URANIO E RADON IN VAL DI SUSA

Massimo Zucchetti – Politecnico di Torino

Rapporto PT DE IN 356 – Dicembre 1997

Il presente lavoro riguarda la valutazione dei problemi di radioprotezione relativi alla realizzazione del Traforo in Valle di Susa, compreso nell'opera della nuova Linea Ferroviaria ad Alta Velocità fra Torino e Lione. Più in dettaglio, si desidera valutare i possibili problemi connessi con il passaggio del Traforo in formazioni geologiche con presenza di minerale d'uranio.

Radon

La presenza in Valle di Susa di Uranio, metallo radioattivo naturale[1], è da tempo accertata. In natura esistono tre famiglie che raggruppano i radioisotopi naturali : la famiglia dell' Uranio, dell'Attinio e del Torio[2] i cui capostipiti sono rispettivamente l'Uranio 238, Uranio 235 e Torio 232. In ognuna di esse compare il radioisotopo del Radon (Rn). I componenti delle tre famiglie sono presenti nelle rocce e nei minerali naturali, e quindi possono ritrovarsi per esempio anche nei materiali da costruzione. In assenza di perturbazioni esterne queste famiglie radioattive sono generalmente in equilibrio secolare nel senso che l'attività di ciascun membro è uguale (cambia solo il numero di atomi radioattivi presenti che sarà più grande dove l'emivita del radioisotopo è più grande). Alla famiglia dell'Uranio 238 appartiene il radioisotopo del Radon più diffuso in natura (Rn 222)[3].

[1] Ha composizione isotopica pari a U-238, U-234, U-235. Quest'ultimo rappresenta lo 0,7% in peso. Il decadimento è α per i tre isotopi, con $t_{1/2}$ rispettivamente di 4,5 10^9 anni, 2,5 10^5 anni e 7,1 10^8 anni. La loro attività è di 12,2 kBq/g per U-238; 12,2 kBq/g per U-234; 0,57 kBq/g per U-235. A causa della sua bassissima attività specifica, l'uranio naturale è più temibile per la sua tossicità chimica che per la tossicità da radiazioni emesse. Ciò è vero anche per U arricchito al 2-3%. Invece l'isotopo 235 è più temibile sotto l'aspetto radiologico che chimico.

[2] Il Torio-232 decade emettendo una particella α di energia 4 MeV ed ha un $t_{1/2}$ = 1.4 10^{10} anni. Ha un'attività specifica di 1.097 10^{-7} Ci/g. Il Torio naturale è fortemente radiotossico.

[3] Le quantità degli isotopi del radon nell'ambiente dipendono principalmente dalle concentrazioni di 238U, 235U e 232Th nel suolo e nelle rocce. L'abbondanza di 232Th nella crosta terrestre è leggermente superiore a quella dell'238U, ma a causa dell'emivita più lunga del 232Th, il rateo di produzione del 220Rn nella Terra è circa lo stesso di quello del 222Rn. Dei tre isotopi del radon che si riscontrano in natura, solo il 222Rn ha un tempo di dimezzamento sufficientemente lungo (3,8 giorni) da consentirne il rilascio dal suolo e dalle rocce, dove si è

Il radon è un gas nobile radioattivo, scoperto durante i primi studi sulla radioattività all'inizio del secolo. Il termine *radon* fu introdotto per la prima volta da Schimt nel 1918 per indicare l'elemento con massa atomica 222 (222Rn), cioè il gas associato all'uranio-238. Nell'uso comune, il termine radon è venuto ad indicare l'elemento con numero atomico 86 (*fig. 1*). Questo elemento ha 26 isotopi che vanno da 199Rn a 226Rn, tre dei quali si riscontrano in natura. Questi sono il 220Rn (*toron*) dalla serie di decadimento del torio scoperta da Owens e Rutherford nel 1889, il 222Rn (*radon*) dalla serie dell'238U scoperta da Dorn nel 1901, e il 219Rn (*attinon*) dalla serie dell'235U scoperto da Debierne e Giesel nel 1903.

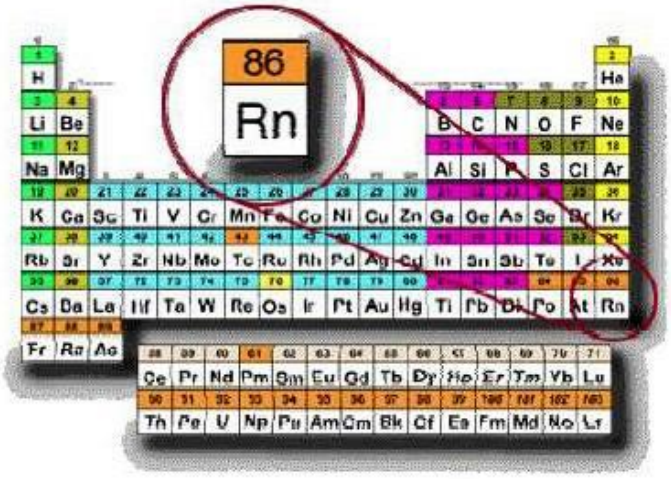

Figura 1. Il Rn all'interno della tavola periodica.

Chimicamente, il radon è un gas nobile. Come tale, è incolore, inodore e chimicamente quasi inerte. Paragonato agli altri gas nobili è il più pesante e possiede il più alto punto di fusione, di ebollizione, temperatura critica e pressione critica (*tab. 1*). In *fig. 2* è riportata la serie radioattiva naturale dell'U-238 ed in *tab. 1* e *2* le principali caratteristiche del Rn-222 e dei suoi discendenti.

Solubilità	0.25 ml/ml (25°C, 1atm)
Temperatura di fusione	- 71 ° C
Temperatura di ebollizione	- 61.8 ° C

Tabella 1. Caratteristiche Rn-222.

generato. Sostanzialmente meno 220Rn raggiunge l'atmosfera poiché il suo breve tempo di dimezzamento (56 sec) limita la distanza che può percorrere prima del decadimento. Analogamente per il 219Rn (formato dalla catena di decadimento dell'235U): esso può essere ignorato interamente a causa del suo corto tempo di dimezzamento (4 sec) e la scarsità comparativa di 235U. Perciò quando si parla di Radon ci si riferisce in genere al 222Rn.

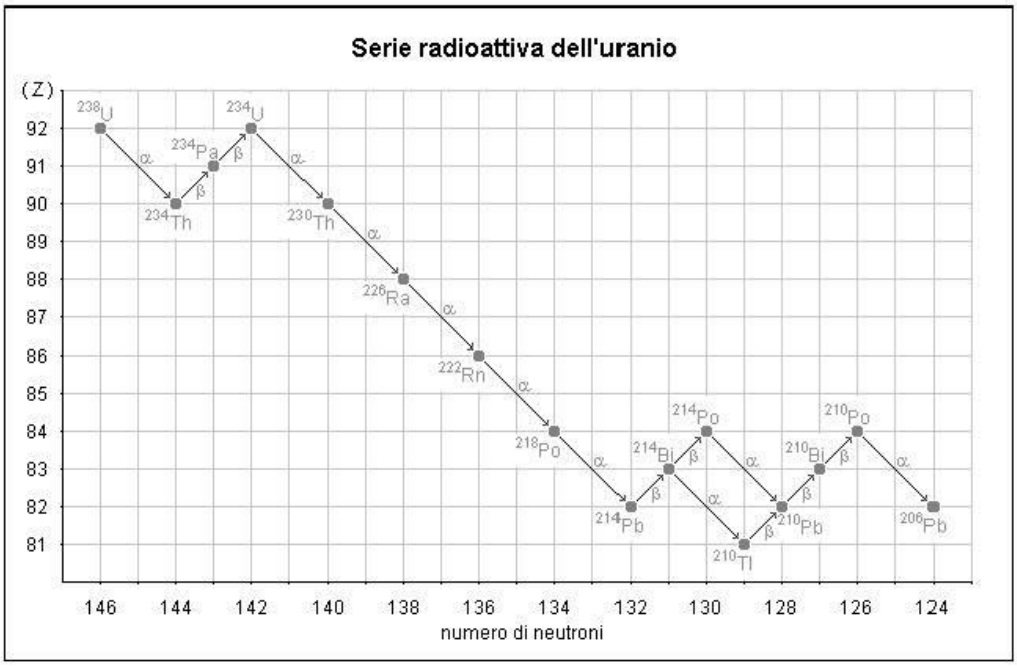

Figura 2. La serie radioattiva naturale dell'U-238 ed i decadimenti che portano al Pb-206[4].

Radionuclide	Nome storico	$T_{1/2}$	Energia α (Mev)	Energia β (Mev)	Energia γ (Mev)
Rn 222	Radon	3.823 d	5.49		
Po 218	Radium A	3.05 min	6.00		
Pb 214	Radium B	26.8 min		0.67 0.73 1.02	0.242 0.295 0.352
Bi 214	Radium C	19.7 min		1.0 1.51 3.26	0.609 1.12 1.764
Po 214	Radium C'	164 μs	769		

[4] Il tempo di dimezzamento complessivo, 4 miliardi e mezzo di anni, è ovviamente condizionato dal decadimento più lento della catena.

Pb 210	Radium D	22.3 y		0.015 0.061	0.047
Bi 210	Radium E	5.01 d		5.305	
Po 210	Radium F	138.4 d	5.305		

Tabella 2. Caratteristiche del Radon e dei suoi discendenti.

Il Radon è l'unico elemento della catena dell'Uranio in stato gassoso a temperatura ordinaria ed ha una densità 7.7 volte maggiore di quella dell'aria, quindi ha la tendenza a stratificarsi in basso specie negli ambienti chiusi. Un'altra importante proprietà del radon è il fatto che esso è molto solubile in liquidi organici e viene adsorbito su carbone attivo e gel di silice. In un sistema multifasico a temperatura ambiente normale, le concentrazioni di radon sono più elevate, intermedie e più basse, rispettivamente, nei liquidi organici, nei gas ed in acqua. Se si aumenta la temperatura, la concentrazione nella fase gassosa aumenta a discapito di quella nella fase liquida. Queste proprietà sono state sfruttate con successo per la determinazione del gas radon e per la sua estrazione da altri gas e liquidi. Per esempio, il radon in acqua può essere facilmente misurato dopo la sua estrazione facendo gorgogliare aria attraverso l'acqua o estraendo il radon dall'acqua con scintillatori organici liquidi. Il gas radon può essere rimosso con successo da un campione di aria facendola passare attraverso del carbone attivo raffreddato alla temperatura di solidificazione del biossido di carbonio (-78.5°C). Il desorbimento del radon può essere raggiunto riscaldando il carbone fino a 350°C.

Il decadimento con emissione α del Radon comporta la formazione di Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, elementi chimicamente attivi che possono venire inalati, depositati e parzialmente trattenuti nell'apparato respiratorio, sia come ioni liberi sia come ioni adsorbiti dalle gocce d'acqua o dal particolato. Le particelle emesse durante i decadimenti radioattivi possono raggiungere e danneggiare anche i tessuti circostanti. Il Radon, per questo motivo, è considerato un agente cancerogeno di classe 1 (Istituto Superiore di Sanità), cioè un agente di provata azione cancerogena[5].

Il primo effetto dannoso dell'esposizione ad un campo di radiazione fu scoperto sin dal 1500 tra i minatori della regione Schneeberg Jachymov nello Erzgeibirge (Boemia). Questo fu diagnosticato come cancro polmonare nel 1879. La possibile attribuzione della sua insorgenza al Radon fu suggerita circa 60 anni fa, quando furono riscontrate elevate concentrazioni di tale gas

[5] La classificazione dell'Istituto Superiore di Sanità prevede 4 livelli.

nelle miniere di quella regione. Comunque la vera causa della cancerogenesi, che consiste nella inalazione dei figli del Radon a breve $T_{1/2}$ (sia attaccati che non attaccati al pulviscolo), con conseguente irraggiamento α sull'apparato bronco polmonare, fu individuata solo nel 1950, con i primi studi epidemiologici sull'esposizione al Radon in miniere sotterranee (al riguardo, particolare rilievo hanno avuto quelli condotti in Boemia, in Colorado ed in Ontario). L'eccesso di tumori polmonari riscontrato dallo studio tra i minatori, rispetto al numero di insorgenze previsto, indica una forte correlazione con l'esposizione ai figli del Radon da essi accumulata (questo fenomeno non può essere spiegato con l'inalazione di particolati costituiti da sostanze non radioattive presenti in miniera). Studi sono stati condotti anche su popolazioni residenti in zone a vari livelli di radioattività naturale[6]: i risultati preliminari disponibili non mostrano un'evidenza statisticamente significativa del contributo dell'esposizione ai figli del Radon a breve $T_{1/2}$ alla frequenza osservata dei casi di cancro polmonare. Il ruolo del fumo e l'influenza di fattori non dovuti alla radiazione naturale, quali l'esposizione occupazionale ed ambientale a sostanze chimiche, giustificano probabilmente le forti variazioni locali osservate. Non è chiara inoltre la correlazione tra dose assorbita e danno causato quando l'esposizione sia prolungata nel tempo e caratterizzata da bassissime dosi.

In una certa quantità comunque, tutte le radiazioni ionizzanti aumentano la probabilità di insorgenza di alcune patologie, quali ad esempio alcune forme di neoplasia e di mutazioni genetiche. La presenza di Radon in forma gassosa nell'aria ne causa inalazione da parte dell'uomo, aumentando così la dose assorbita negli alveoli polmonari e la probabilità connessa di manifestare determinate forme cancerose. I problemi radioprotezionistici dovuti a questa possibilità devono venire valutati con molta attenzione e preventivamente all'inizio, a livello di progetto esecutivo e di Valutazione dell'Impatto Ambientale di opere che prevedano di essere ubicate in zone soggette a contaminazione da radon. Le rocce dalla cui presenza consegue quella del gas radon sono lave, tufi, pozzolane e rocce di tipo sedimentario come graniti, marmi, marne e sieniti. Il gas può quindi fuoriuscire dalle fessure del terreno o dalle rocce o contaminare le falde acquifere. A tale proposito l'ANPA ha recentemente effettuato un'indagine nazionale al fine di quantificare, regione per regione, l'effettivo rischio da radon nelle abitazioni.

[6] Il fondo di radioattività naturale induce irraggiamento sia interno sia esterno. Le fonti principali di irraggiamento esterno sono la radiazione cosmica (dipendente dall'altitudine) e la radiazione terrestre (materiali radioattivi naturali presenti nel terreno della serie dell'Uranio 238 e del Th-232 e il K-40). Questa ultima varia molto da luogo a luogo, in funzione della composizione del terreno. L'equivalente di dose medio annuo per irraggiamento esterno per l'Italia presenta valore medio di 1 mSv/anno. L'irraggiamento interno è dato dal K-40 (con circa 0.2 mSv/anno), dai radioisotopi della famiglia dell'Uranio e del Torio presenti come tracce negli alimenti e, predominante, dall'inalazione dei discendenti a vita breve del Rn-222. Il Radon e i suoi figli sono responsabili per 1.22 mSv/anno per la serie dell'Uranio 238 ovvero per il 76% per l'irraggiamento interno e per circa il 50% per l'irraggiamento totale che risulta essere di circa 2.4 mSv/anno.

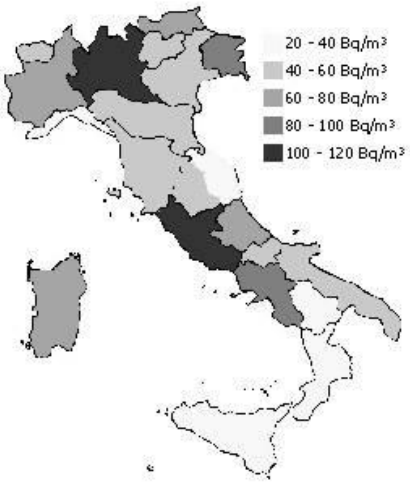

Figura 3. valori medi regionali delle concentrazioni di radon[7].

Nel caso in esame, che tratta d'un'opera che corrisponde al profilo di rischio descritto, un'analisi accurata è d'obbligo non solo per tutelare la salute della popolazione della zona e dei futuri utenti della struttura, ma soprattutto dei lavoratori addetti all'esecuzione della stessa, che ragionevolmente saranno il gruppo di popolazione che andrà incontro all'esposizione maggiore. Si ricorda che il rischio connesso alla presenza di radon è da attribuirsi per la quasi totalità ai suoi prodotti di decadimento essendo il progenitore, come già ricordato, un gas nobile inerte.

Situazione in valle di Susa

La Valle di Susa è un'ampia vallata che collega il confine con la Francia al torinese (*fig. 4*). La sua posizione geografica e la presenza di una linea ferroviaria e di un'autostrada hanno contribuito a renderla il corridoio di comunicazione scelto per l'attraversamento del TAV Torino - Lione. Il progetto prevede la realizzazione di un doppio tunnel della lunghezza di 52 Km il cui percorso andrebbe ad intersecare alcune formazioni di minerale d'Uranio. Nasce quindi l'attenzione a problematiche radioprotezionistiche correlate all'esposizione di pubblico e

[7] Fonte ANPA, 1994, campione di 5000 abitazioni, valore medio nazionale: 70 Bq/kg.

lavoratori a irradiazione esterna ed interna, dovuta alla presenza di Uranio e suoi figli, in particolare all'inalazione di Radon e suoi prodotti di decadimento.

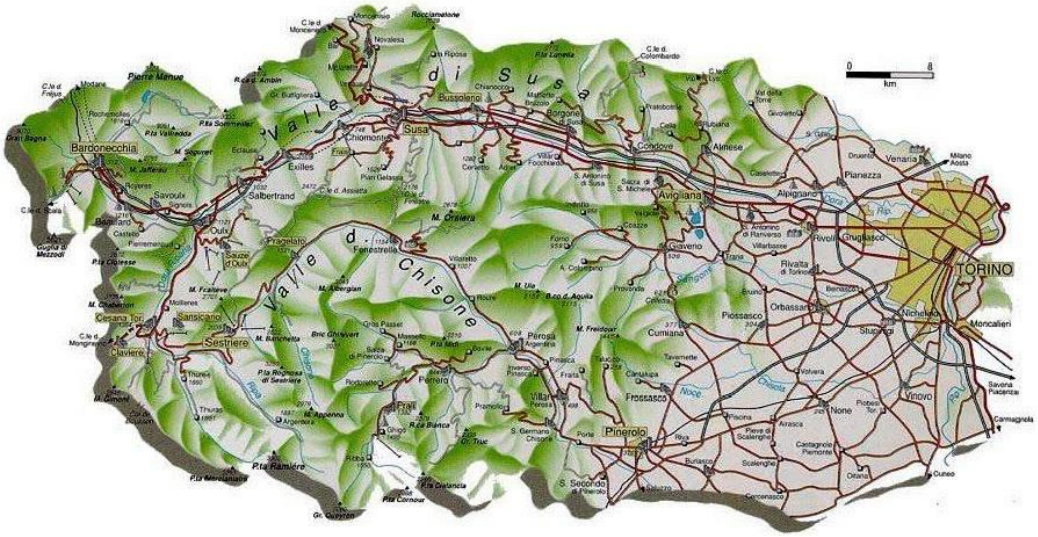

Figura 4. Valle di Susa.

In base a quanto detto sul problema della radiazione da sorgenti naturali, nasce la necessità di stimare la possibile concentrazione di radon all'interno del tunnel a partire dalla conoscenza della concentrazione massima di uranio nella roccia, al fine di verificare che le dosi assorbite dagli individui nella permanenza nel tunnel si mantengano al di sotto dei valori dei livelli di azione fissati dai decreti legislativi di riferimento.

Prima necessità è allora la conoscenza del dato di concentrazione d'uranio nelle rocce, o quanto meno del suo valore massimo.

Le prime misurazioni delle concentrazioni di Uranio in Val di Susa risalgono al 1959, anno in cui la presenza del minerale cominciò a suscitare l'interesse della azienda SOMIREN s.p.a. Era stato preso in considerazione lo sfruttamento di tali giacimenti, ma le varie valutazioni tecniche portarono ad escludere tale possibilità. Studi più recenti hanno rilevato presenza di materiale uranigeno nei dintorni delle località di Molaretto e Venaus. Le ultime analisi, condotte dall'ARPA (1997), hanno riscontrato in alcuni campioni di roccia attività pari 100.000 Bq/kg. L'attività è stata misurata attraverso la radiazioni γ di ^{214}Pb e ^{214}Bi, con incertezza del 50%. I ratei di dose, misurati ponendo a contatto del minerale uno strumento del tipo Geiger-Mueller, presentano valori di 30-40 µSv/h. Si noti che un valore di dose superiore ai 10 µSv/h rende il

materiale non manipolabile direttamente senza schermature, nemmeno dai lavoratori professionalmente esposti[8]. In base a queste considerazioni il minerale rientrerebbe nel campo di applicazione della normativa EURATOM - direttiva europea 29/96.

. Alcuni sopraluoghi all'interno di una galleria di servizio dell'AEM, posta poco distante da Venaus e dall'abitato di Exilles, non hanno rilevato dosi di radioattività anormali di tipo γ (*tab. 3* e *4*).

CONCENTRAZIONE DI RADON NELL'ARIA (Bq/m^3)	
PASSAGGIO SERVIZIO	408
LOCALE TURBINE	675
RISULTATI MISURE DI SPETTROMETRIA NELLE ROCCE (Bq/kg)	
ROCCIA LOCALE TURBINE (serie dell'uranio)	17,5
RISULTATI MISURE DI SPETTROMETRIA NELLE ROCCE (Bq/kg)	
ROCCIA USCITA GALLERIA (serie dell'uranio)	24,8

Tabella 3. Prelievi eseguiti nella galleria 'finestra 4' poco distante da Venaus.

Contemporaneamente le misure di gas radon riportano valori di concentrazione attorno ai 400-600 Bq/m^3.

RISULTATI MISURE DI SPETTROMETRIA NELLE ROCCE (Bq/kg)	
ROCCIA 1	26,5
ROCCIA 2	23
CONCENTRAZIONE DI RADON NELL'ARIA (Bq/m^3)	
3365	

Tabella 4. Risultati di misure e prelievi eseguiti nella galleria 'finestra 2 ' nei pressi di Exilles.

[8] Per questi ultimi il rateo massimo di dose annuale è di 20 mSv/y, limite che risulta raggiunto in 2000 ore lavorative, con questo valore di rateo orario. Conseguentemente, per la popolazione, il cui rateo massimo di dose annuale è di 2 mSv/y, il corrispettivo orario sarà di 0,22 µSv/h.

In entrambi i casi i livelli di radioattività γ si sono mantenuti entro limiti assai contenuti e le quantità rilevate di radon nell'aria possono essere facilmente ridotte con migliori condizioni di ventilazione.

Per quanto riguarda il passaggio del tunnel (*fig. 5*), questo non avverrà attraverso rocce che presentino la concentrazione di Uranio (e quindi di Radon nell'aria) pari ai valori estremi della miniera di Venaus. Tuttavia, la notevole mobilità del radon dà adito ad altre considerazioni.

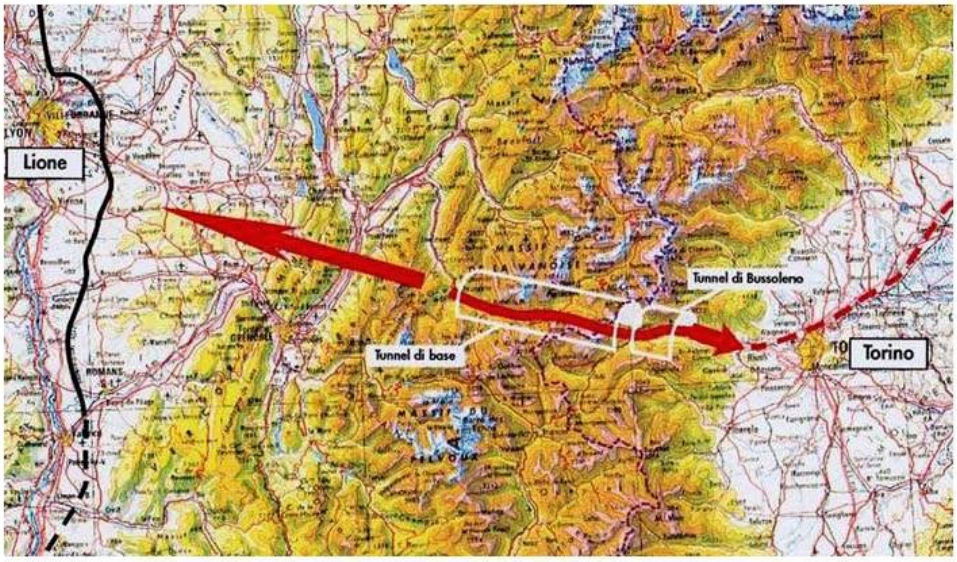

Figura 5. Zone interessate dal passaggio del TAV.

Anche del rischio radiologico a cui sono esposti i lavoratori bisogna tenere conto con attenzione: anche venisse confermata una presenza considerevole di gas radon nelle gallerie, essa non costituirebbe di per sé una prova della presenza nelle immediate vicinanze di grossi quantitativi di uranio, perché, come ricordato, il radon può compiere tragitti non trascurabili a partire dal luogo in cui è stato prodotto e raggiungere quindi concentrazioni elevate in zone dove è scarsa la ventilazione. Così come anche la presenza di concentrazioni modeste di uranio nelle rocce non porta a escludere elevate concentrazioni di radon nei locali, radon che può essere stato prodotto altrove e successivamente trasportato.

Sebbene i lavoratori dei vari cantieri non risultino, in base a questi dati, esposti a particolare rischio radiologico legato alla presenza di minerali di Uranio, il radon può costituire un effettivo pericolo, in base alle osservazioni fatte sulla sua mobilità e in assenza di accorgimenti atti ad evitarne l'accumulo. Le misurazioni effettuate non sono sufficienti né adeguate da permettere di

ricavare informazioni sulla concentrazione di Uranio e Radon nelle zone interessate dall'attraversamento del TAV. Alcune di queste misurazioni, tuttavia, mostrano valori di concentrazione di uranio nelle rocce e di radon nelle cavità sotterranee della zona piuttosto elevate.

Al fine di ottenere i dati sulle concentrazioni necessari, andrebbero condotte misurazioni nei luoghi interessati e ad opportuna profondità. In caso contrario, volendo calcolare la concentrazione di Rn nell'aria all'interno del tunnel, occorrerà utilizzare un modello sufficientemente agile da consentire delle valutazioni parametriche, in modo da tenere conto del variare delle varie grandezze che possono influenzarne il risultato finale.

Obiettivo del calcolo

I valori riportati dalle varie misurazioni di radioattività in vari siti della zona non sono tali da poter essere trascurati in linea di principio, in quanto, sebbene alcuni valori rilevati siano bassi, il tipo di attività costruttiva che si prevede abbia luogo può causare esposizioni non trascurabili, specie per quanto riguarda i lavoratori addetti alla costruzione dell'opera. Alla luce di quanto stabilito dalla normativa EURATOM - direttiva europea 29/96, va garantito il rispetto dei limiti d'azione posti:

- 500 Bq/m^3;
- 3 mSv/y;

e, a tale proposito, va detto che alcuni dei valori di radioattività misurati sono sufficientemente elevati da meritare maggiore attenzione e indagine. Occorrerebbe una ulteriore e più accurata serie di misurazioni. A opera già costruita, la via più semplice sarebbe condurre misurazioni dirette all'interno del tunnel per la rilevazione della concentrazione di radon. Per quanto riguarda quest'ultima, sarebbe comunque necessario misurarla in varie zone: a causa della sua elevata mobilità, il radon può compiere tragitti non trascurabili a partire dal luogo in cui è stato prodotto e raggiungere quindi concentrazioni elevate in zone dove è scarsa la ventilazione. D'altra parte, al contrario, anche in presenza di scarse concentrazioni accertate di uranio nella roccia, non si può escludere il verificarsi di elevata presenza di Radon nell'atmosfera di gallerie sotterranee.

Volendo calcolare la concentrazione di Rn nell'aria all'interno del tunnel occorrerebbe utilizzare un modello sufficientemente agile da consentire delle valutazioni parametriche, in modo da tenere conto del variare delle varie grandezze che possono influenzarne il risultato finale, la

concentrazione di Uranio nelle rocce (di cui non si hanno dati adatti ad una valutazione più precisa né puntuale), il rateo di ricambio d'aria, le ore di permanenza all'interno del tunnel, e poter esprimere tale risultato in termini di dose impegnata da un individuo presente a vario titolo nella galleria indicata.

Si dovrebbe considerare una geometria semplificata, ossia una galleria rettilinea e in assenza di acque, né di falde nelle vicinanze, né acque presenti in zona che vengano utilizzate per irrigazione o ingerite direttamente, ed una concentrazione di U costante.

Lo scopo del lavoro sarà quello di ottenere il valore della dose causata dalla presenza di una certa concentrazione di radon conoscendo la concentrazione di Uranio (*fig. 8*).

Si dovrebbe quindi procedere alla ventilazione della galleria affinché tale dose risulti minore del limite massimo consentito per legge. Oppure - come già accennato prima - definire una concentrazione massima (*soil guideline*) di Uranio nel terreno affinché la dose risulti inferiore ai limiti citati.

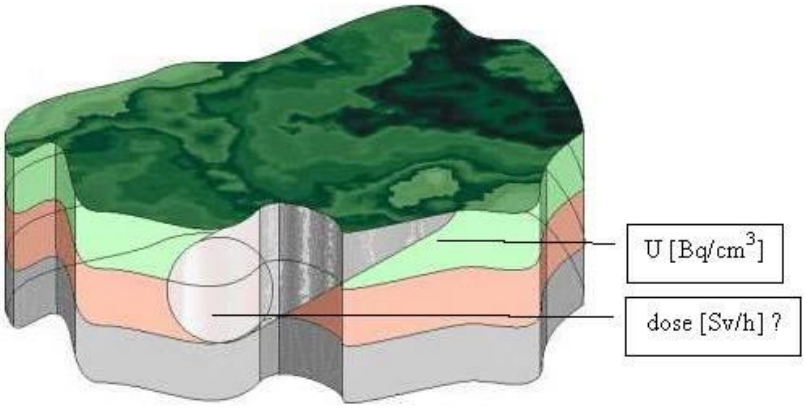

Figura 8. Schema dell'obiettivo del calcolo.

Per ottenere questi risultati si è scelto di utilizzare un codice di calcolo fornito dal DOE americano, RESRAD. Esso permette di procedere a valutazioni parametriche che evidenzino l'importanza, in particolare, di ventilazione e concentrazione di radionuclidi, al fine di mantenere le dosi all'uomo al di sotto dei limiti scelti.

Si è deciso di analizzare più nel dettaglio un caso specifico, caratterizzato dai valori di:

- spessore delle fondamenta pari a 20 cm;
- concentrazione di attività di Uranio pari a 0.0265 Bq/g.

Questi valori paiono verosimili, in particolare il valore di concentrazione si riferisce alle misurazioni condotte dall'AEM durante i sopraluoghi all'interno di una galleria di servizio, posta poco distante da Venaus e dall'abitato di Exilles.

In corrispondenza di questi valori, la quantità di dose assorbita a causa della permanenza all'interno del tunnel supera la soglia d'intervento in assenza di inadeguata ventilazione[9], arrivando in particolare ad un valore di dose efficace equivalente di 197,093 mSv/y. L'abbattimento della dose sotto i due valori critici è assicurato dai valori di ricambio d'aria indicati in tabella:

soglia	3 mSv/y	1 mSv/y
air exchange necessario (1/h)	0.374	0.868

Tabella. Valori di air exchange sufficienti ad abbattere la dose sotto i valori soglia.

L'andamento della dose, per i valori dei parametri citati, è mostrato in figura:

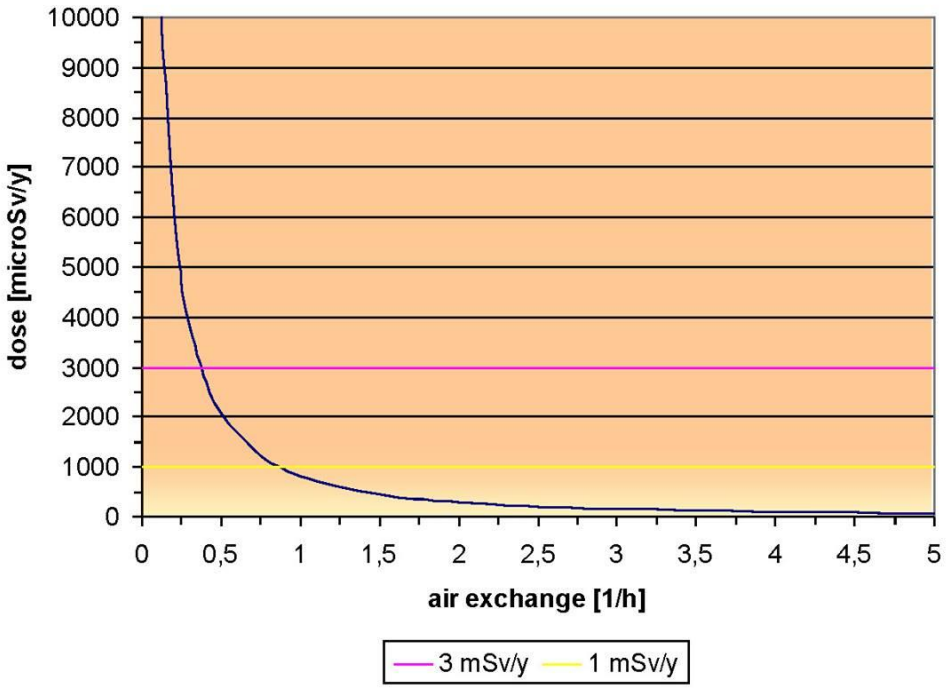

Grafico 9. Andamento della dose in funzione dell'air exchange per il caso di riferimento.

[9] Come citato, il calcolo è condotto riferendosi sempre ad uno scenario che prevede un orario di 1500 ore lavorative l'anno, per un totale di 11400 m^3/y inalati, massa inspirata per ogni inalazione 0,0001 g/m^3, frazione di tempo passata al chiuso sulla zona contaminata 0,17 e considerando che la durata dell'esposizione sia di un solo anno.

Questi valori devono essere commentati alla luce di ulteriori considerazioni.
Per cominciare, i valori dei parametri di esposizione utilizzati, scelti per caratterizzare la fase di costruzione dell'opera, si riferiscono ad un monte ore probabilmente eccessivo visto il tipo di cantiere. Le altre utenze, che comprendono oltre agli operai impiegati durante la costruzione, i più esposti, anche gli addetti a controlli e manutenzione, lavoratori sui mezzi che attraverseranno la galleria, ed infine i passeggeri del TAV, andranno incontro ad una dose inferiore, proporzionale al tempo di permanenza, che è sempre e per tutte le categorie elencate, notevolmente inferiore a quello usato per i nostri calcoli.
Inoltre, anche al limite, il ricambio d'aria dall'esterno, per quanto piccolo, non sarà mai nullo sia perché si tratta di una galleria che, anche in fase di costruzione, avrà almeno un accesso verso l'esterno, e sia, in fase d'esercizio, per la circolazione naturale che viene a crearsi per le diverse condizioni agli estremi, e per l'effetto di trascinamento di aria esterna causato dal passaggio dei mezzi.
Infine, i valori di dose calcolati fanno riferimento ad un rateo di inalazione di aria tipico di un lavoro manuale: negli altri casi citati (p.es. i passeggeri del treno) le quantità inalate sono inferiori.
Può essere più rilevante invece l'esposizione del personale viaggiante: lo stesso calcolo può essere svolto per un numero di viaggi pari ad esempio a 50 all'anno. Si ottengono valori intorno a 0,1 mSv/y, che non sarebbero trascurabili rispetto al limite annuo di dose per la popolazione (pari a 1 mSv/y), senza tuttavia costringere a classificare il personale viaggiante fra i lavoratori professionalmente esposti alle radiazioni ionizzanti.

CONCLUSIONI

In conclusione al lavoro svolto, fermi restando i dati e le deduzioni riportati essenzialmente nel paragrafo precedente, si desidera effettuare alcune ulteriori considerazioni.
I risultati ottenuti sono stati parametrizzati in modo da riportare i valori dell'*air exchange* orario - in corrispondenza di una data concentrazione di uranio nella roccia e di un dato spessore delle pareti - sufficiente ad abbattere la dose a valori accettabili: sono stati assunti come livelli di riferimento i livelli di azione indicati dalla legislazione più recente valori contenuti ma non irrilevanti.

Le condizioni di esposizione scelte, e quindi i valori dei parametri di esposizione utilizzati nel produrre i calcoli, caratterizzano bene la fase di costruzione dell'opera, e si riferiscono ad un'attività di tipo manuale. Di conseguenza, mentre è relativamente ben descritta dal modello utilizzato la condizione degli operai addetti alla costruzione, altrettanto non può dirsi per le altre utenze della galleria. I valori dei risultati corrispondenti andrebbero adeguati alle casistiche di esposizione corrispondenti alle altre utenze, che comprendono, oltre agli operai impiegati durante la costruzione, e che risultano il gruppo più esposto, anche gli addetti a controlli e manutenzione, i lavoratori sui mezzi che attraverseranno la galleria, ed infine i passeggeri del TAV.

Nonostante le semplificazioni adottate –sempre conservative- i risultati sono comunque d'interesse perché danno un'indicazione dell'ordine di grandezza delle dosi ricevute, com'era previsto dagli obiettivi che ci si era posti nell'intraprendere questo lavoro.

Ciò che pare importante osservare è che la normativa sottolinea un problema da lungo tempo ignorato, e lo fa con una normativa EURATOM - direttiva europea 29/96.

, risultano abbastanza stringenti, anche alla luce del fatto che pure in ambienti nei quali non si pongano problemi dovuti alla presenza diretta di minerali di Uranio, il problema radon può risultare comunque rilevante. Conseguentemente, in presenza di quantità piccole di minerale di Uranio il problema relativo alla presenza del gas ne viene accentuato.

Nonostante alcune lacune, la normativa sottolinea decisamente, tra gli altri, l'importanza del rischio da radon.

Si fa infatti obbligo di controllo per tutti gli ambienti di lavoro sotterranei, compresi i piani interrati, seminterrati e piani terra di qualsiasi edificio in cui si svolga un'attività lavorativa. In tutte le gallerie andrebbero condotte misurazioni di radioattività, anche senza che vi sia presenza nota di Uranio, come invece nel caso analizzato. Sono coinvolte quindi attività che normalmente non sono considerate come potenzialmente a rischio per problemi di tipo radioprotezionistico.

Per gli ambienti domestici invece non vi sono, attualmente, normative italiane. Si possono indicare anche per questo caso alcune possibili azioni di rimedio per ridurre la concentrazione di radon negli edifici: eliminazione del radon dall'aria interna; ventilazione/miscelazione con aria esterna; riduzione dell'ingresso di radon.

In definitiva il problema del rischio da radon è sottolineato dalla normativa vigente, che definisce obblighi e prescrizioni precise e limiti stringenti ad autorità locali e datori di lavoro, e questa applicazione è un esempio di come, anche in presenza di piccole concentrazioni di precursori del gas, le condizioni di esposizione possano portare all'assunzione di dosi che non sono trascurabili

rispetto ai limiti posti per legge.

La considerazione conclusiva di questo lavoro si ritrova a dover ripercorrere un luogo comune nel caso delle analisi di sicurezza e impatto ambientale, ovvero scontentare sia chi si attende previsioni catastrofiche sia chi, invece, cerca giustificazione della facilità con la quale ha trascurato il problema. Infatti:

1. Si è cercato di evitare l'utilizzo di dati non confermati, inaffidabili o evidentemente esagerati, sia sulle concentrazioni dell'elemento che sugli effetti del radon sulla salute, attenendosi invece a fatti e modelli accertati.
2. Il modello messo a punto ha cercato, nei limiti del codice utilizzato e dei dati a disposizione, di effettuare un insieme di assunzioni conservative, ma non tali da rendere improbabili a verificarsi l'insieme delle condizioni. Ove possibile, i risultati sono stati parametrizzati per permetterne un utilizzo agevole anche in caso di disponibilità successiva di migliori dati di partenza.
3. D'altra parte, gli stessi risultati mettono in evidenza come il rischio da esposizione da radon nell'ambiente sotterraneo considerato non sia trascurabile: abbiamo a che fare con una pratica di rilevanza radioprotezionistica.
4. La giusta valutazione, come speriamo sia stato messo in evidenza da questo lavoro, sta nel mezzo. Tuttavia, in mancanza di dati precisi ed affidabili di partenza, ed in presenza di una legislazione in materia giustamente restrittiva, si raccomanda in conclusione la massima cautela ed un approfondimento, che può partire dall'affinamento del modello qui proposto. Queste valutazioni vanno effettuate prima di intraprendere qualunque azione di scavo, in quanto si è evidenziato come proprio i lavoratori addetti all'opera siano la categoria più esposta.