

# Misure di radon al tunnel del Monte Bianco

Massimo Faure Ragani<sup>1</sup>, Francesco Frigerio<sup>2</sup>, Giuseppina Arman<sup>1</sup>, Enrico Chiaberto<sup>3</sup>,  
Mauro Magnoni<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ARPA Valle di Aosta, [m.faureragani@arpa.vda.it](mailto:m.faureragani@arpa.vda.it)

<sup>2</sup> Fondazione Salvatore Maugeri IRCCS – Centro di Ricerche Ambientali, [francesco.frigerio@fsm.it](mailto:francesco.frigerio@fsm.it)

<sup>3</sup> ARPA Piemonte, [enrico.chiaberto@arpa.piemonte.it](mailto:enrico.chiaberto@arpa.piemonte.it)

## INTRODUZIONE

L'infrastruttura del Traforo del Monte Bianco è un luogo di lavoro con presenza di radon nel quale sono stati attuati interventi tecnici e organizzativi per contenere l'esposizione del personale al di sotto dei livelli di azione previsti dalla legislazione italiana.

Le misure condotte a partire dagli anni '90 hanno permesso di verificare che il problema dell'esposizione al radon interessa particolarmente il versante italiano, dove si riscontrano le concentrazioni più significative [1]. Ciò è dovuto alla differente composizione della roccia lungo il tunnel e al flusso naturale d'aria verso l'Italia a causa della differente quota e quindi pressione dei piazzali di ingresso (Francia 1274 m s.l.m. – Italia 1381 m s.l.m.).

Oltre al flusso naturale, il ricambio d'aria all'interno del tunnel è garantito anche da un flusso di aria forzata immessa nel traforo attraverso canali collocati sotto il piano stradale. Il flusso di aria forzata è alimentato da due centrali indipendenti poste sui due versanti e viene immesso nella galleria mediante bocchette poste a livello del piano stradale. Un ulteriore canale sotterraneo per l'evacuazione dei fumi è collegato con bocche di aspirazione collocate sulla volta della galleria e viene attivato, con appositi motoventilatori di aspirazione, solo in caso di incendio.

La progettazione dell'infrastruttura, inaugurata nel 1965, non teneva conto del rischio da esposizione al radon: il flusso di aria fresca dal versante italiano viene forzato attraverso un plenum di immissione collocato al di sotto della centrale di ventilazione realizzata sotto il piano stradale. Non si può escludere che l'aria fresca che scorre nei canali sotterranei si arricchisca di radon emanato direttamente dalla roccia.

Negli anni precedenti, il monitoraggio è stato condotto estensivamente con dosimetri a integrazione come richiesto dalla normativa per i luoghi di lavoro (Dlgs 230/95) e, per periodi limitati, mediante misure orarie in continuo al fine di ottenere informazioni sugli andamenti della concentrazione in specifici locali dove era necessario abbattere significativamente la concentrazione. In particolare queste misure hanno permesso di verificare che in configurazione "incendio", ovvero quando il canale di evacuazione dei fumi è mantenuto in depressione rispetto al tunnel mediante ventilatori dedicati, la concentrazione di radon nei locali di servizio quali il locale pompe antincendio e la sovrastante centrale di ventilazione sud, si riduce drasticamente. Inoltre si può affermare che non esiste una correlazione significativa fra i flussi di traffico, che determinano le variazioni di portata della ventilazione forzata, e le concentrazioni medie misurate di radon [2].

Tutte le misure effettuate negli anni passati mostrano che le concentrazioni di radon hanno variazioni temporali importanti che non dipendono dai flussi di traffico o dalla immissione forzata di aria. Lo scopo di questo lavoro è estendere il monitoraggio orario di radon in aria in più siti contemporaneamente per cercare di comprendere le relazioni che legano le concentrazioni di radon misurate ad altri parametri quali ad esempio i parametri meteorologici. È stata, inoltre, effettuata una misura di radon nell'acqua di una venuta presente all'interno del tunnel che potrebbe essere un'ulteriore fonte di immissione di radon.

Inoltre, pur essendo già stati attuati tutti i provvedimenti che garantiscono la protezione dei lavoratori ai sensi della normativa vigente, una migliore conoscenza delle dinamiche di circolazione del radon nell'infrastruttura è, in ogni caso, base indispensabile per l'ottimizzazione della protezione dei lavoratori, anche in vista dell'attuazione della nuova Direttiva 2013/59/Euratom che potrebbe portare ad una riduzione dei livelli di azione.

Nel presente lavoro sono riportati:

- i monitoraggi dal 2003-2014 effettuati secondo la normativa vigente;
- le misure orarie del radon con strumenti automatici in continuo in alcuni locali tecnici;
- la misura della concentrazione equivalente all'equilibrio EEC<sup>1</sup> su base bioraria per 8 giorni;
- le misure di radon nell'acqua presente all'interno del traforo.

## MATERIALI E METODI

### MISURA DI RADON CON CAMPIONATORI PASSIVI

Per la misura di radon sono stati impiegati rivelatori a tracce nucleari (dosimetri) CR-39 sostituiti ogni tre mesi nelle posizioni a concentrazione più elevata e ogni sei mesi nelle posizioni di controllo, dove è stata sempre riscontrata una concentrazione < 100 Bq/m<sup>3</sup>.

I rivelatori prodotti dalla Radosys (Radosys, Ltd., Ungheria) sono stati forniti e letti dalla FGM Ambiente di Casalmaiocco (LO) che dichiara, alle concentrazioni osservate, un'incertezza del 12 % con un intervallo di confidenza del 68 % e un'accuratezza che aumenta con la concentrazione di radon fino ad un'esposizione critica oltre la quale la sovrapposizione delle tracce non ne consente la valutazione.

### MISURE DI RADON CON STRUMENTAZIONE ATTIVA

L'andamento nel tempo dell'attività del radon in tre locali tecnici situati nel lato italiano del tunnel è stato misurato in continuo per 9 mesi mediante tre strumenti a batterie di Li<sup>+</sup> del tipo Radim 5B (SSM J.Plch Eng. PRAGUE). Questi strumenti calcolano la concentrazione di <sup>222</sup>Rn a partire dalla misura dei figli a breve vita (<sup>218</sup>Po e <sup>214</sup>Po) nei quali il gas decade. Lo strumento è dotato di un rivelatore a stato solido a barriera di Si. Il campo di applicazione è compreso tra 80 Bq/m<sup>3</sup> e 50.000 Bq/m<sup>3</sup> e una sensibilità di 0.3imp/h/Bq/m<sup>3</sup>. Il campionamento per diffusione ha la durata fissa di 60 minuti e un data-logger memorizza i dati raccolti (fino a 60.000 misure). Il consumo energetico è di 240µA in lavoro e 6 µA in stand-by. Queste caratteristiche li rendono adatti a lunghe campagne di misura in particolari condizioni ambientali come quelle all'interno del Tunnel.

### MISURA IN CONTINUO DI EEC

La misura in continuo della Concentrazione Equivalente di Radon all'Equilibrio (EEC) è stata effettuata mediante lo strumento EQF 3220 (SARAD Co - Dresda). Esso monitora in continuo sia l'attività alfa del gas aspirato (<sup>220</sup>Rn e <sup>222</sup>Rn) sia quelle relative alle rispettive progenie in aria separando quella "libera" da quella adesa al particolato. Ai fini del presente lavoro si considerano gli andamenti delle concentrazioni di radon e della EEC totale con risoluzione temporale di 120 minuti. Dividendo il valore di EEC per il corrispondente valore del radon si ottiene un andamento nel tempo del fattore di equilibrio. Le misure sono corredate dei dati di temperatura, pressione barometrica e umidità relativa.

### DETERMINAZIONE DI RADON IN ACQUA

Per la misura del radon nell'acqua è stato utilizzato uno strumento del tipo Alphaguard (Saphymo-De) predisposto per la modalità in flusso (0.3 l/min) inserito nel circuito chiuso di una apposita linea a tenuta di gas (AquaKit) che ricircola un volume fisso di aria mediante una piccola pompa.

L'aria ricircolata viene fatta gorgogliare attraverso il campione d'acqua con l'effetto di estrarne il radon disciolto; il processo continua fino a quando non è stato raggiunto l'equilibrio di ripartizione del gas tra acqua e aria, che è dinamico e varia con la temperatura.

---

<sup>1</sup> La EEC rappresenta la concentrazione ipotetica di radon che produrrebbe una concentrazione di energia potenziale alfa dovuta ai figli a vita breve (PAEC) pari a quella realmente esistente, in cui i figli non sono in equilibrio con il progenitore.

L' AlphaGuard misura il flusso del radon in aria fino al valore di equilibrio, che viene raggiunto entro poche decine di minuti. Dal contenuto di radon nell'aria all'equilibrio si risale a quello inizialmente contenuto nel campione d'acqua attraverso il coefficiente di ripartizione.

La metodologia è veloce e ad alta sensibilità, ma non esente da rischio di errori sistematici soprattutto legati all'individuazione del punto di equilibrio.

## MISURE AMBIENTALI E TECNICHE

Le misure ambientali e di funzionamento degli impianti di aspirazione del tunnel sono state ricavate dai dati registrati dal sistema di Gestione Tecnica Centralizzata (GTC) del Gruppo Europeo di Interesse Economico per il Traforo del Monte Bianco, GEIE TMB.

## RISULTATI

### MONITORAGGI

Il GEIE-TMB, che dal 9 marzo 2002 è responsabile di tutte le attività connesse alla gestione operativa del Traforo, in ottemperanza al D.Lgs 241/2000, ha intrapreso entro i due anni dall'inizio dell'attività, il monitoraggio della concentrazione media annuale di radon nei luoghi di lavoro.

Dal periodo 2003-2004 sono pertanto disponibili dati sulla concentrazione di radon, mediata su periodi minimi di tre mesi, per tutti i locali nei quali la concentrazione di radon può superare i  $400 \text{ Bq/m}^3$  e per altri locali con concentrazione di radon inferiore, ma ritenuti di particolare rilevanza, per esempio in quanto presidiati in permanenza (Figura 1).

Le misure nei locali del versante francese sono state eseguite per la durata di 1 anno nel 2003 e per la durata di 3 mesi nel 2008, dopo il completamento di lavori di ristrutturazione, e hanno riportato come atteso valori  $< 400 \text{ Bq/m}^3$ .

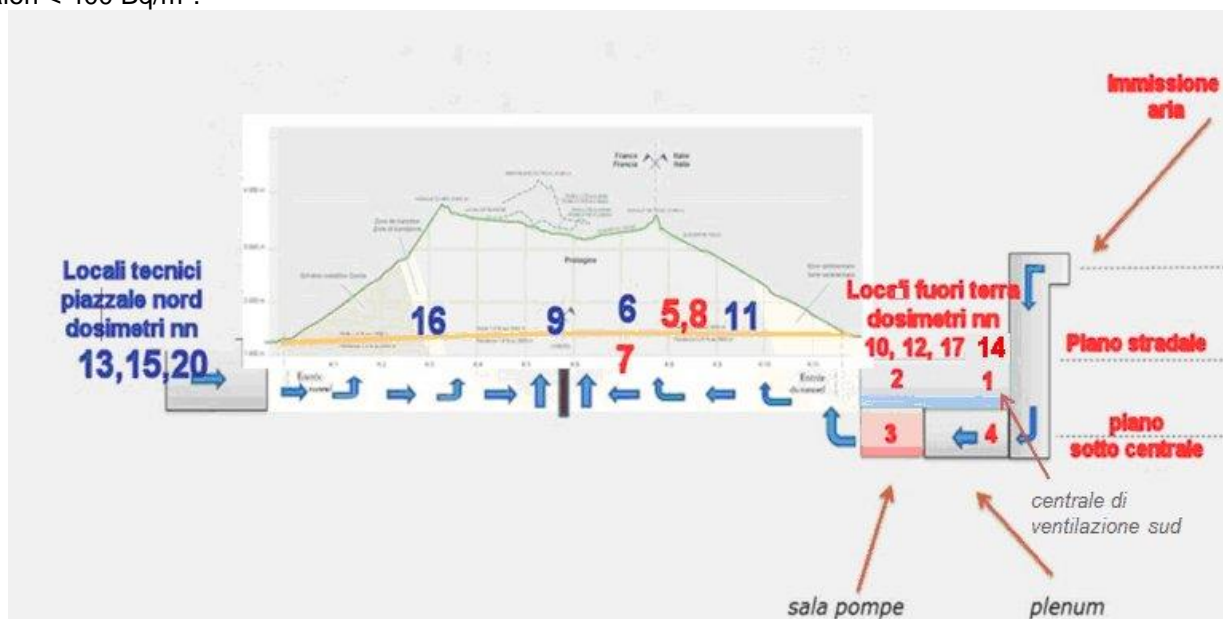


Figura 1 Posizione dei dosimetri. In rosso i siti in cui la concentrazione di attività di radon risulta generalmente  $> 400 \text{ Bq/m}^3$ . Si noti la collocazione della centrale di ventilazione sud e la sala pompe antincendio ric4 all'ingresso del lato italiano

Nella Figura 2 sono confrontati, a titolo di esempio, gli andamenti della concentrazione di radon in due ambienti significativi: il locale pompe antincendio ric4, collocato sotto la centrale di ventilazione sud, dove si misura il massimo valore di concentrazione di radon tra tutti i locali di lavoro di pertinenza della struttura, e il Luogo Sicuro 25 collocato approssimativamente al centro del versante italiano.

Le barre di errore sono riferite alla variazione della concentrazione di radon all'interno dell'anno, rappresentata come deviazione standard rispetto alla media.

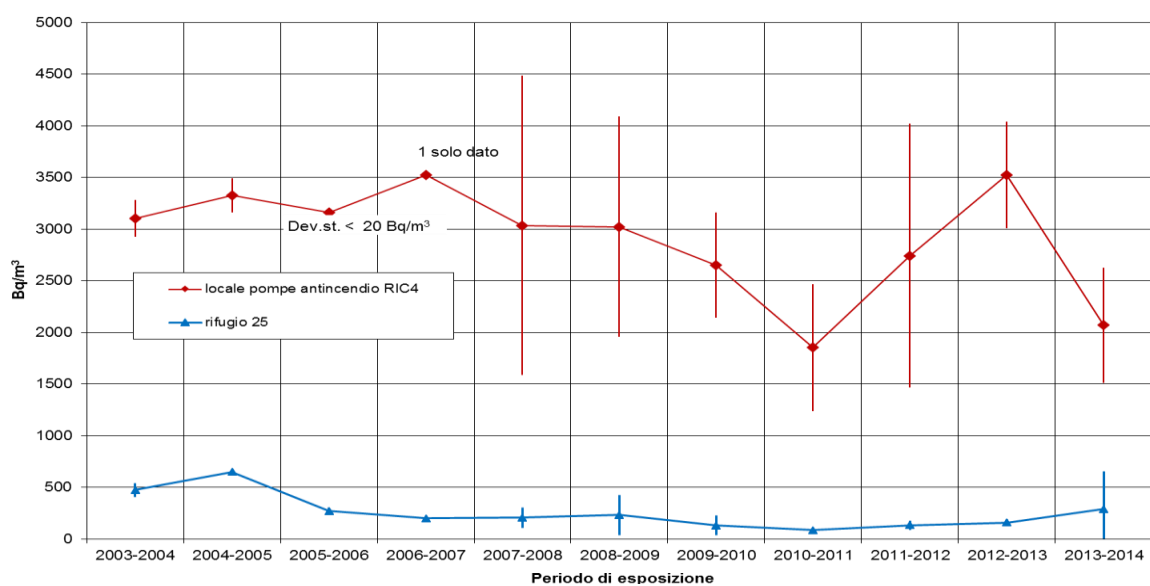


Figura 2 Andamento della concentrazione di radon in due locali significativi: sala pompe antincendio ric4 e Luogo Sicuro 25. Le barre di errore sono riferite alla variazione della concentrazione di radon all'interno dell'anno, rappresentata come deviazione standard rispetto alla media

Nella Tabella 1 dove sono riportati i dati misurati mediante i dosimetri nel periodo 2013-2014 si possono osservare le variazioni tipiche tra un periodo di esposizione e l'altro all'interno dell'anno.

Posizione	14 maggio 16 settembre 2013	16 settembre 23 dicembre	23 dicembre '13 17 marzo '14	17 marzo 16 luglio 2014	media annuale 2013-2014
1 Centrale ventilazione sud uscita ascensore	1207	1384	1365	1361	<b>1329</b>
2 Centrale ventilazione sud pilastro lucernario	1243	1490	1467	1454	<b>1413</b>
3 Centrale ventilazione sud pompe antincendio RIC4	1687	1324	2418	1779	<b>1802</b>
4 Centrale ventilazione sud plenum immissione	235	298	226	304	<b>266</b>
5 Luogo Sicuro 26		529	543	120	<b>536</b>
6 Luogo Sicuro 25	760	136	125	468	<b>372</b>
7 Canale 3 sotto luogo sicuro 25	557	950	891	843	<b>810</b>
8 Cabina elettrica luogo sicuro 26		638	593	538	<b>590</b>
9 Postazione centrale		60		51	<b>56</b>
10 Magazzino sud piano terra	264	466	440	403	<b>393</b>
11 Luogo sicuro Garage		157		85	<b>121</b>
12 Uffici magazzino sud	127	333	423	268	<b>288</b>
14 Locale antenne radio sud, piano terra	516	1144	1201	937	<b>950</b>
17 Ufficio meccanici sud	367	1046		772	<b>729</b>

Tabella 1 Risultati del monitoraggio con dosimetri nel periodo 2013-2014

## MISURE ORARIE DELLE CONCENTRAZIONI DI RADON

Per approfondire le dinamiche di ingresso del radon nei locali tecnici e in alcuni uffici del Tunnel, si sono posizionati 3 Radim nei seguenti locali:

- *centrale di ventilazione sud*. E' un locale di grandi dimensioni (60mx20mx10m) dove sono presenti i 4 grossi ventilatori che prelevano l'aria esterna dalla torre di aerazione e la immettono nella galleria. Il sistema di ventilazione del tunnel è costituito da due gruppi di pompaggio situati l'uno all'ingresso italiano e l'altro a quello francese che prelevano l'aria all'esterno, la immettono in condotti al di sotto del piano stradale e successivamente all'interno della galleria tramite bocchette situate al piede della volta poste a distanza di 10 m l'una dall'altra. Ogni ventilatore immette aria in un condotto separato e copre 1450 metri di galleria. L'aerazione del locale è naturale ed è fornita da un grosso lucernaio del quale non sono programmati orari di apertura. All'interno della centrale sono presenti dei condizionatori che ricircolano l'aria e rimuovono il calore prodotto dai motori, dai trasformatori e quadri elettrici a servizio di questi, mantenendo una temperatura all'incirca di 23°C -24°C
- *sala pompe ric 4*. E' la sala in cui sono situate le pompe antincendio; si trova vicino alla centrale di ventilazione a cui è collegata tramite una piccola scala essendo situato ad un livello inferiore, alla stessa quota del "plenum" di immissione che è il vano attraverso cui transita tutta l'aria immessa in galleria.
- *magazzino esterno* (piano terreno fino al 15/01/2014 ed ufficio dal 15/01/2013). E' una costruzione posta vicino all'ingresso italiano, separata dalla struttura del tunnel, su due piani, senza nessuna parete contro terra.

Gli strumenti sono stati accesi il 24 ottobre 2013; quelli nella centrale di ventilazione e nel magazzino esterno sono ancora in misura, mentre quello nella sala pompe si è guastato in seguito ad un problema di infiltrazione di acqua il 12 giugno 2014.

In figura 3 si riportano gli andamenti orari della concentrazione di radon rilevati.

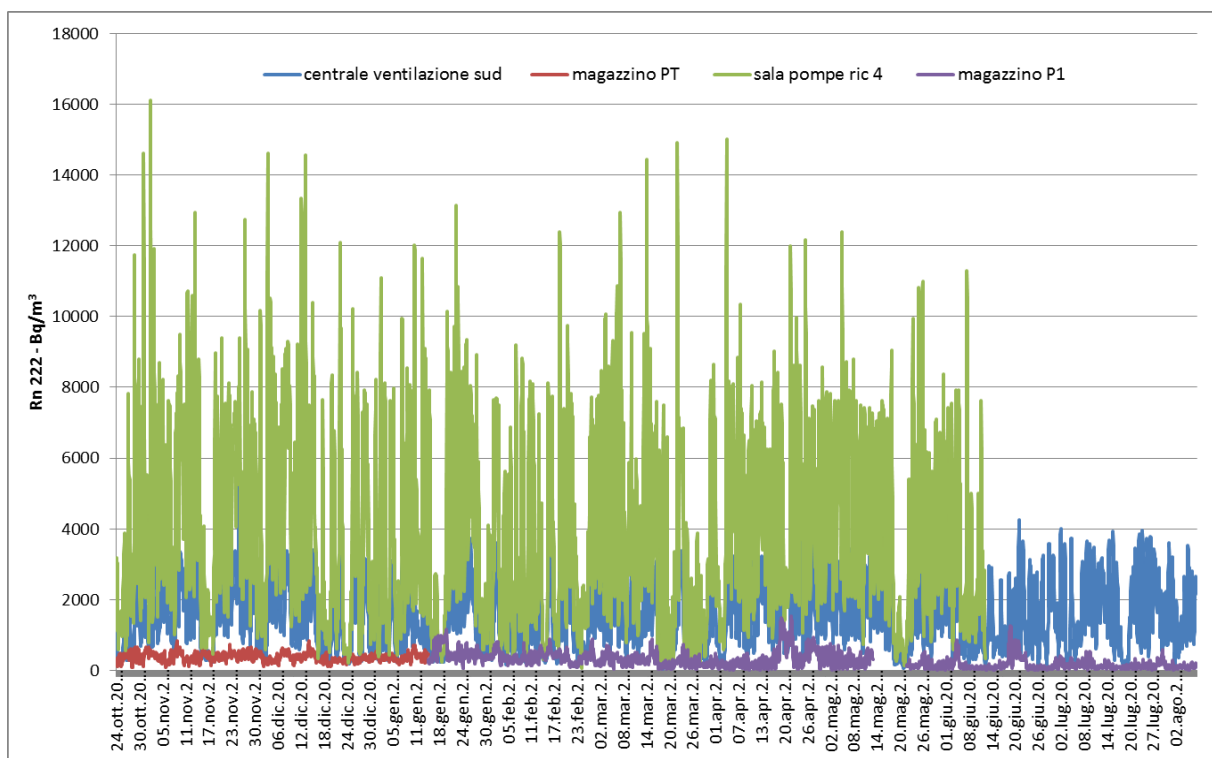


Figura 3 Andamenti orari della concentrazione di radon in alcuni locali del tunnel.

Le concentrazioni di radon nei vari locali hanno livelli significativamente diversi e le medie del periodo si attestano sui seguenti valori.

Sito	Concentrazione media (Bq/m <sup>3</sup> )	Deviazione standard (Bq/m <sup>3</sup> )	Coefficiente di variazione %	Concentrazione massima (Bq/m <sup>3</sup> )
centrale ventilazione sud <i>ottobre 2013-agosto 2014</i>	1667	1065	64%	5876
sala pompe ric 4 <i>ottobre 2013-giugno 2014</i>	4236	2684	63%	16115
magazzino PT <i>ottobre 2013-gennaio2014</i>	380	118	31%	839
magazzino P1 <i>gennaio 2014-agosto 2014</i>	274	224	82%	1529

Tabella 2 Statistiche descrittive relative alle concentrazioni di radon in alcuni locali del tunnel

Gli andamenti evidenziano in tutti i siti monitorati (anche se in misura minore nel piano terreno del magazzino) una marcata variabilità del radon (coefficiente di variazione di >60%). Nel primo piano del magazzino la variabilità può essere anche dovuta alla presenza di personale nelle ore di ufficio e conseguente aerazione del locale.

Gli andamenti (figura 4) della concentrazione di radon misurati nella centrale di ventilazione sud e nella sala pompe ric 4 risultano correlati ( $R^2 > 0.9$ ) con concentrazioni inferiori nella centrale di ventilazione. Tale comportamento è giustificabile in relazione alla vicinanza dei locali e alla differente dimensione. La vicinanza comporta che il tasso di immissione del radon sia ragionevolmente lo stesso in entrambi i locali e ciò giustifica la forte correlazione tra le concentrazioni misurate; essendo la centrale di ventilazione di dimensioni molto maggiori rispetto alla sala pompe, la diluizione del radon nel locale della centrale di ventilazione risulta maggiore e di conseguenza le concentrazioni di radon risultano inferiori rispetto alla sala pompe.

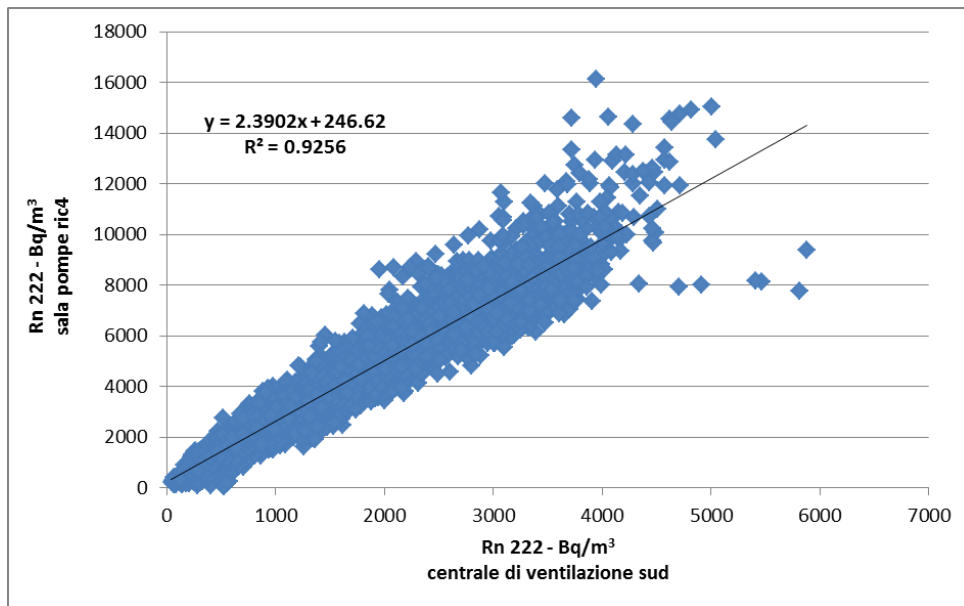


Figura 4 Diagramma di dispersione delle concentrazioni orarie di radon rilevate nella centrale di ventilazione sud e nella sala pompe ric4. Risulta evidente la loro correlazione ( $R^2 > 0.9$ ).

In Figura 5 sono riportati i giorni tipo (andamenti medi orari nel giorno) delle concentrazioni di radon nel primo piano del magazzino e nella centrale di ventilazione sud.

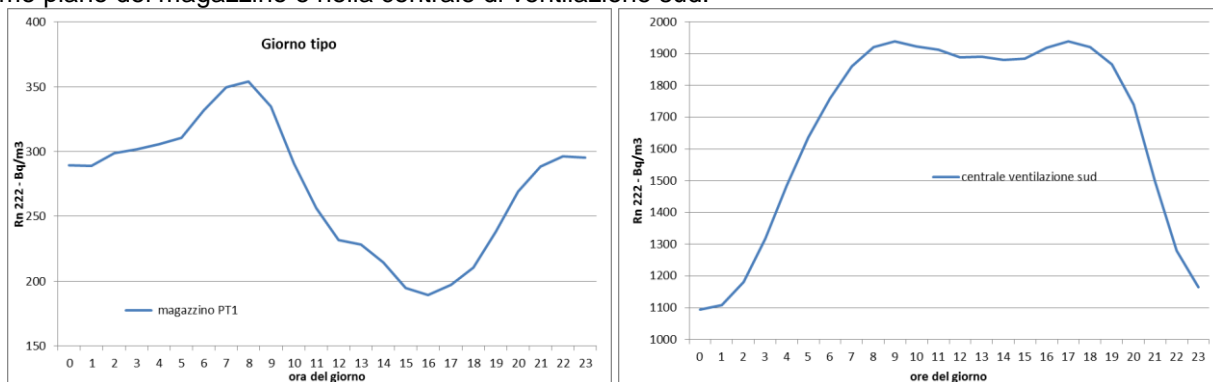


Figura 5 Andamento medio orario nel giorno (giorno tipo) delle concentrazioni di Rn nel primo piano del magazzino esterno e nella centrale di ventilazione.

I giorni tipo risultano essere molto diversi: nel magazzino il radon si accumula durante le ore serali / notturne per arrivare ad un massimo prima dell'orario di ufficio, mentre nella centrale di ventilazione si riscontra una diminuzione nelle ore serali che porta ad un minimo notturno per poi arrivare ad un plateau di valori elevati durante il giorno.

L'andamento della concentrazione nel giorno medio rilevata nel magazzino evidenzia come l'aerazione naturale attraverso le finestre, rafforzata nella stagione invernale dall'impiego di un impianto di ventilazione, sia idonea a mantenere la concentrazione nel locale di lavoro al di sotto del livello di azione ( $500\text{Bq/m}^3$  sulla media annuale).

### Correlazioni con i parametri ambientali

Per cercare di spiegare gli andamenti delle concentrazioni orarie dei radon si sono analizzati anche alcuni dati ambientali forniti dal GEIE TMB. Essi sono costituiti da rilevazioni effettuate ogni due ore delle seguenti grandezze: temperatura e pressione atmosferica nei piazzali italiano e francese, velocità dell'aria agli ingressi della galleria, flusso di aria di ogni ventilatore che immette aria in galleria. Per poter confrontare i dati con queste rilevazioni puntuali, si sono calcolate le medie biorarie delle concentrazioni di radon.

In generale risulta che la concentrazione di radon nei locali misurati è indipendente dal funzionamento dei ventilatori, dalla velocità dell'aria in testata della galleria e dai valori assoluti di pressione atmosferica rilevati sui piazzali di ingresso.

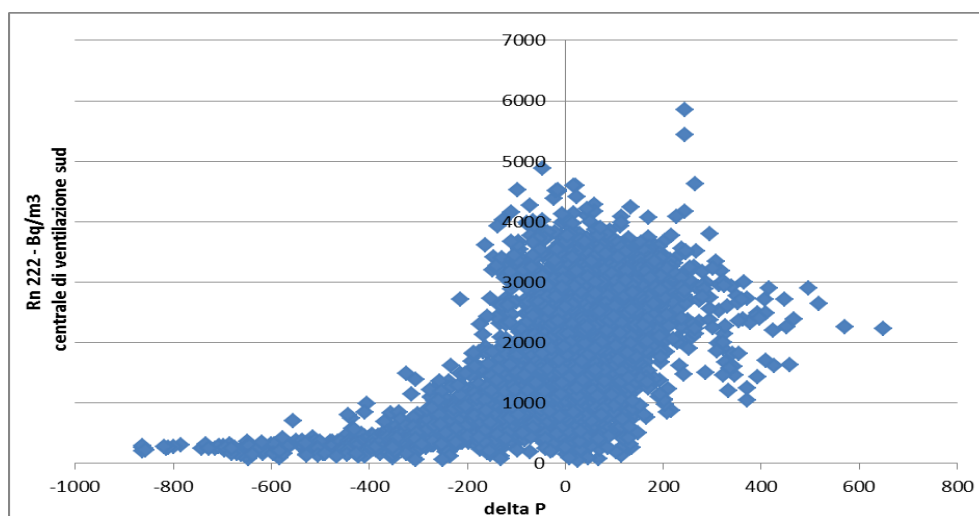


Figura 6 Diagramma di dispersione tra la concentrazione di radon rilevata nella centrale di ventilazione sud e la differenza di pressione tra i piazzali di ingresso (francese – italiano) normalizzata per la differenza di altitudine.

La relazione più interessante risulta essere quella esistente tra la concentrazione di radon nella centrale di ventilazione e la differenza di pressione atmosferica tra il piazzale francese e quello italiano, normalizzata per la differenza di altitudine ( $\Delta P$ ), mostrata in Figura 6. In generale, a causa della differenza di quota tra i due piazzali (quello italiano risulta più elevato di circa 110 m ) si ha naturalmente un flusso di aria dalla Francia verso l'Italia.

Un  $\Delta P$  positivo significa che l'effetto camino Italia-Francia risulta ulteriormente rafforzato, mentre un  $\Delta P$  negativo evidenzia una situazione in cui questo effetto è contrastato. Si nota che nel caso di  $\Delta P$  inferiore a -100 Pa i massimi orari di radon diminuiscono esponenzialmente fino a raggiungere una situazione per cui tutti i valori rilevati nella centrale di ventilazione sono inferiori a  $500 \text{ Bq/m}^3$ . Al di sopra di -100 Pa non si ha una dipendenza dei valori di radon dal  $\Delta P$ .

## ANDAMENTO DI EEC

Nel mese di maggio, per circa 10 giorni, sono state condotte misure in continuo di EEC (concentrazione equivalente all'equilibrio), nella centrale di ventilazione sud. Le misure hanno cadenza bioraria e forniscono valori di EEC e di radon (Figura 7).

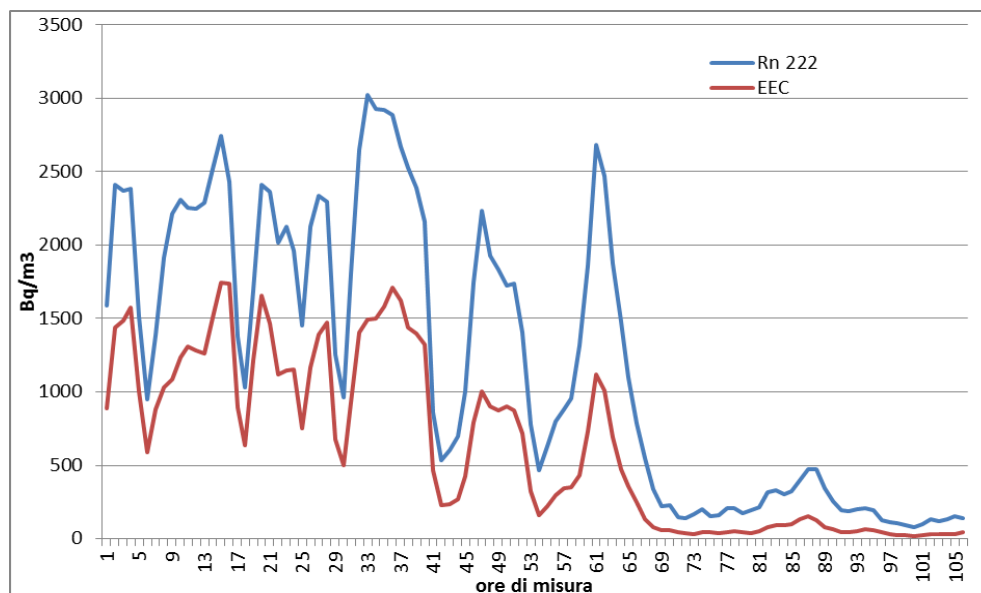


Figura 7 Andamenti biorari di radon 222 e di EEC (concentrazione equivalente all'equilibrio) rilevati nella centrale di ventilazione sud nel maggio 2014

La EEC è una grandezza che entra nel calcolo della dose assorbita e che in generale è stimata a partire dalla concentrazione di radon, moltiplicando quest'ultima per il fattore di equilibrio per il quale, di solito, si deve assumere un valore desunto dai dati di letteratura. Poter disporre della misura contemporanea della concentrazione di radon e di EEC, permette di ottenere un valore sperimentale del fattore di equilibrio e quindi stimare meglio la dose efficace. Dai dati si può per esempio ricavare l'andamento del fattore di equilibrio  $F$  e stimare un  $F_{\text{medio}}$  da utilizzare successivamente nei calcoli dosimetrici.



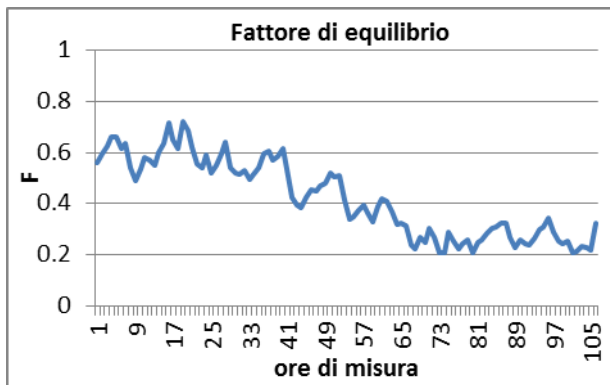


Figura 8 Andamento biorario del fattore di equilibrio nella centrale di ventilazione sud – maggio 2014

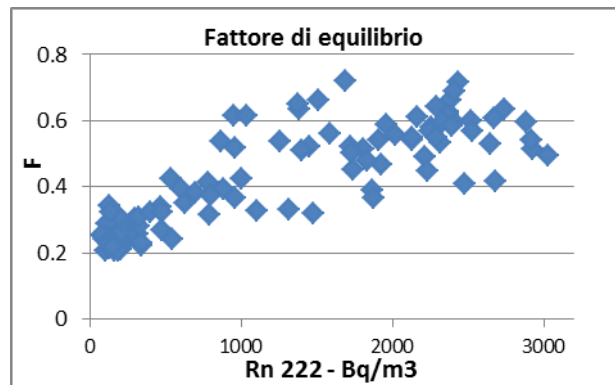


Figura 9 Andamento del fattore di equilibrio in funzione della concentrazione di radon nella centrale di ventilazione sud

Nelle figure 8 e 9 sono riportate le variazioni del fattore di equilibrio in funzione del tempo e della concentrazione di radon. I risultati devono essere valutati considerando che la normativa italiana richiede, ai fini dell'ottimizzazione della protezione, di calcolare la dose efficace da esposizione a radon assumendo  $F=0,4$ . Il valore "istantaneo" di  $F$  varia tra 0.2 e 0.7 ed in particolare risulta  $F < 0,35$  per concentrazioni di radon inferiori a  $500 \text{ Bq/m}^3$ , mentre per concentrazioni di radon superiori  $F$  varia tra 0.35 e 0.7.

Per quanto accertato per la centrale di ventilazione, che comunque è il locale dove maggiore è il prodotto fra tempo di occupazione e concentrazione di radon, la dose efficace, valutata con la procedura convenzionale, sottostima la dose in caso di concentrazione elevata e la sovrastima a concentrazione bassa.

La stima di un  $F_{\text{medio}}$  da utilizzare nei calcoli dosimetrici può essere effettuata calcolando il rapporto tra la media delle EEC e la media della concentrazione di radon e fornisce un valore pari a **0.52**.

## MISURE DI Rn IN ACQUA

Sono stati raccolti due campioni di acqua per valutare la concentrazione di radon disciolto in essa, essendo utilizzata per scopi civili all'interno del Tunnel. Il primo campione è stato prelevato nel canale 4 vicino al rifugio (Luogo Sicuro nella Tabella 1) 26 da una vasca di collezione delle infiltrazioni di acqua proveniente dal sovrastante ghiacciaio drenata dalla roccia intensamente fratturata e disgregata [1], mentre il secondo direttamente da una venuta di acqua presente nella galleria vicino allo stesso rifugio.

- CAMPIONE 1 (vasca di collezione) :  $V=100\text{ml}$ ,  $T_{\text{acqua}} 18^\circ\text{C}$ ,  $C_{\text{Rn}}= 68 \text{ Bq/l} \pm 20\%$
- CAMPIONE 2 (venuta rifugio 26) :  $V=500\text{ml}$ ,  $T_{\text{acqua}} 18^\circ\text{C}$ ,  $C_{\text{Rn}}= 85 \text{ Bq/l} \pm 20\%$

I valori misurati risultano inferiori al valore limite di  $100 \text{ Bq/l}$  previsto dalla Direttiva 2013/51/Euratom per le acque destinate al consumo umano. Se si confrontano questi dati con quelli relativi alle misure di radon in aria effettuate con dosimetri passivi nel rifugio 26, e che hanno valori di qualche centinaio di  $\text{Bq/m}^3$  si può osservare che il radon disciolto nell'acqua ( $85000 \text{ Bq/m}^3$ ) non fa in tempo a degassare e a raggiungere l'equilibrio di ripartizione aria-acqua. Il contributo del radon presente nell'acqua, risulta pertanto inferiore a quello proveniente direttamente dalla roccia..

## CONCLUSIONI

Il radon all'interno del tunnel del traforo del Monte Bianco e di alcuni locali tecnici del lato italiano proviene dalla roccia granitica nella quale è scavata buona parte della galleria ed entra nei locali per emanazione diretta. Tuttavia non si può escludere che una parte venga trascinata dalla stessa aria di ventilazione del lato italiano che, provenendo dal plenum di immissione scavato all'interno della roccia si arricchisce di radon. In misura minore può anche derivare dall'acqua affiorante dalla roccia in corrispondenza delle venute presenti, per via della condizione di non equilibrio di ripartizione riscontrata nei locali interessati.

Le misure hanno evidenziato un accumulo di radon all'interno dei locali tecnici del versante italiano.

Si verifica una diminuzione delle concentrazioni quando entra in funzione l'aspirazione dell'aria all'interno del tunnel tramite il condotto 5, canale preposto alla evacuazione degli effluenti dei veicoli ma realmente messo in funzione solo in caso di incendio. Quando è in funzione si instaura un regime depressivo nel canale che si traduce nell'immediato effetto di abbassamento della concentrazione di radon, come verificato in precedenti campagne di misura [2].

Le misure eseguite dimostrano che un effetto simile si verifica quando la differenza di pressione barometrica tra l'ingresso Francese e quello Italiano, dovuta alle condizioni meteo, diventa sufficientemente negativa da contrastare la differenza altimetrica che naturalmente genera un flusso di aria dalla Francia verso l'Italia.

Definire EEC ed F in un ambiente esteso come il Tunnel ha senso solo in corrispondenza di specifici locali dove opera il personale e se ne deve valutare l'esposizione; in zone specifiche confinate F può trovare correlazione con i parametri ambientali dell'area, mentre la grande differenziazione delle condizioni di ventilazione all'interno del tunnel esclude l'utilità di ricercare un unico valore per l'intera galleria.

La misura diretta di F, eseguita in un locale dove si riesce a generare l'effetto di depressione adeguato a rimuovere il radon, evidenzia che la dose assorbita dal lavoratore che accede al locale dopo che è stata attivata la procedura è probabilmente sovrastimata. Nondimeno, l'occasionale accesso al locale per brevi periodi senza attivare la rimozione del radon porterebbe ad un'esposizione che la valutazione di dose convenzionale tende a sottostimare.

I risultati di questo studio incoraggiano a proseguire il monitoraggio di specifici locali al fine di individuare accorgimenti tecnici per mantenere in permanenza i gradienti di pressione idonei a minimizzare l'esposizione a radon per il personale.

## **RINGRAZIAMENTI**

Si ringrazia per la disponibilità e l'aiuto logistico offerto durante le misure il personale del Tunnel Monte Bianco, in particolare l'Ing. Claudio Lyveroulaz e il sig. Raffaele Thiébat.

## **BIBLIOGRAFIA**

[1] Agnesod G, Operti C, Gibellino C. *Rilievi di inquinamento ambientale all'interno della galleria del traforo del Monte Bianco*, 1996, Atti del Convegno "Aria '96", organizzato dall'ISS in collaborazione con l'Associazione ARIA il 12-14 giugno 1996. Serie Rapporti ISTISAN, 98/3, pagg.72-76

[2] Frigerio F., Formica G. *Il controllo del rischio Radon press il Tunnel del Monte Bianco*, 2013, Italian Journal of Occupational and Environmental Hygiene – [2013,4(4) | 161-169]