemento di sicurezza fondamentale. Le possibilità di realizzazione variano molto in funzione dalla tipologia della galleria. In caso di gallerie a doppia canna la soluzione più semplice ed economica consiste nella realizzazione di collegamenti trasversali con un'interdistanza dell'ordine di 250-300 m. La problematica è molto più complessa nel caso di gallerie monotubo, per le quali viene adottata di norma una delle soluzioni seguenti:

- realizzazione di un cunicolo di sicurezza con collegamenti trasversali;

- realizzazione di un cunicolo al disotto del vano stradale;
- realizzazione di uscite direttamente verso l'esterno.

La realizzazione di rifugi chiusi, senza uscita verso l'esterno, è ancora praticata in alcuni paesi, tra cui la Francia, ma è oggi chiaramente in declino.

La realizzazione di un cunicolo di sicurezza consente di prevedere vie di fuga ogni ca. 250-300 m, come nel caso di gallerie bitubo, ed è da considerarsi ottimale dal punto di vista della sicurezza. A questo si può aggiungere l'indubbia utilità pratica di tali elementi dal punto di vista puramente tecnico. Il costo elevato di questa soluzione costringe in pratica a difficili compromessi. A livello normativo in Svizzera è oggi obbligatorio prevedere vie di fuga con un'interdistanza massima variante tra 720 e 215 m, a seconda delle caratteristiche particolari. Questo corrisponde a un notevole inaspriamento rispetto agli standard precedenti. L'adeguamento alla nuova bozza di direttiva europea richiederà ulteriori adeguamenti.

Ogni via di fuga deve essere adeguatamente segnalata e protetta contro la penetrazione di fumi in caso di incendio, in particolare per mezzo di un sistema adeguato di ventilazione e porte di protezione. All'interno devono esistere possibilità adeguate di comunicazione con la sala comando e con le squadre di intervento. È inoltre fondamentale garantire un livello adeguato di visibilità degli imbocchi, anche in presenza di fumo, ed evitare ogni possibilità di confusione tra vie di fuga e altri locali in galleria, la cui sicurezza in caso di incendio non è garantita. Questo aspetto, spesso un po' trascurato in passato, è stato magistralmente risolto nel traforo del Monte Bianco (vedi articolo a p. 91).

#### *4.4 Informazione degli utenti*

La comunicazione con gli utenti in galleria è difficile ma fondamentale. L'esperienza insegna che questo aspetto viene raramente trattato con la dovuta attenzione anche in nuove gallerie. In caso di emergenza occorre comunicare con gli utenti e informarli in modo tempestivo, chiaro e mirato sulla condotta da tenere. La prassi abituale prevede che le informazioni di emergenza vengano trasmesse per radio, interrompendo le trasmissioni con messaggi specifici. Questo elemento fondamentale di sicurezza deve essere appropriatamente integrato, ad esempio, per mezzo di pannelli a messaggio variabile che consentano di fornire indicazioni precise e mirate, come quella di arrestarsi e raggiungere al più presto le vie di fuga. Il tema è stato trattato in modo molto approfondito du-

rante il rinnovamento del traforo del Monte Bianco (vedi articolo a p. 91).

#### *4.5 Gestione della galleria*

La gestione di una galleria comporta un numero enorme di problematiche, prime fra tutte quella di garantire in ogni momento condizioni adeguate di confort e di sicurezza per gli utenti. Il mantenimento di adeguate condizioni di sicurezza è anche legato al rispetto di condizioni minime di esercizio. Esse devono essere formulate in modo chiaro ed esplicito, e la loro verifica continua è la premessa fondamentale per un esercizio sicuro. La complessa impiantistica che deve oggi venire realizzata, anche in gallerie di lunghezza modesta, non può essere gestita che per mezzo di un sistema informatico complesso. Le informazioni generate dal sistema stesso o raccolte attraverso i suoi innumerevoli sensori devono essere adeguatamente trattate. La maggior parte delle gallerie non sono presidiate o lo sono solo in modo parziale e a distanza. Si pone dunque la problematica di come gestire i diversi impianti in modo appropriato, a livello di manutenzione e di gestione dell'emergenza. La gestione corrente è oggi facilmente automatizzabile. In caso di situazioni potenzialmente pericolose si esige che la prima reazione degli impianti di sicurezza avvenga automaticamente e in tempi estremamente brevi. Questo richiede l'elaborazione di una serie di scenari e delle relative reazioni. Una sorveglianza continua di ogni galleria è comunque indispensabile per la verifica di diversi tipi di allarme e per la gestione ottimale dell'impiantistica di sicurezza in funzione della tipologia di incendio e della particolare strategia di intervento adottata.

L'intervento delle squadre specializzate non può normalmente, con poche eccezioni legate a gallerie di lunghezza importante con picchetto fisso, essere sufficientemente tempestivo per salvare vite umane. L'intervento è comunque fondamentale per limitare i danni dell'incendio e la conseguente interruzione del servizio. La formazione continua ed adeguata del personale di pronto intervento e di quello delle sale di comando costituisce un tema estremamente delicato e difficile, che non può non accentuarsi con la crescente sofisticazione dell'impiantistica di galleria.

#### *4.6 Costruzione e rinnovamento*

Insegnamenti devono essere tratti dalle tristi lezioni legate ai gravi incendi degli scorsi anni. Per chi si occupa di progettazione si impone in primo luogo di analizzare gli avvenimenti e capire come si sarebbero potute evitare o mitigare talune con-

seguenze, in modo che il passato possa veramente illuminare la progettazione futura. Questo è comparativamente facile nel quadro della progettazione di nuove gallerie, ma costituisce spesso un problema finanziariamente e tecnicamente pressoché insolubile per gallerie esistenti. Si impone dunque prepotentemente l'esigenza di adeguare continuamente l'impiantistica di gallerie già in esercizio da qualche anno. Questo aspetto è particolarmente importante in considerazione del periodo di realizzazione delle reti stradali e autostradali di diversi paesi europei, a seguito del quale molte gallerie raggiungono oggi un'«età critica».

## 5. Ventilazione

Gli obiettivi fondamentali che condizionano la concezione e la progettazione di sistemi di ventilazione sono essenzialmente:

- buon funzionamento in condizioni normali di esercizio, in termini di visibilità e concentrazione di sostanze inquinanti;
- sicurezza in caso di incendio;
- funzionamento rispettoso dell'ambiente;
- economicità di realizzazione, manutenzione ed esercizio.

Questi obiettivi sono parzialmente contraddittori e richiedono compromessi. Il processo di ottimizzazione di un sistema di ventilazione è legato a un grande numero di fattori oggettivi e soggettivi più o meno «congiunturali»:

- La riduzione delle emissioni dei veicoli a motore, legata agli sviluppi tecnici e normativi, ha permesso negli scorsi anni di ridurre drasticamente le esigenze in termini di apporto di aria fresca in condizioni normali di esercizio. Le emissioni dei veicoli a motore sono dimezzate nell'ultimo decennio, e una riduzione simile è attesa nel prossimo decennio. Il fabbisogno di aria fresca risulta ridotto dello stesso fattore.
- Dopo l'incendio nel traforo del Monte Bianco si riscontra una maggiore sensibilità alle esigenze della sicurezza in caso di incendio. Questo effetto, almeno parzialmente passeggero, deve essere «gestito» con cautela da parte di un consulente, evitando investimenti eccessivi in taluni settori «di moda».
- L'aumento dei volumi di traffico, in particolare del traffico pesante, è generalizzato. Ne conseguono, in assenza di misure adeguate, aumenti del livello globale di rischio.
- L'identificazione del giusto equilibrio tra diversi tipi di misure, ad esempio vie di fuga supplementari e miglioramenti a livello del sistema di ventilazione, è soggetto a forti sbalzi «congiunturali».

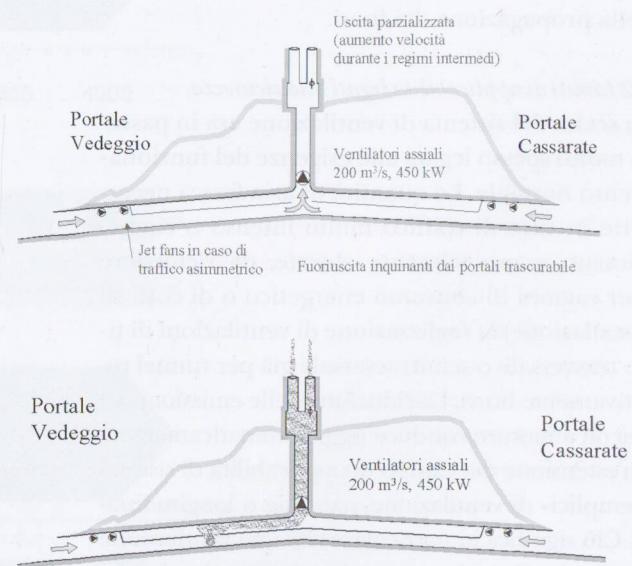
Solo chiari elementi normativi permettono di definire una linea di condotta coerente, che limiti per quanto possibile variazioni locali o temporali troppo forti, che si esprimono in variazioni repentine nello standard di sicurezza in gallerie realizzate in periodi diversi, ma che dovranno coesistere per molti anni.

### 5.1 Sistemi di ventilazione

Le tipologie fondamentali di ventilazione sono, in ordine di complessità e costi crescenti:

- ventilazione naturale;
- ventilazione longitudinale;
- ventilazione semitrasversale;
- ventilazione trasversale.

La scelta del sistema di ventilazione risulta da un'ottimizzazione tecnico-economica. Fondamentale in questo contesto è la crescente divergenza tra le esigenze legate al funzionamento normale e casi – fortunatamente estremamente rari – di incendio. Il raggiungimento degli obiettivi enunciati sopra conduce oggi spesso a forme ibride di ventilazione. Un tipico esempio sono sistemi di ventilazione longitudinale, eventualmente con aspirazione centrale, con soletta intermedia e serrande per l'estrazione localizzata dei fumi. Questi sistemi vengono oggi utilizzati molto frequentemente per gallerie a traffico bidirezionale di ca. 1.5 - 5 km di lunghezza.



9 – Ventilazione della galleria Vedeggio-Cassarate, in via di realizzazione. In condizioni normali di funzionamento la ventilazione è di tipo longitudinale, con estrazione al centro. In caso di incendio un sistema di serrande nella soletta intermedia permette di concentrare l'aspirazione dei fumi in prossimità dell'incendio. In entrambi i casi l'espulsione avviene attraverso un camino.

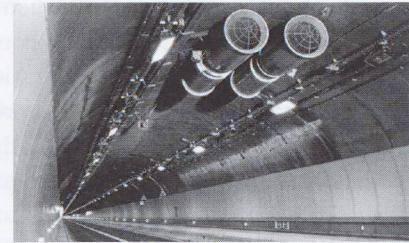
Dal punto di vista della sicurezza in caso di incendio è più utile distinguere i diversi sistemi in funzione del grado di controllo della propagazione dei fumi. Possiamo dunque distinguere in prima approssimazione:

- ventilazioni naturali, senza alcuna possibilità di controllo della propagazione dei fumi. Esse sono accettabili unicamente per gallerie molto brevi, in cui gli utenti possono mettersi in salvo con mezzi propri in caso di necessità.
- ventilazioni longitudinali, che permettono di controllare la propagazione dei fumi influenzando la velocità longitudinale dell'aria per mezzo normalmente di *jet fans*. Esse sono ideali in caso di traffico unidirezionale fluido, ma limitate a lunghezze dell'ordine di ca. 1 - 1.5 km in caso di traffico bidirezionale o frequentemente congestionato.
- ventilazioni trasversali o semitrasversali con possibilità di aspirazione dei fumi. Questi sistemi permettono di estrarre localmente i fumi prodotti da un incendio e ne possono controllare la propagazione in modo molto efficace. Tali sistemi sono di regola dotati di una soletta intermedia con serrande motorizzate e telecomandate per l'aspirazione dei fumi. Essi richiedono la realizzazione di opere civili importanti, in particolare di grosse centrali di ventilazione e di camini di espulsione.

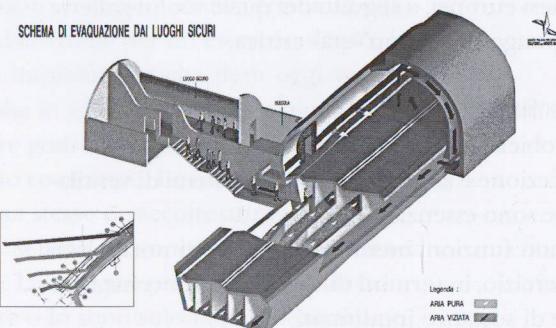
I costi di realizzazione, manutenzione ed esercizio crescono dunque di norma in modo molto importante in funzione del grado di controllo della propagazione dei fumi.

### 5.2 Limiti di applicabilità legati alla sicurezza

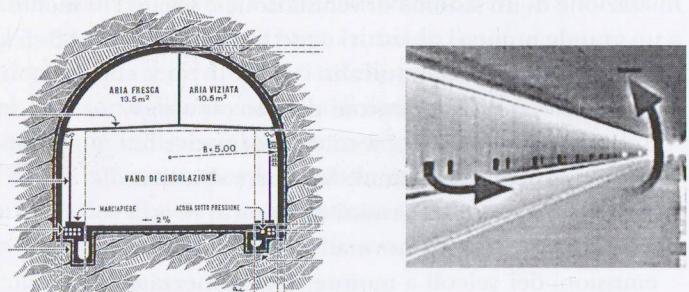
La scelta del sistema di ventilazione era in passato molto spesso legata alle esigenze del funzionamento normale. Le quantità di aria fresca necessarie in caso di traffico molto intenso o congestionato erano talmente elevate, da richiedere (per ragioni di consumo energetico o di costi di installazione) la realizzazione di ventilazioni di tipo trasversale o semitrasversale già per tunnel relativamente brevi. La riduzione delle emissioni dei veicoli a motore conduce oggi automaticamente a un'estensione del campo di applicabilità di sistemi «semplici» di ventilazione, naturale o longitudinale. Ciò significa in particolare che una ventilazione meccanica si rende necessaria solo a partire da lunghezze maggiori rispetto al passato, mentre ventilazioni longitudinali sono applicabili anche per gallerie di lunghezza molto maggiore. Le esigenze di sicurezza in passato si «sposavano» dunque meglio con le esigenze del funzionamento normale, per cui quest'ultimo era giustamente determinante. I



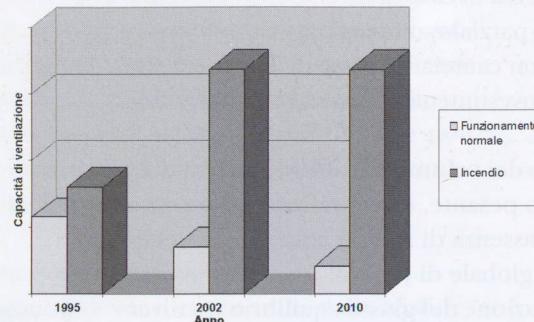
10 – Sistema di ventilazione longitudinale con jet fans



11 – Sistema di ventilazione semitrasversale (traforo del Monte Bianco). Quattro canali sotto la carreggiata garantiscono l'apporto di aria fresca, mentre il quinto viene utilizzato per l'estrazione dei fumi in caso di incendio



12 – Sistema trasversale di ventilazione (galleria stradale del San Gottardo). L'aria fresca viene iniettata attraverso le aperture laterali, mentre l'estrazione avviene in volta



13 – Le esigenze in termini di ventilazione sono cambiate drasticamente nel corso degli anni. Se da una parte le esigenze legate al funzionamento normale si sono ridotte, le esigenze legate alla sicurezza in caso di incendio sono aumentate

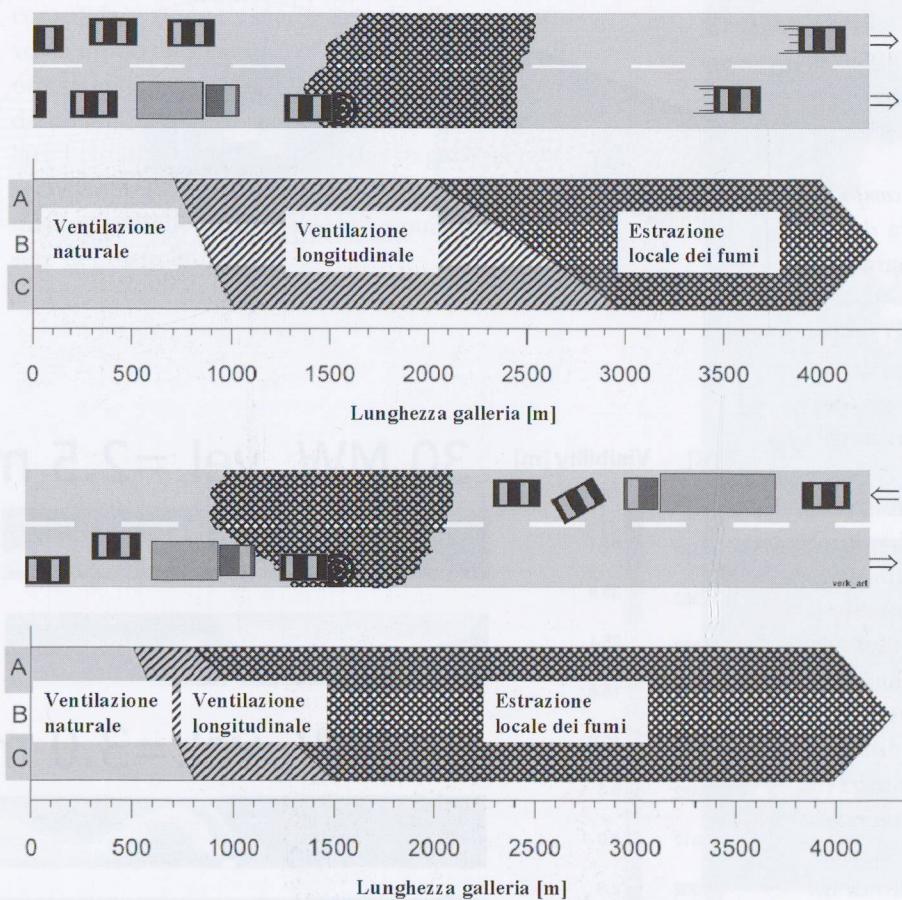
limiti di applicabilità sono oggi dettati prevalentemente da esigenze di sicurezza, la cui valutazione può essere molto soggettiva. I limiti di applicabilità dei diversi sistemi di ventilazione devono dunque venire dettati, almeno indicativamente, a livello normativo.

## 6. Simulazione di incendi in galleria

Il calcolo di un sistema di ventilazione si basa su leggi fluidodinamiche e metodologie molto ben note. Esse permettono di determinare le caratteristiche di un sistema di ventilazione in funzione di obiettivi prefissati. Questo tipo di analisi è di norma puramente stazionario, invariabile quindi nel tempo. Esso è certamente adeguato in fase di concezione e progettazione di un sistema, ma non fornisce alcuna indicazione per quanto concerne ad esempio la propagazione dei fumi in determinate circostanze. In altri termini, questo tipo di procedura non permette di valutare le conseguenze di un incendio.

## 6.1 Analisi di scenari di incendio

La necessità di valutare con precisione le conseguenze di una particolare tipologia di incendio si propone con urgenza crescente, in funzione di domande legittime concernenti il reale grado di sicurezza di un impianto nuovo o esistente e sulle migliori modalità di gestione in caso di incendio. Il livello di sicurezza degli utenti è legato a diversi elementi costanti e conosciuti (ad esempio le caratteristiche della galleria e degli impianti), ma anche a una serie di variabili sconosciute a priori (posizione dell'incendio, flussi di traffico, stato iniziale della ventilazione ecc.). Occorre dunque analizzare le condizioni in galleria in funzione di un numero molto elevato di combinazioni di parametri variabili. In altri termini, l'analisi del buon funzionamento del sistema viene eseguita per mezzo della simulazione di un numero elevato di scenari di incendio. L'analisi dei risultati fornisce le indicazioni indispensabili per un eventuale miglioramento del sistema. Le tecniche moderne di



14 – Limiti di applicabilità dei sistemi di ventilazione, secondo la bozza di direttiva svizzera. Sopra: traffico unidirezionale fluido; Sotto: traffico bidirezionale o frequentemente congestionato. I parametri A, B, C denotano il livello generale di rischio (A = elevato, C = modesto), valutati principalmente in funzione del volume totale di traffico, dei transiti di veicoli pesanti e della pendenza longitudinale

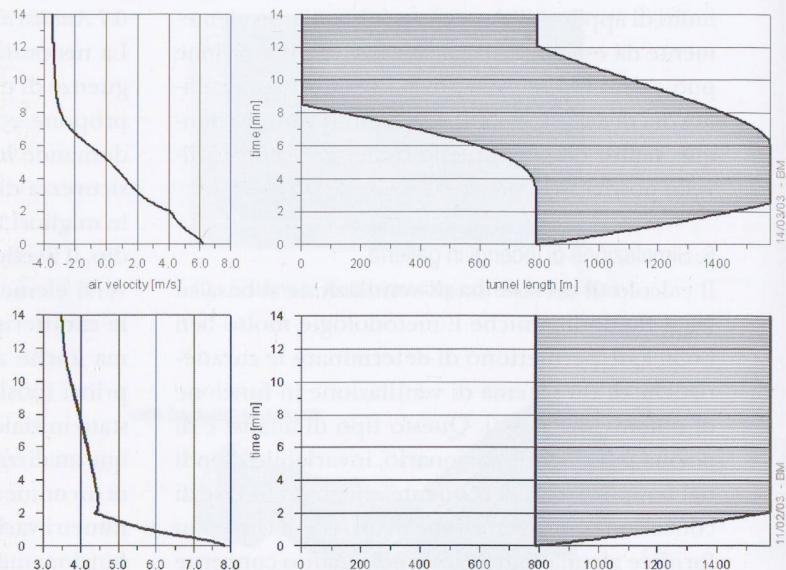
simulazione permettono così di «migliorare sbagliando».

Svariati livelli di analisi sono stati sviluppati negli ultimi anni, ma due metodologie si stanno imponendo con chiarissimi vantaggi: la simulazione monodimensionale e quella tridimensionale. Queste due tecniche sono molto ben distinte in termini di rappresentatività e di esigenze. Un'analisi monodimensionale può essere eseguita in modo rapido e semplice, purché si disponga di un software adeguato (attualmente non esistono ancora prodotti commerciali adeguati e lo sviluppo va fatto «in casa»). L'approccio, pur se semplificato, consente di raggiungere risultati molto vicini alla realtà a costi ridotti.

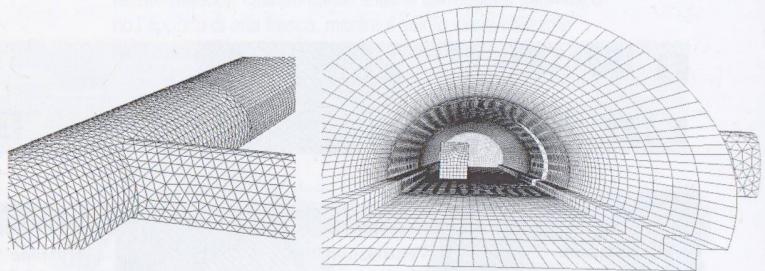
Questo livello di simulazione consente di studiare velocemente il comportamento di un sistema di ventilazione per un numero elevato di scenari di incendio. Esso permette dunque di valutare le conseguenze in caso di incendio, e migliorare ove necessario il sistema. Questo livello di simulazione è particolarmente adatto in fase di verifica e di ottimizzazione di sistemi di ventilazione. Il suo utilizzo è insostituibile per la determinazione delle modalità automatiche di gestione della galleria in caso di incendio, che vengono poi memorizzate nel sistema di gestione.

**6.2 Simulazione tridimensionale: l'incendio nel computer**  
La simulazione tridimensionale è ancora dominio di esperti e richiede l'utilizzo di programmi raffinati e costosi, di calcolatori potenti e – *last but not least* – di molta pazienza, in quanto una singola simulazione può richiedere alcuni giorni di calcolo ininterrotto su un PC avanzato. Come per molte altre tecniche avanzate, un suo uso incauto può rivelarsi disastroso.

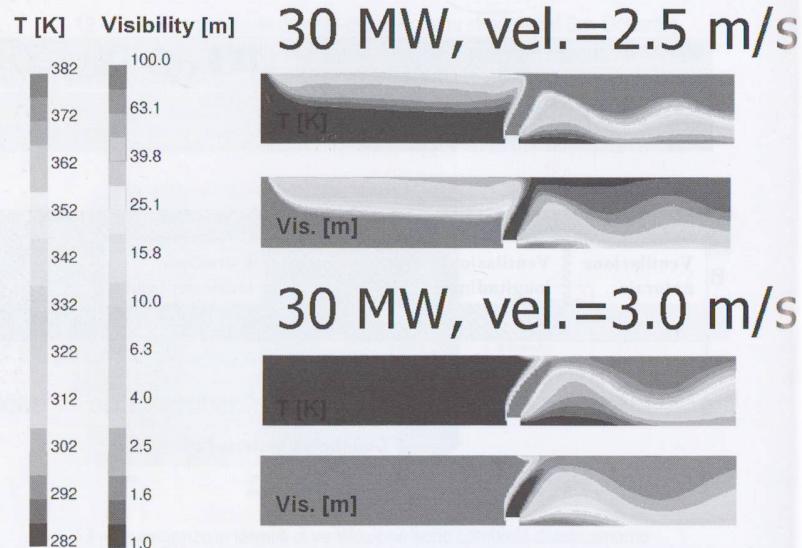
L'analisi si basa sulla suddivisione del dominio di calcolo in un grande numero di piccoli volumi (da alcune centinaia di migliaia ad alcuni milioni), e sulla risoluzione delle equazioni fondamentali per ogni singolo elemento. L'elaborazione della soluzione richiede tempi di calcoli molto lunghi, ma la pazienza è compensata da risultati estremamente dettagliati e accurati, che consentono la valutazione e rappresentazione dei valori fisici rilevanti in tutto il campo di calcolo. Questo tipo di analisi, se propriamente condotto, raggiunge un livello di precisione paragonabile a quello di un esperimento, a costi molto più ridotti.



15 – Propagazione fumi nel tubo discendente della galleria del Markusberg, Lussemburgo (lunghezza 1'575 m, pendenza 5%, ventilazione longitudinale). Sopra: senza ventilazione; sotto: 12 *jet fans* in funzione. Le figure a sinistra mostrano l'evoluzione temporale della velocità dell'aria in galleria, quelle a destra la propagazione dei fumi nel tempo



16 – Griglie per la simulazione numerica



17 – Campi di temperatura e visibilità (sezioni longitudinali) in caso di incendio di un veicolo pesante. Simulazione tridimensionale realizzata utilizzando il programma FLUENT

## 7. Prove incendio

La realizzazione di prove di incendio in galleria è molto difficile e costosa. La struttura e gli impianti devono essere protetti in prossimità dell'incendio e un buon lavaggio diventa indispensabile. Ciononostante l'esigenza di condurre prove di incendio in gallerie si sta chiaramente imponendo, tanto per gallerie in fase di messa in esercizio, quanto come verifica periodica in gallerie esistenti. Queste prove possono essere combinate in modo ideale con esercitazioni delle squadre di intervento. Le prove eseguite in vista dell'apertura del traforo del Monte Bianco (vedi articolo a p. 86) sono a questo proposito esemplari.

## 8. Quanta sicurezza per le nostre gallerie?

La determinazione del «corretto» livello di sicurezza in galleria non può certamente essere affidata al progettista. Le esigenze in materia - come d'altra parte le disponibilità di finanziamento - sono soggette a sbalzi a volte repentina. I recenti gravissimi incendi hanno provocato un'ondata di reazioni a volte molto emotive. Si tratta ora di consolidare queste esperienze a livello normativo, in modo da garantire una livello sufficiente di omogeneità per le realizzazioni future, smorzando oscillazioni eccessive legate ad eventi particolari. I rischi correlati all'incendio in galleria possono essere drasticamente ridotti per mezzo di misure tecniche appropriate, ma non possono essere del tutto eliminati.



18 – Prove incendio nell'Engelbergtunnel, Stuttgart