

# UTJECAJ PROJEKTA POBOLJŠANJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI NA KONCENTRACIJE RADONA U PROSTORIJAMA ODJELA ZA FIZIKU I ODJELA ZA MATEMATIKU SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU

---

**Kovač, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:097820>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**



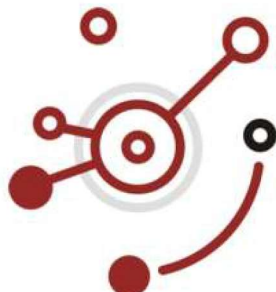
*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**BRUNO KOVAČ**

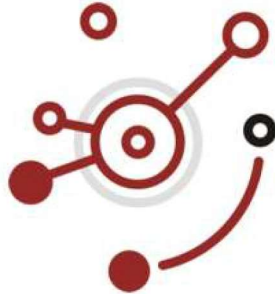
**UTJECAJ PROJEKTA POBOLJŠANJA ENERGETSKE  
UČINKOVITOSTI NA KONCENTRACIJE RADONA U  
PROSTORIJAMA ODJELA ZA FIZIKU I ODJELA ZA  
MATEMATIKU SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U  
OSIJEKU**

**Završni rad**

**Osijek, 2022.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**BRUNO KOVAČ**

**UTJECAJ PROJEKTA POBOLJŠANJA ENERGETSKE  
UČINKOVITOSTI NA KONCENTRACIJE RADONA U  
PROSTORIJAMA ODJELA ZA FIZIKU I ODJELA ZA  
MATEMATIKU SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U  
OSIJEKU**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja zvanja prvostupnika fizike

**Osijek, 2022.**

Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

## **Predgovor**

Velika hvala mome mentoru doc. dr. sc. Denisu Staniću na svojoj pomoći, nebrojenim savjetima i ogromnom strpljenju pri izradi ovoga rada. Zahvaljujući njemu, upoznao sam se s mnogim zanimljivim temama u fizici pa tako i onim o radonu.

## Sadržaj

Sažetak .....	v
Abstract .....	vi
1. Uvod .....	1
2. Radon: svojstva, porijeklo i prijenos .....	2
2.1. Svojstva radona .....	2
2.1.1. Lanac radioaktivnog raspada .....	2
2.1.2. Domet alfa čestica .....	3
2.1.3. Difuzija .....	4
2.2. Izvori i prijenos radona .....	5
2.2.1. Izvori .....	5
2.2.2. Mehanizmi otpuštanja .....	6
2.2.3. Prijenos radona .....	6
3. Radon u zatvorenom prostoru .....	8
3.1. Radonove kćeri u zraku .....	8
3.2. Radon iz građevinskog materijala .....	8
3.3. Radon iz tla .....	10
3.4. Radon iz vode .....	12
3.5. Raspodjela radona unutar kuće .....	12
3.6. Kratkotrajne varijacije razine radona u zatvorenom prostoru .....	14
3.7. Sezonske varijacije razina radona u zatvorenom prostoru .....	16
3.8. Zaključna napomena .....	17
4. Učinci radona na zdravlje .....	18
4.1. Karcinom pluća .....	18
4.1.1. Studije rudara .....	18
4.1.2. Procjene cjeloživotnog rizika uz unutrašnje izlaganje radonom .....	19
4.1.3. Faktori koji mogu utjecati na procjene rizika .....	20
4.1.4. Epidemiološke studije karcinoma pluća i unutrašnjeg izlaganja radonu .....	21
4.2. Ostali karcinomi .....	22
4.2.1. Dozimetrija .....	22
4.2.2. Epidemiološke studije .....	22
5. Provedba i rezultati mjerenja .....	24
5.1. Tehnike mjerenja radona .....	24

5.1.1. Pasivni uređaji.....	24
5.2. Detektor nuklearnih tragova .....	26
5.2.1. Nastajanje tragova u dielektriku.....	26
5.2.2. Brojanje tragova optičkim mikroskopom .....	27
5.2.3. Brojanje tragova brojačem iskri.....	30
5.3. Provedba mjerenja.....	31
5.3.1. Postavljanje i skidanje detektora .....	31
5.3.2. Jetkanje.....	33
5.3.3. Brojanje.....	34
5.4. Obrada podataka.....	34
5.5. Rezultati mjerenja.....	35
6. Zaključak .....	38
7. Literatura.....	39

# **UTJECAJ PROJEKTA POBOLJŠANJA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI NA KONCENTRACIJE RADONA U PROSTORIJAMA ODJELA ZA FIZIKU I ODJELA ZA MATEMATIKU SVEUČILIŠTA J. J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**BRUNO KOVAČ**

## **Sažetak**

Poboljšanje energetske učinkovitosti postojećih građevina zadnjih je godina sve učestalije. Kako je konvekcija jedan od glavnih mehanizama gubitka topline u zgradama, samo izmjenom stare stolarije u novu PVC stolariju mogu se smanjiti strujanje zraka i tako postići željeno smanjenje toplinskih gubitaka. Međutim, tim smanjenjem strujanja zraka olakšavamo nakupljanje radona u prostorijama unutar zgrade koji bi se inače ispustio u okolinu van zgrade. S obzirom da je radon drugi po redu (odmah nakon pušenja) uzročnik karcinoma pluća u svijetu, takve neželjene pojave ne smiju se zanemariti. U ovom radu promatrane su prostorije jedne zgrade, Odjela za fiziku i Odjela za matematiku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku u Republici Hrvatskoj, u kojima je uočeno povećanje srednje koncentracije radona veće od trostrukog nakon postavljanja nove PVC stolarije u odnosu na prošle koncentracije kada je u pitanju bila stara drvena.

(41 stranica, 16 slika, 12 tablica, 64 literaturna navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** radon / poboljšanje energetske učinkovitosti

**Mentor:** doc. dr. sc. Denis Stanić

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**



**EFFECT OF ENERGY EFFICIENCY PROJECT ON INDOOR  
RADON CONCENTRATION LEVELS AT THE DEPT. OF  
PHYSICS AND THE DEPT. OF MATHEMATICS AT J. J.  
STROSSMAYER UNIVERSITY OF OSIJEK**

**BRUNO KOVAČ**

**Abstract**

Energy efficiency upgrades of existing buildings in recent years have become more frequent. As convection is one of the main mechanisms of heat loss in buildings, only by replacing old windows with new PVC ones, air flow can be reduced and thus the desired reduction in heat loss in a building achieved. However, that reduction of air flow facilitates indoor radon gas buildup which would otherwise vacate to the outdoor environment. Considering that radon is the second leading cause of lung cancer (second only to smoking) worldwide, such unwanted occurrences should not be ignored. In this paper, indoor radon concentration levels at the Dept. of Physics and the Dept. of Mathematics at J. J. Strossmayer University of Osijek, Republic of Croatia, are observed. The resulting average concentration levels after the installation of new PVC windows are more than tripled as opposed to levels with the old wooden ones before.

(41 page, 16 figures, 12 tables, 64 references)

**Thesis deposited at the Department of Physics library**

**Keywords:** radon / energy efficiency upgrades

**Supervisor:** Asst. Prof. Denis Stanić, PhD

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## 1. Uvod

Dva izotopa novog, petog radioaktivnog elementa, nakon uranija, torija, radija i polonija, prvi su otkrili R. B. Owens i E. Rutherford 1900. godine – toron (kasnije prepoznat kao  $^{220}\text{Rn}$ ), a drugi izotop – radon (kasnije prepoznat kao  $^{222}\text{Rn}$ ) otkrio je F. E. Dorn (Cook, 1961.). Tipične koncentracije radona u zatvorenim prostorima kreću se od nekoliko desetaka do nekoliko stotina bekerela po metru kvadratnom ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) no imajući na umu da aktivnost radioaktivnog uzorka od jednog bekerela Bq odgovara jednom raspadu atomske jezgre u sekundi, jasno je da radon najčešće nalazimo u vrlo malim koncentracijama. Zbog toga ne možemo radon smatrati baš nekom opipljivom tvari već kao izolirane atome skrivene među drugim plinovima. Po trima stvarima je radon jedinstven prirodni element: prva što je plin, druga plemenit, a treća svi njegovi izotopi su radioaktivni. Plemenitost radonu osigurava put oslobođen od kemijskih reakcija s medijem kroz koji prodire. Rezultat toga je da radon obično iščezava samo vlastitim radioaktivnim raspadom, a upravo zbog tog raspada ga se može mjeriti s nevjerojatnom preciznošću. Nama ljudima najvažnija stvar kod radioaktivnosti radona ta je da u visokim koncentracijama može biti opasna po zdravlje – uzročnik je karcinoma pluća (Sethi, *et al.*, 2012.).

Odveć je poznato da gotovo u svim dielektričnim krutim tvarima prolaz jako ionizirajućih čestica ostavlja linearan trag poremećenog rasporeda unutar materijala. (Fleischer, *et al.*, 1975.). Ti sitni prikriveni tragovi mogu se uvećati u mikroskopski vidljive rupice jednostavnim izlaganjem odgovarajućim kemijskim reagensima. Neki od krutih detektora nuklearnih tragova, poput nitroceluloze LR 115 tipa II koja će se ovdje koristiti, hvataju tragove niskoenergetskih alfa čestica koje radon i njegove kćeri emitiraju.

Premda je glavni izvor radona tlo, često koncentriran unutar jedne prostorije zgrade ili jednog njenog dijela, plin protječe u ostale prostorije, odnosno dijelove zgrade uglavnom zbog ventilacije ili pak unatoč njoj. Za ventilaciju unutar zgrade najčešće odgovorni su prozori, odnosno stolarija tako da njenim utjecajem na koncentracije radona u zatvorenim prostorima ovaj će se rad baviti. Uspoređivat će se rezultati mjerenja zgrade Odjela za fiziku i Odjela za matematiku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku iz 2014. godine, kada je zgrada bila sa starom drvenom stolarijom, s novim mjerenjima iz 2021. godine, nakon što je postavljena nova PVC stolarija u sklopu projekta povećanja energetske učinkovitosti zgrade Odjela za fiziku i Odjela za matematiku.

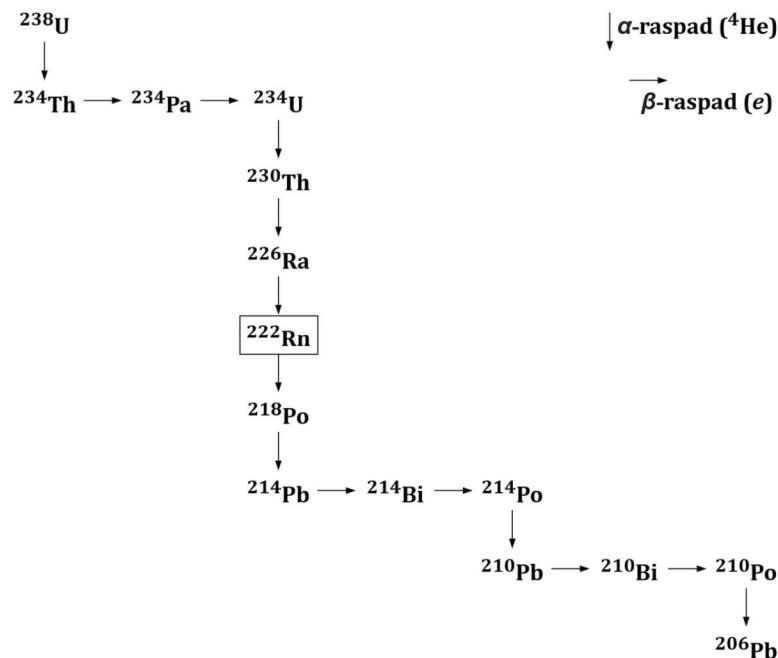
## 2. Radon: svojstva, porijeklo i prijenos

### 2.1. Svojstva radona

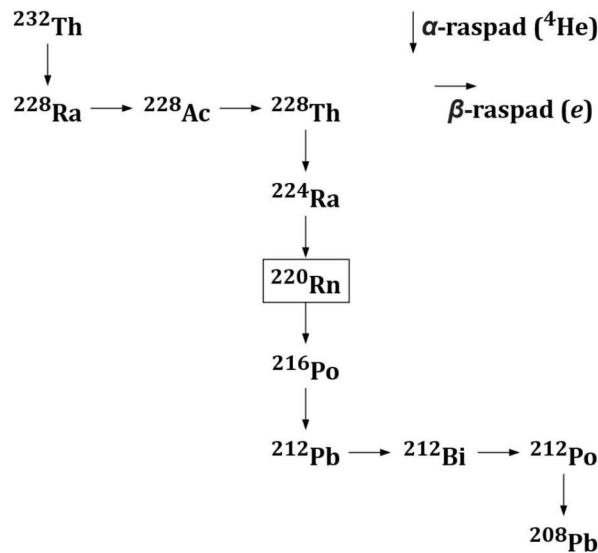
Radon je radioaktivan element atomskog broja 86 što znači da je plemenit pa time kemijski nereaktivan i atomski mobilan pri normalnim temperaturama. Prirodno se javlja u tri izotopa:  $^{222}\text{Rn}$  radon,  $^{220}\text{Rn}$  toron (zato što potiče iz torija) i  $^{219}\text{Rn}$  (iz niza raspada  $^{235}\text{U}$ ), sva tri koja svojim raspadom emitiraju alfa čestice.

#### 2.1.1. Lanac radioaktivnog raspada

Tri prirodna izotopa karika su lanca podužeg niza raspada koji kreće od uranijovih ili torijskih izotopa –  $^{222}\text{Rn}$  od  $^{238}\text{U}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  od  $^{232}\text{Th}$  i od maloprije  $^{219}\text{Rn}$  od  $^{235}\text{U}$ . Vremena njihovih poluraspada  $\tau_{1/2}$  redom su 3,82 dana, 55,6 sekundi i 3,96 sekundi. Treba spomenuti da je za vrijeme pisanja ovog rada poznato 37 izotopa radona no nijedan od njih se ne može dobiti prirodnim procesima. Na slikama 2.1. i 2.2. prikazani su nizovi raspada radona i torona, ali samo s najčešćim granama. Na tim slikama horizontalni pomaci predstavljaju emisiju elektrona ( $\beta$ -raspad) koji uvećavaju atomski broj za 1, a ne mijenjaju atomsku masu; okomiti pomaci su emisije  $^4\text{He}$  (jezgre helija,  $\alpha$ -raspad), koji smanjuje atomski broj za 2, a atomsku masu za 4.



Slika 2.1.: Lanac raspada  $^{238}\text{U}$  – izvor  $^{222}\text{Rn}$  (radona).



**Slika 2.2.:** Lanac raspada  $^{232}\text{Th}$  – izvor  $^{220}\text{Rn}$  (torona).

U oba lanca izotop radona rezultat je alfa raspada radija, stoga se da naslutiti kako pojava radona ovisi o količini radija prisutnom u tlu (više o tome u odjeljku 2.2.).

Relativna važnost triju izotopa radona raste sa svojim srednjim vremenima života i relativnim obiljem.  $^{219}\text{Rn}$  najkraćeg je vijeka i gotovo uvijek nastaje u mnogo manjim količinama naspram  $^{222}\text{Rn}$  budući da je prirodan omjer  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  ovih krajnjih očeva 0,00719, stoga  $^{219}\text{Rn}$  uglavnom zanemarujemo. Što se tiče  $^{220}\text{Rn}$ , on je suviše kratkog vijeka u odnosu na  $^{222}\text{Rn}$  i zbog toga mu je srednja udaljenost od svog izvora mnogo manja nego što je to slučaj kod  $^{222}\text{Rn}$ . Ako je difuzijski koeficijent zraka  $D = 0,1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , srednja udaljenost difuzijskog gibanja  $\sqrt{D\tau}$  je 2,2 m za  $^{222}\text{Rn}$  i 0,029 m za  $^{220}\text{Rn}$ . Dakle, kada je izvor srazmjerno udaljen,  $^{222}\text{Rn}$  daleko je dominantniji nuklid dok je  $^{220}\text{Rn}$  ništa više od pozadinskog šuma koji se najčešće izostavlja iz mjerenja.

### 2.1.2. Domet alfa čestica

U tablici 2.1. navedene su energije alfa raspada te dometi u zraku i vodi alfa čestica koju  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{220}\text{Rn}$  te njihove alfa-aktivne kćeri emitiraju. Dometi u tipičnim plastikama slični su onima u vodi. Npr., približne vrijednosti dometa 5,49 MeV  $^{222}\text{Rn}$  alfa čestice su  $39 \mu\text{m}$  u vodi,  $32 \mu\text{m}$  u polietilen tereftalatu – PET (gustoće  $1,2 \text{ g cm}^{-3}$ ),  $31 \mu\text{m}$  u polietilenu,  $37 \mu\text{m}$  u polikarbonatu – PC, dok je samo  $23 \mu\text{m}$  u natrij kalcijevom staklu – obično staklo (gustoće  $\approx 2,5 \text{ g cm}^{-3}$ ).

**Tablica 2.1.:** Energije i dometi alfa čestica (Durrani & Ilić, 1997.).

Nuklid	Alfa energija (MeV)	Alfa domet ( $\mu\text{m}$ vode)	Alfa domet (cm zraka)
$^{222}\text{Rn}$	5,49	39	4,08
$^{218}\text{Po}$	6,00	44	4,67
$^{214}\text{Po}$	7,69	66	6,91
$^{220}\text{Rn}$	6,29	48	5,01
$^{216}\text{Po}$	6,78	41	5,67
$^{212}\text{Po}$ (64%)	8,78	83	8,53
$^{212}\text{Bi}$ (36%)	6,05	45	4,73

Izračuni vrijede za 6°C pri nadmorskoj visini.

### 2.1.3. Difuzija

Brzine difuzije radona u zraku i vodi uvelike se razlikuju. Prema tablici 2.2., difuzijski koeficijent  $D$  u vodi manji je nego u zraku za faktor  $10^4$ . Kako smo ranije utvrdili, postoji srednja udaljenost gibanja izotopa radona prije nego što se raspadne  $\sqrt{D\tau}$ , gdje je  $\tau$  srednje vrijeme života izotopa. Prema tome prosječan atom  $^{222}\text{Rn}$  prolazi kroz 1,6 m suhe porozne zemlje dok samo 1,6 cm u vodom zasićenoj zemlji.

**Tablica 2.2.:** Srednje difuzijske udaljenosti izotopa radona u različitim medijima (Durrani & Ilić, 1997.).

Medij	Srednja udaljenost		Difuzijski koef., <i>pretpostavljen</i> ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )
	$^{222}\text{Rn}$ (cm)	$^{220}\text{Rn}$ (Tn) (cm)	
Zrak	220	2,85	$10^{-1}$
Porozna zemlja	155	2,0	$5 \cdot 10^{-2}$
Voda	2,2	0,0285	$10^{-5}$
Zasićena porozna zemlja	1,55	0,020	$5 \cdot 10^{-6}$

Srednje difuzijske udaljenosti dane u gornjoj tablici važne su za ograničavanje efektivnog gibanja radona i torona kada nisu u prisustvu posebni prijenosni mehanizmi.

Iz tog razloga unos radona u temelje zgrada pretežito dolazi iz zemlje jedan do dva metra od zgrade, dakle riječ je o lokalnom izvoru.

## 2.2. Izvori i prijenos radona

Radon  $^{222}\text{Rn}$  najobilniji je u mineralnim sirovinama, 25 puta ga ima manje u tlu, još 1000 puta manje u domovima, još 5 puta manje u zraku iznad tla i još 100 puta manje iznad oceana (tablica 2.3.). Dani brojevi teže ka jednom zaključku: radon potiče od raspada radija prisutnom u zemlji; sitni djelić toga izmigolji se kroz zemljine pore u atmosferu iznad tla gdje se većina raspadne prije nego što ih vjetrovi odnesu do oceana. Zgrade, zbog toga što se nalaze između tla i atmosfere, imaju koncentracije radona negdje između onih u tlu i atmosferi.

**Tablica 2.3.:** Tipične koncentracija  $^{222}\text{Rn}$ . (Durrani & Ilić, 1997.)

Lokacija	Koncentracija (atoma $\text{cm}^{-3}$ )
Zrak iznad oceana	0,04
Zrak pri zemljinoj površini	4
Tipična kuća u SAD-u	20
Tlo	20.000
Unutrašnjost tipičnog minerala	500.000

### 2.2.1. Izvori

Izotopi radona nastaju u mineralima raspadom Ra (radija) koji je sam po sebi produkt prirodnog lanca radioaktivnog raspada koji počinje s  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  ili  $^{232}\text{Th}$ . Premda tablica 2.3. prikazuje srednju brzinu nastajanja radona, minerali se uvelike mogu razlikovati po svojim udjelom spomenutih praočeva radona, u rasponu od kvarca ( $\text{SiO}_2$ ) s  $\leq 3 \cdot 10^{-14}$  udjela uranija (Fleischer, 1988.) do  $\text{UO}_2$  s 0,88. Tipične sedimentne stijene, one koje čine 95% reljefa Hrvatske, imaju  $\sim 10^{-7}$  (Malov & Pokrovsky, 2011.).

### 2.2.2. Mehanizmi otpuštanja

Radon obično nikada ne napusti mineral u kojem se rodi već ostaje zatvoren čvrsto unutar kristalne rešetke par dana dok se ne raspadne. Malen dio koji se uspije iskrasti to učini odmah pri rođenju ili unutar tih par dana prije raspada.

Prvi je *plan bijega* direktno izbacivanje atoma radona povratnim trzajem od emisije alfa čestice (Kigoshi, 1971.). Ukoliko se radon nalazi unutar 26 nm od površine SiO<sub>2</sub>, na primjer, što čini domet povratnog alfa-trzaja jezgre u silicijevom oksidu i ukoliko je taj trzaj dobro usmjeren, odbačen atom radona može napustiti kristalnu rešetku i ući u prostor između dvaju zrna minerala u zemlji. Tada, kako je Kigoshi zamislio, postoje dvije mogućnosti. Prva, ukoliko međuzrnasti prostor sadrži vodu, izbačeni atom će najvjerojatnije zaglaviti u vodi gdje će difundirati ili će ga ona dalje prenijeti.

Sad, ako je prostor između dvaju zrna suh, tj. sadrži samo plinove i uz to nije dovoljno širok, izbačeni atom će se zabit u susjedno zrno gdje će ostati zaglavljeno. Međutim, nisu sve nade za bijeg iščeznule. Zbog toga što od zračenja nastaje šteta u kristalnoj rešetki koja se proteže od uboda sve do mjesta gdje se atom zaglavio, moguće je primijeniti novi plan bijega. Budući da *ubodna rana* u kristalu ne može biti preuboka, moguće ju je vodom dodatno proširiti (Fleischer, 1980.) i tako osloboditi radon. To se može dogoditi samo ako prethodno suha zrna postanu vlažna prije nego što se taj radon raspadne. Nije baš očito da ova pojava treba postojati, ali od prvotnog otkrića za kvarc (Fleischer, 1980.), također je pokazano i za muskovit [KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH<sub>2</sub>)], diopsid (CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), ortoklas (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), apatit, titanit i opsidijan (Fleischer, 1982.).

### 2.2.3. Prijenos radona

Osnovna dva načina na koja se radon širi su difuzija i prisilni protok. Ranije smo već razmotrili difuziju u zraku i vodi u odjeljku 2.1.3. Isti je slučaj u zemlji, samo ovisi o poroznosti zemlje i stijena. Općenito, veća poroznost omogućava širi difuzni prijenos no važno je napomenuti da samo djelić poroznog prostora omogućuje protok. Većina poroznosti u tlu međusobno je povezana, ali to nije nužno slučaj u stijenama. U skupini od 32 vrsta tla, od gline do muljevitog pijeska, vrijednosti  $D$  kretale su se od 0,005 do 0,062 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>, sa srednjom vrijednošću od 0,03 (Silker & Kalkwarf, 1983.). Usporedbe radi, vrijednost  $D$  zraka je 0,1 cm<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>.

Gradijenti tlaka mogu uzrokovati prisilni protok plinova ili tekućina u međuzrnastom prostoru u zemlji, a takav je tok opisan hidrauličnom permeabilnosti

$$K = \frac{\eta \left( \frac{dV}{dt} \right)}{A \left( \frac{dP}{dx} \right)}$$

gdje su  $\eta$  viskoznost,  $(dV/dt)/A$  volumen po jedinici vremena i po jedinici površine, a  $dP/dx$  gradijent tlaka. Mjerna jedinica za  $K$  u jedinicama je  $(duljine)^2$ , obično ili  $cm^2$  ili darcyja, gdje je  $1 \text{ darcy} = 10^{-8} \text{ cm}^2$ . Tablica 2.4. prikazuje širok spektar vrijednosti hidrauličnih permeabilnosti za različite tvari.

**Tablica 2.4.:** Ogledne vrijednosti hidraulične permeabilnosti (Scheidegger, 1960.).

Tvar	Permeabilni domet (permeabilnost u $cm^2$ )
Naftni škriljevac u prahu	$4,9 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-9}$
Silicijev dioksid u prahu	$1,3 \cdot 10^{-10} - 5,1 \cdot 10^{-10}$
Pijesak (rastresito korito)	$2,0 \cdot 10^{-7} - 1,8 \cdot 10^{-6}$
Tla	$2,9 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-7}$
Naftni pijesak (pješčar)	$5,0 \cdot 10^{-12} - 3,0 \cdot 10^{-8}$
Dolomitni vapnenac	$2,0 \cdot 10^{-11} - 4,5 \cdot 10^{-10}$
Opeka	$4,8 \cdot 10^{-11} - 2,2 \cdot 10^{-9}$
Asfalt	$1,0 \cdot 10^{-9} - 2,3 \cdot 10^{-7}$
Plutena ploča	$3,3 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5}$
Stakleno vlakno	$2,4 \cdot 10^{-7} - 5,1 \cdot 10^{-7}$

Postoje tri glavne kategorije fizikalnih procesa u zemlji koje stvaraju gradijente tlaka i time utiču na protok radona: ispuštanje plinova, naprezanja i konvekcija fluida. Plinove mogu ispuštati naftna nalazišta (Fleischer & Turner, 1984.), a isto tako ih može ispuštati povećanje tlaka usred zagrijavanja kod vrućih dijelova zemljine kore poput vulkana. Naprezanja prethode potresima (Dobrovolsky, *et al.*, 1979.) (Fleischer, 1981.) i vulkanskim erupcijama, gdje gradijenti naprezanja mogu potaknuti protok fluida u zemlji. Konvekcija fluida može proizvesti protoke ukoliko postoje dovoljno strmi geotermalni gradijenti i dovoljno visoke permeabilnosti (Mogro-Campero & Fleischer, 1977.) što zauzvrat može odati nadolazeću vulkansku aktivnost.



### 3. Radon u zatvorenom prostoru

#### 3.1. Radonove kćeri u zraku

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) se javlja u prirodnom nizu raspadanja uranija ( $^{238}\text{U}$ ) u kojem se sam atom radona raspada u razne radonove kćeri. Plin sa svojim kćerima postiže ravnotežu ukoliko se izmjena zraka svede na nulu.

U zatvorenim prostorima obično postoji nekakav oblik ventilacije, odnosno određen stupanj izmjene zraka, tako da pojedini atomi lanca raspada imaju određenu šansu napuštanja unutrašnjeg zraka. Atom radona najduljeg je vijeka u onom nizu raspada u kojem sljeduje  $^{226}\text{Ra}$ . Što je u nizu atom kćer niže od radona, to je njegov vijek trajanja kraći. Isto tako ti atomi imaju nižu koncentraciju aktivnosti zbog toga što se stanja ravnoteže između radona i njegovih kćeri obično ne postižu.

Brzoraspadajući produkti  $^{222}\text{Rn}$  su atomi metala (Pb, Bi i Po) koji se kondenziraju na bilo koju krutu ili tekuću površinu koju dotaknu. Privezat će se za sitne čestice koje su obično u zraku prisutne. U „čistom“ zraku tih čestica ima  $\sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$  dok u urbanim područjima njihova razina se može popeti i do  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$  (Junge, 1963.). U zatvorenom prostoru postoji mnogo površina na kojem se radonove kćeri mogu nataložiti, pored toga što se mogu privezati na aerosole koji se također mogu na te površine nataložiti. Posljedica toga je da zrak u zatvorenom prostoru rijetko postiže svoj potpun skup kratkoživućih kćeri i obično je znatno ispod stanja ravnoteže (u kojem je aktivnost svake kćeri jednaka aktivnosti njenog roditelja Rn). Iako se apsorbirane doze u plućima dobivaju prije od kćeri nego direktno od  $^{222}\text{Rn}$ , mjerenja radona daleko su lakša pa time i jeftinija od mjerenja njegovih kćeri, stoga se on najčešće i mjeri u zgradama.

#### 3.2. Radon iz građevinskog materijala

Jedan od izvora radona u zatvorenom prostoru građevinski je materijal od kojeg je prostorija izgrađena. Sav taj materijal sadrži  $^{238}\text{U}$  pa je zato potencijalni izvor radona. Međutim, neki materijali imaju višu koncentraciju  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . To vrijedi i za prirodne i umjetne materijale. Tipični prirodni nosioci uranija materijali su poput određenih granita no uvijek se mogu naći različit tipovi kamena bogatih uranijom koji se često koriste kao građevinski materijal. Određeni tipovi tla, npr. neke gline, koji se uzimaju za građevinski materijal mogu imat povećan udio uranija. Tipični primjeri umjetnih materijala različiti

su tipovi betona i lakih betona kojima se dodaje pepeo ili neke druge primjese bogate uranijom.

Izolacijski slojevi sačinjeni od uranijom bogatog zdrobljenog kamena ili lakog betona znatno mogu pridonijeti razini radona u zatvorenom prostoru. Ispuštanje radona ovisi o veličinu zrna u izolacijskom materijalu. Može se očekivati da vrijedi

$$E = cD^{-x},$$

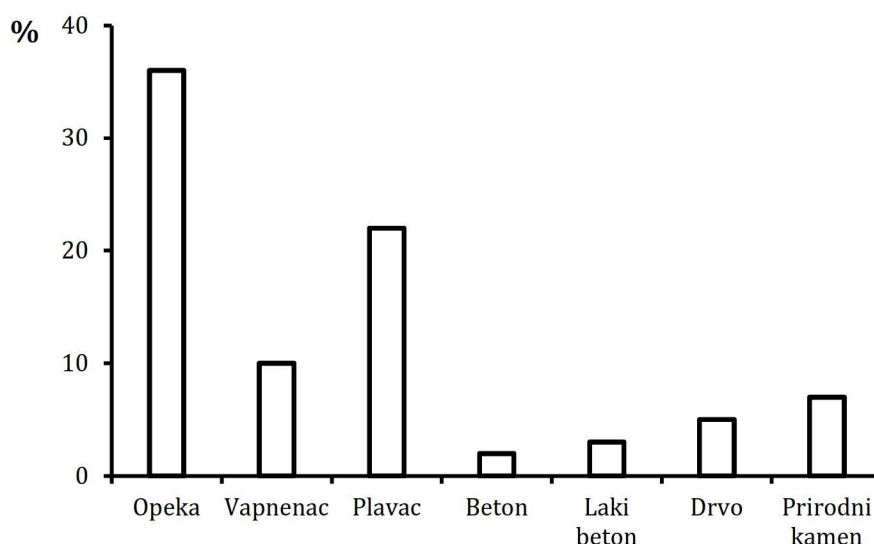
gdje su  $E$  brzina ispuštanja,  $c$  konstanta i  $D$  srednji promjer zrna;  $x$  je između 0,5 i 1 ovisno o gustoći zrna (Tanner, 1964.).

Tablica 3.1. prikazuje količinu radija ( $^{226}\text{Ra}$ ) i torija ( $^{232}\text{Th}$ ), izotopa koji odražavaju mogućnost emisije radona i torona, prisutnom u nekim od građevinskih materijala, u pogledu njihovih specifičnih aktivnosti.

**Tablica 3.1.:** Količine  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{232}\text{Th}$  među nekim građevinskim materijalima i otpadom u Njemačkoj (Winter & Wicke, 1993.).

Materijal	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )
Granit	30 – 500	17 – 311
Opeka	10 – 200	12 – 200
Vapnenac	4 – 41	2 – 20
Gips	2 – 70	2 – 100
Beton	7 – 92	4 – 71
Laki beton	6 – 80	1 – 60
Stara bakrena troska	861 – 2.100	18 – 78
Limena troska	1.000 – 1.200	230 – 340
Pepeo mrkog ugljena	4 – 200	6 – 150

Slika 3.1. prikazuje relativan broj stambenih zgrada u Njemačkoj s razinama radona koje prelaze 100 Bq m<sup>-3</sup> za različite građevinske materijale. U obzir su uzete i obiteljske kuće i višestambene zgrade.



**Slika 3.1.:** Relativan broj stambenih zgrada s razinama radona koje prelaze  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  za različite građevinske materijale u Njemačkoj (Heller & Poulheim, 1992.).

### 3.3. Radon iz tla

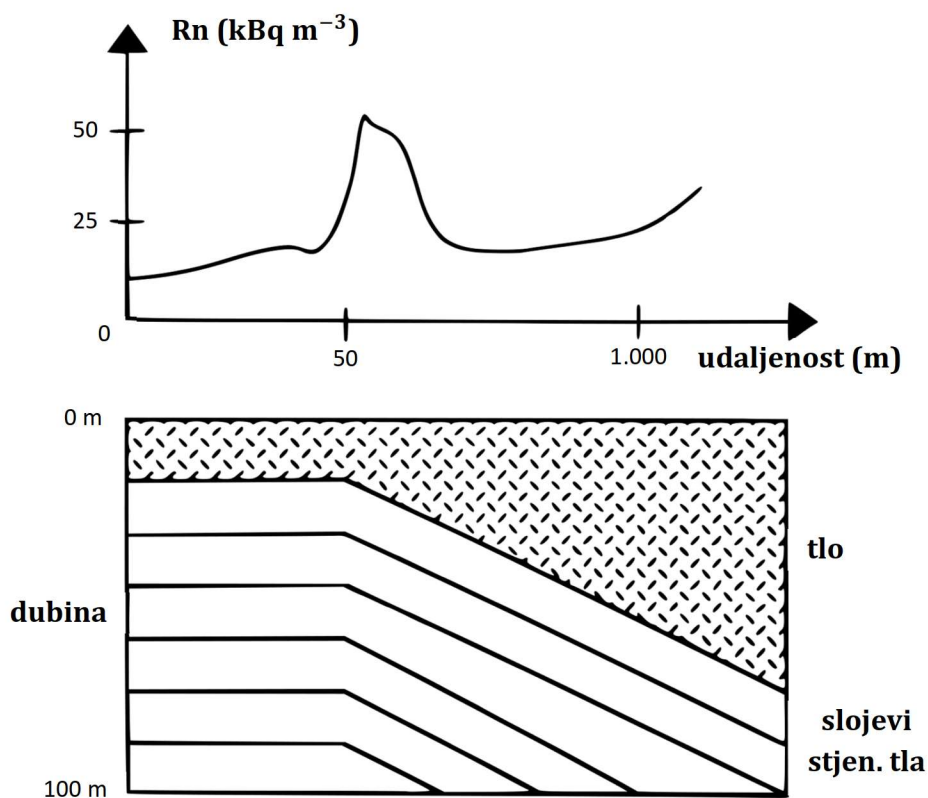
Tlo na kojem zgrada stoji općenito je glavni izvor radona u njenoj unutrašnjosti. Osnova ovog izvora radona prisustvo je uranija u tlu. Mnoge vrste stjenovitog tla sadrže uranij, ali da bi on bio značajan izvor radona neophodno je da njegova koncentracija uranija bude iznad, recimo  $5 \cdot 10^{-5}$ , pogotovo ako je njegov sloj dublje od 100 m ispod površine. Plin radona prolazi kroz građu stjenovitog tla duž različitih slojeva i kroz pukotine u njima. Površinski sloj tla koji leži na stjenovitom tlu također se sastoji od stjenovitog tla u blizini kojeg su erozijom dovukli ledenjaci ili tokovi velikih rijeka. Ako je stijena bogata uranijom, onda je i površinski izvor radona. Tablica 3.2. prikazuje koncentraciju uranija u nekim od tipova stijena u Švedskoj.

Ako je tlo permeabilno poput šljunka, plin radona koji nastane u stjenovitom tlu ispod lako se prenosi prema gore kroz tlo. Prisustvo podzemne vode, vlažne gline ili drugog nepermeabilnog tla može spriječiti protok radona. Posebna vrsta izvora radona u tlu su pukotine i rasjedi koji mogu služiti kao dobra prečica plinu radona na putu prema površini. Neki od velikih rasjeda također su potresna područja. Premda su kuće koje se nalaze na takvim pukotinama vrlo rijetka pojava, postoje primjeri gdje se takve pukotine mogu uočiti tako što, recimo u određenoj ulici, samo jedna kuća ima znatno povišenu koncentraciju radona, s tim da bi takva kuća morala biti bez učinkovite izolacije od radona iz tla i ne bi smio postojati negativni gradijent unutrašnjeg zraka u njoj.

**Tablica 3.2.:** Koncentracije  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  u nekim od stijena u Švedskoj (Swedish radon commission, 1983.).

Stijena	$^{238}\text{U}$ (g/10 <sup>3</sup> kg)	$^{232}\text{Th}$ (g/10 <sup>3</sup> kg)
Granit, običan	2 – 10	5 – 20
Granit, "radioaktivan"	8 – 40	10 – 90
Pješčar	0,5 – 5	1 – 10
Vapnenac	0,5 – 2	1 – 2
Škriljevac	1 – 10	2 – 15
Naftni škriljevac	10 – 350	2 – 10

Slika 3.2. prikazuje primjer razina radona u tlu na pravcu duž rasjeda. Kuće koje se nalaze na udaljenosti između 50 – 70 m, dakle kod pukotine, imaju veći potencijalni rizik od visoke koncentracije radona.



**Slika 3.2.:** Na mjestu rasjeda stjenovitog tla javlja se uzlazni tok plina radona koji se potom provlači kroz gornje tlo sve do površine (Durrani & Ilić, 1997.).

### 3.4. Radon iz vode

S molarnim udjelom topljivosti plina u vodi od  $2,3 \cdot 10^{-4}$  pri temperaturi od  $15^{\circ}\text{C}$ , radon je oko deset puta topljiviji od kisika (Lide, 1993.). Radon s vodom dolazi od njenog izvora gdje okolno tlo ispušta plin. Kako je  $^{226}\text{Ra}$ , majka atoma  $^{222}\text{Rn}$ , također topljiv u vodi, njegova količina u tlu isto igra važnu ulogu. Shodno tomu, očekuje se da voda iz bunara gdje je tlo bogato  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$ , dakle tlo s granitom, permutitom, sijenitom i porfiritom, sadrži radon. Plin radon ispušta se tamo gdje se voda zadržava unutar zgrada, najčešće kuhinja, kupaonica itd. Općenito je pravilo da  $1.000 \text{ Bq l}^{-1}$  radona u vodi pridonosi oko  $100 \text{ Bq m}^{-3}$  radona u unutrašnjem zraku (Kulich, *et al.*, 1985.). Voda iz bušenih bunara sadrži daleko više radona od one iz kopanih bunara (Åkerblom, 1994.). Kopani bunar, s obzirom da nije toliko dubok, uglavnom sadrži površinsku vodu. Voda iz javne vodoopskrbe obično ima vrlo male količine radona što je dijelom zbog tretiranja vode u postrojenjima za pročišćavanje vode gdje je ona, iz drugih razloga, izložena zraku u koji se radon iz nje ispušta. Voda iz bušenog bunara više manje je zatvoreni sustav od bušotine sve do slavine. Filtrirana površinska voda ili jezerska voda često je glavni ili dodatni izvor vode za velika postrojenja što znači malu ili nikakvu količinu radona u toj vodi. Tablica 3.3. prikazuje primjer razlike u količini radona između kopanih i bušenih bunara.

**Tablica 3.3.:** Koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  i  $^{226}\text{Ra}$  u pitkoj vodi u Finskoj (Asikainen & Kahlos, 1980.).

Izvor vode	Broj	$^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq l}^{-1}$ )	$^{226}\text{Ra}$ ( $\text{Bq l}^{-1}$ )
Kopani bunari	690	4* - 1.600	0,004* - 0,3
Bušeni bunari	570	4 - 44.000	0,004 - 7,5

\* granica mjerenja

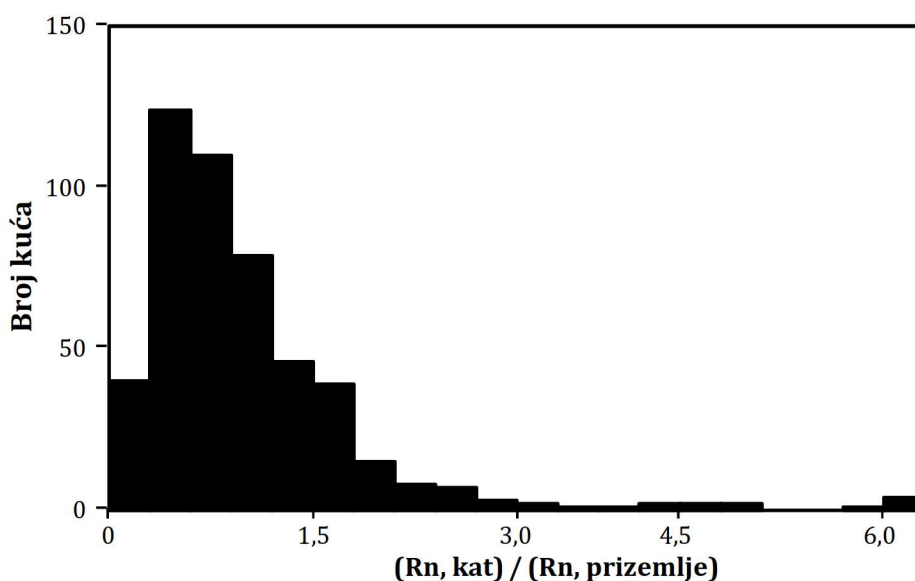
Tretiranje vode u postrojenjima za pročišćavanje znači ispuštanje plina radona iz vode u unutrašnjost postrojenja gdje su u zraku izmjerene razine radona od otprilike  $20.000 \text{ Bq m}^{-3}$  u nekim dijelovima Švedske.

### 3.5. Raspodjela radona unutar kuće

Kako je već rečeno u uvodu, izvor radona često je koncentriran u jednoj prostoriji ili jednom dijelu kuće pa zbog ventilacije ili pak unatoč njoj plin se širi u ostale dijelove

kuće. Plin koji uđe u prostor s malo ili nimalo izmjene zraka s okolinom ostaje u njemu. U kućama s prirodnim strujanjem zraka plin konvekcijom prati protok zraka prema gore od nižih dijelova kuće naviše. Konvekcija, međutim, ne djeluje ako je temperatura unutar kuće otprilike jednaka ili niža od one izvan kuće.

Slika 3.3. prikazuje raspodjelu omjera  $R_n$  (kat)/ $R_n$  (prizemlje) unutar 488 kuća u Švedskoj. Srednja vrijednost raspodjele je 0,8 što potvrđuje tvrdnju da donji dio kuće ima više razine radona od gornjeg. Ako je tlo ispod kuće izvor radona, ova je tvrdnja očita osim ukoliko se plin nakuplja na gornjem katu zbog nedostatka ispusta. Rezultate slike 3.3. također potvrđuju podaci u tablici 3.4. sakupljeni u Njemačkoj.



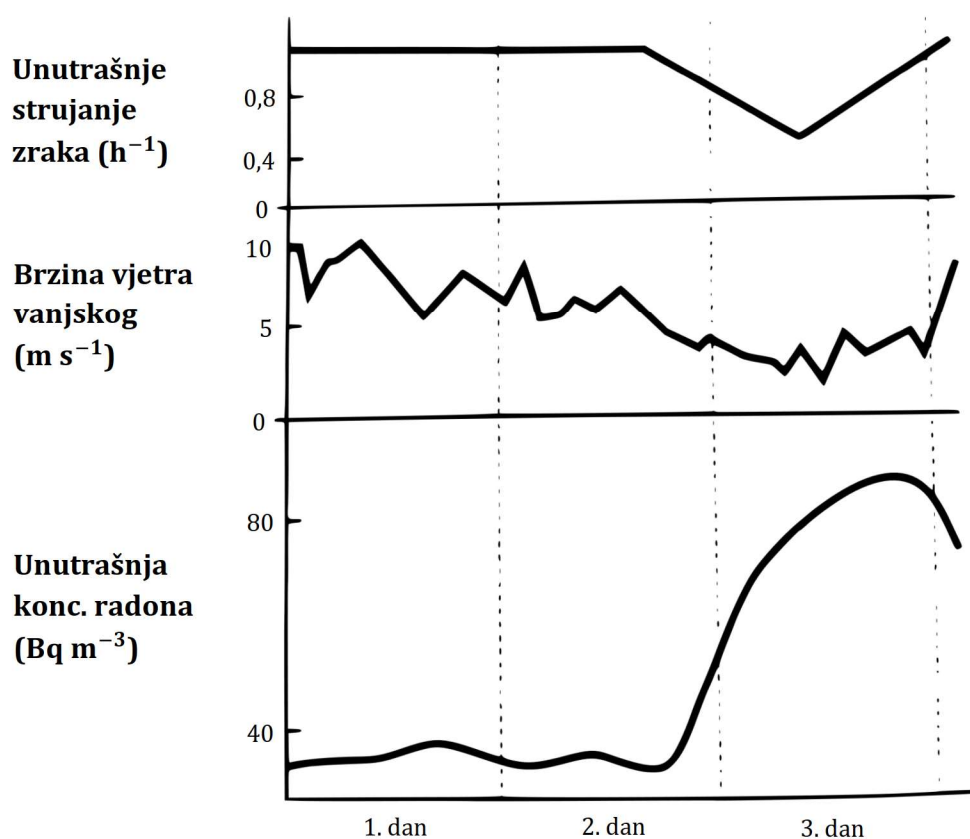
**Slika 3.3.:** Usporedba između razina radona na katu i prizemlju unutar 488 kuća u Švedskoj (Jönsson, 1987.).

**Tablica 3.4.:** Srednje razine radona na različitim katovima u njemačkim kućama. (Heller & Poulheim, 1992.).

Kat →	Podrum	Prizemlje	1. kat	2. kat	Izvan kuće
Srednja razina radona ( $Bq\ m^{-3}$ )	52	43	38	33	14

### 3.6. Kratkotrajne varijacije razine radona u zatvorenom prostoru

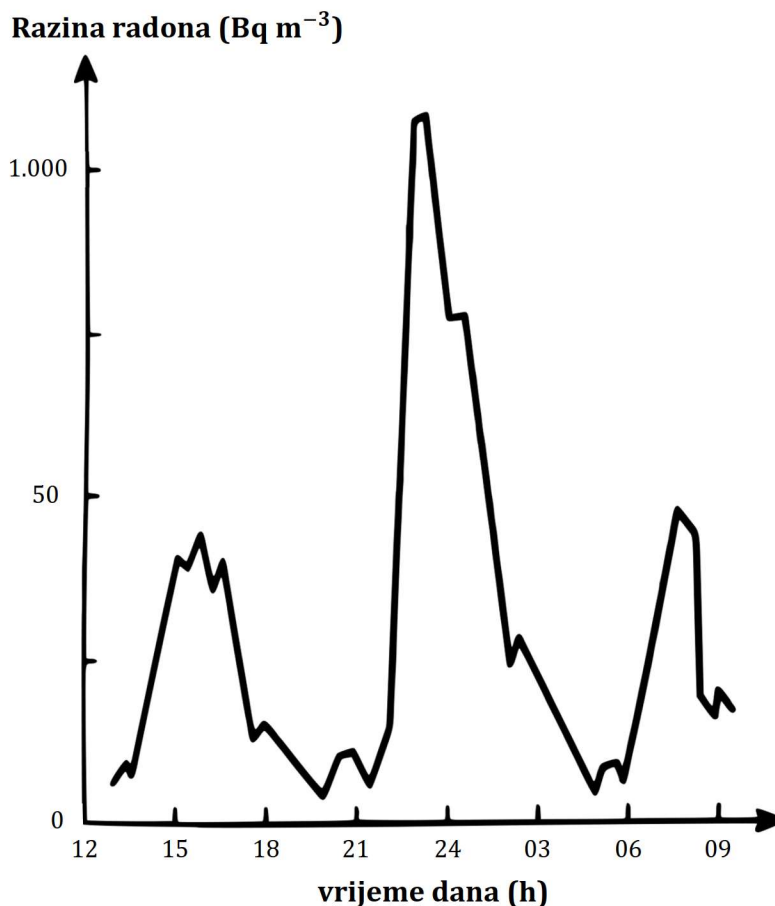
Budući da je radon plin, ventilacija zatvorenog prostora važan je faktor koji utječe na razine radona u tom prostoru. U kućama s prirodnim strujanjem zraka, vanjski vremenski uvjeti mogu utjecati na brzinu strujanja zraka. Negativan tlak ili gradijent tlaka može postojati u jednom dijelu kuće. Veza između brzine vanjskog vjetra, brzine strujanja zraka u unutrašnjosti kuće i razine radona u njoj prikazana je na slici 3.4. Sva tri parametra razmatrana su tijekom tri dana u kući s prirodnim strujanjem zraka. Na početku trećeg dana, brzina vjetra je bila veoma niska što znači smanjeno strujanje zraka i posljedično povišenu razinu radona.



**Slika 3.4.:** Na unutrašnje razine radona u kući s prirodnim strujanjem zraka utječe brzina vanjskog vjetra (Jönsson, 1992.). Slika iz (Durrani & Ilić, 1997.).

Visoke razine radona iz tla u unutrašnjosti ovise o načinu na kojem se ljudi ponašaju unutar kuće ili zgrade: drže li se vrata otvorenima ili zatvorenima; radi li kuhinjska napa, je li prostor klimatiziran; jesu li prozori otvoreni; itd. Otvoreni plamen kod grijanja na drva ili plin traži svjež zrak što obično znači podtlak unutar kuće. Ukoliko

zrak iz tla ulazi u unutrašnji zrak kao posljedica tog podtlaka, što je pogotovo slučaj zimi kada se prostorije rjeđe provjetravaju, razina radona u kući vjerojatno je povišena. Kratkotrajna varijacija tijekom dana može biti ekstremna. Slika 3.5. prikazuje kako se unutrašnja koncentracija radona naglo mijenja u kući s prirodnim strujanjem zraka, gdje je tlo ispod nje glavni izvor radona. Konvektivna strujanja zraka glavni su razlog za ovu varijaciju.



**Slika 3.5.:** Unutrašnje koncentracije radona naglo se mijenjaju u kući s prirodnim strujanjem zraka (Jönsson, 1992.). Mjerenja su vršena zimi u Švedskoj. Slika iz (Durrani & Ilić, 1997.).

Ono što se da zaključiti sa slike 3.5. je da gotovo nikakve koristi od otvaranja prozora na pola sata radi provjetravanja zato što razine radona ponovo naglo skoče po zatvaranju prozora.



### 3.7. Sezonske varijacije razina radona u zatvorenom prostoru

Postoji sezonska varijacija unutrašnjih razina radona, pogotovo kada je riječ o kućama s prirodnim strujanjem zraka. Ljeti, kada su vanjske temperature visoke kao ili više od unutrašnjih, konvektivna strujanja unutrašnjeg zraka su zanemariva. Ako je temperatura unutra, recimo 10°C viša nego vani, djeluju konvektivne sile i unutra postoji malen podtlak od možda 10 Pa. Ako je zemlja glavni izvor radona, imati unutra podtlak može biti nedostatak ako on prelazi 2-5 Pa. Ako su materijal od kojeg je kuća izgrađena ili voda u cijevima unutar nje izvori radona, podtlak je prednost. Pravilno prirodno strujanje zraka daje slab podtlak.

Što se radonovih kćeri tiče, relativna vlažnost zraka iznutra doprinosi gustoći aerosola i zadržava radonove kćeri u unutrašnjem zraku. Relativna vlažnost zraka mijenja se u odnosu na godišnja doba.

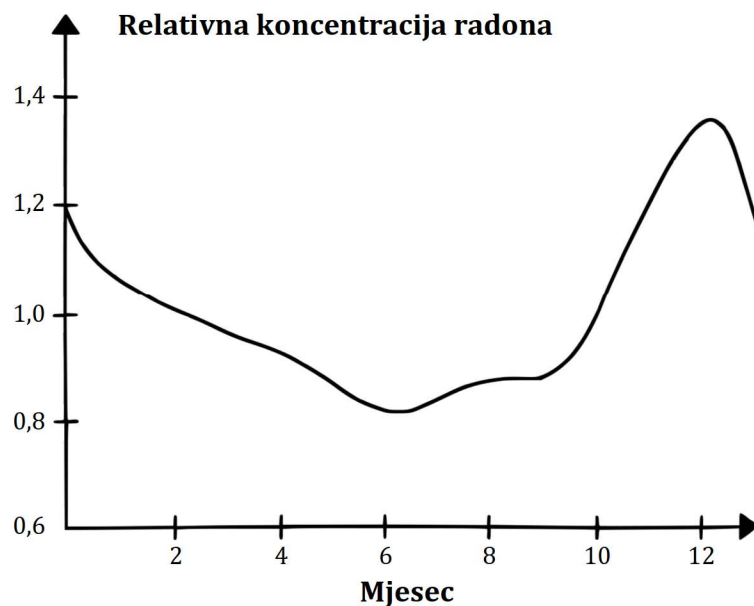
Ispuštanje radona iz građevinskog materijala se povećava ljeti, kada je srednja temperatura tog materijala viša nego zimi (Stranden, *et al.*, 1984.). Tablica 3.5. prikazuje rezultate studije sezonskih varijacija unutrašnjih razina radona u švedskim kućama gdje je građevinski materijal glavni izvor radona. Apsolutna vlažnost vanjskog zraka u ovoj studiji je oko 3 g m<sup>-3</sup> za vrijeme zimskih mjeseci i 9 g m<sup>-3</sup> za vrijeme ljetnih. Tablica pokazuje da su razine radona niže zimi što je posljedica više brzine strujanja tijekom zime usred efekta dimnjaka.

**Tablica 3.5.:** Koncentracije radona u jednostambenim zgradama – kućama (A) i višestambenim zgradama (B) tijekom različitih godišnjih doba u Švedskoj (Jönsson, 1988.).

Unutrašnja koncentracija radona (Bq m <sup>-3</sup> ) →		< 140		140 – 400		> 400		Godišnje doba
Broj zgrada		Postotak						
A	B	A	B	A	B	A	B	
317	156	33	70	53	29	14	1	Ljeto
612	261	55	83	42	17	3		Zima
59	34	56	82	37	18	7		Proljeće
43	9	28	67	63	33	9		Jesen

Slika 3.6. prikazuje varijaciju koncentracije radona tijekom jedne godine u Njemačkoj. Razina radona raste tijekom jeseni i postiže maksimum zimi, zatim pada za

proljeće i postiže minimum ljeti. Ovakva krivulja je očekivana s obzirom da je, u odnosu na zimu, ljeti normalno imati otvorene prozore, stoga i nižu unutrašnju razinu radona. U zemljama gdje tlo zimi biva smrznuto, efekt dimnjaka u kućama s prirodnim strujanjem zraka može povisiti količinu radona koji curi iz tla u unutrašnjost kuće.



**Slika 3.6.:** Godišnja varijacija unutrašnje koncentracije radona u Njemačkoj s miješanim izvorom radona (Heller & Poulheim, 1992.). Slika iz (Durrani & Ilić, 1997.).

### 3.8. Zaključna napomena

Budući da izmjenom stare, obično drvene stolarije, u novu, pretežito PVC stolariju, propusnost zraka u domovima očekivano opada (Oreszczyn, *et al.*, 2005.), što je naravno poželjno kada je cilj smanjenje toplinskih gubitaka, u narednim poglavljima provjerit ćemo postoji li korelacija između propusnosti zraka i koncentracije radona u prostorijama gdje je stolarija izmijenjena.

## 4. Učinci radona na zdravlje

### 4.1. Karcinom pluća

#### 4.1.1. Studije rudara

Glavni epidemiološki dokazi za ulogu koju izlaganje radonu igra u uzrokovanju karcinoma pluća potječu iz velikog broja studija rudara uranija, kositra i željeza. Detalji glavnih studija sažeti su u tablici 4.1. Ukupan broj muškaraca uključen u tim studijama prelazi 60.000, s popratnim zbirom od otprilike milijun ljudskih godina. Srednja kumulativna izloženost uvelike varira između studija: od nekoliko WLM<sup>1</sup> u rudniku Radium Hill u Australiji do mrvu iznad 800 WLM u visoravi Colorado u SAD-u, s tim da je ova druga brojka moguće precijenjena. Broj opaženih karcinoma pluća u svakoj studiji je znatan - obično barem 50, a raste i na statistički signifikantnu razinu iznad očekivanja u svakom slučaju; omjer opaženih i očekivanih vrijednosti proteže se od nešto ispod 1,5 do otprilike 5. Nadalje, studije ukazuju da rizik od karcinoma pluća raste s rastom kumulativne izloženosti i uglavnom se čini da je riječ o linearnoj vezi između izloženosti i rizika. Izloženosti koje u nekim od studija donose značajno povišeni rizik, tj. između 20 i 50 WLM, samo su za 2 – 5 puta više od srednje životne izloženosti u zatvorenom prostoru dobivene u državama poput Sjedinjenih Država (BEIR IV, 1988.) i Ujedinjenog Kraljevstva te su manje od cjeloživotne izloženosti u stambenim zgradama na UK-ovoj kritičnoj razini<sup>2</sup> (tj. 75 WLM) (NRPB, 1990.).

Daljnji podupirući dokazi za uzročnost dolaze od studija na životinjama u SAD-u i Francuskoj koje pokazuju slične obrasce povećanog rizika od karcinoma pluća u štakorima i psima kronično izloženim radonu (BEIR IV, 1988.). Međunarodna agencija za istraživanje karcinoma (IARC) zaključila je da postoji dovoljna količina dokaza da se radon svrsta kao kancerogen za ljude (IARC, 1988.).

---

<sup>1</sup> *Working Level Month* (en. *mjesec radne razine*) često korištena mjerna jedinica za procjenu profesionalnog rizika izlaganju radona kao zamjena za ekvivalentnu dozu mjerenu u sievertima. Sv. Prednost je što se koncentracija može direktno mjeriti bez dodatnih pretpostavki za raspodjelu doze po tijelu. 1 WLM jednak je izlaganju od  $1,3 \cdot 10^5$  MeV potencijalne energije alfa-čestice po litri zraka u jednom radnom mjesecu, odnosno 170 radnih sati.

<sup>2</sup> Kritična razina označava koncentraciju onečišćujućih tvari u atmosferi tijekom utvrđenog vremena izloženosti, ispod kojih, prema dosadašnjim spoznajama, ne dolazi do izravnih štetnih utjecaja na ljude, biljke, ekosustave ili tvari.

**Tablica 4.1.:** Smrtnost od karcinoma pluća među rudarima izloženim radonu.

Rudnik/ci (popratni period)	Broj muškaraca	Srednji WLM	Ljudskih godina	Broj smrti od karcinoma pluća	
				Uočen	Očekivan
Visoravan Colorado, SAD (1951-82.) <sup>a</sup>	3.346	821	73.642	256	59,1
Ontario, Kanada (1955-81.) <sup>b</sup>	13.469	30		152	67,6
Beaverlodge, Kanada (1950-80.) <sup>c</sup>	8.487	13	114.170	65	34,2
Port Radium, Kanada (1950-80.) <sup>d</sup>	2.103	144	52.930	57	24,7
Zapadna Češka (1953-90.) <sup>e</sup>	4.320	219		702	138
Malmberget, Švedska (1951-76.) <sup>f</sup>	1.294	94	26.657	51	13,1
Novi Meksiko, SAD (1977-85.) <sup>g</sup>	3.469	111	59.000	68	17,0
Newfoundland, Kanada (1950-90.) <sup>h</sup>	1.744	383	42.417	139	31,1
Pokrajina Yunnan, Kina (1976-87.) <sup>i</sup>	17.143	217	175.143	981	267
Cornwall, UK (1941-86.) <sup>j</sup>	3.010	~100		105	66,6
Radium Hill, Australia (1952-87.) <sup>k</sup>	1.429	7		32	23,1
Francuska (1946-85.) <sup>l</sup>	1.785	70	44.995	45	21,1

**Izvori:**(a) (Hornung & Meinhardt, 1987.);  
(BEIR IV, 1988.)(b) (Kusiak, *et al.*, 1993.)(c) (Howe, *et al.*, 1986.)(d) (Howe, *et al.*, 1987.)(e) (Tomášek, *et al.*, 1994.)

(f) (Radford &amp; Renard, 1984.)

(g) (Samet, *et al.*, 1991.)

(h) (Morrison &amp; Villeneuve, 1995.)

(i) (Xuan, *et al.*, 1993.)

(j) (Hodgson &amp; Jones, 1990.)

(k) (Woodward, *et al.*, 1991.)(l) (Tirmarche, *et al.*, 1993.)**4.1.2. Procjene cjeloživotnog rizika uz unutrašnje izlaganje radonom**

Nekoliko je odbora pokušalo procijeniti cjeloživotni rizik za opću populaciju izloženu u unutarnjem okruženju; preciznije Međunarodna komisija za radiološku zaštitu

(ICRP, 1993.) i američki Odbor za biološke učinke ionizirajućeg zračenja (BEIR IV, 1988.). Među točkama važnim za dobivanje takve procjene su projekcije doza iz rudnika u unutarnje okruženje i projekcija rizika od popratnog perioda u studijama rudara na čitav životni vijek. Što se zadnje točke tiče, američko Nacionalno vijeće za istraživanje (NRC) zaključilo je da doza po jedinici izloženosti u domovima vjerojatno je 70-80% od one u rudnicima (NRC, 1991.), temeljem pregleda čimbenika poput karakteristika aerosola i razlika u načinu disanja. Međutim, ICRP je zaključio da ne postoji dovoljno opravdanja za prihvaćanje koeficijenta rizika za širu javnost koji se razlikuje od onog za radnike (ICRP, 1993.).

Pomoću idealiziranih osnovnih stopa koje odgovaraju svjetskoj populaciji, ICRP (1993.) izračunao je vjerojatnost smrti od karcinoma pluća zbog unutrašnjeg izlaganja radonom iznosa  $3 \cdot 10^{-4} \text{ WML}^{-1}$ . Sličnim modelom procjene rizika primijenjenim na osnovne stope karcinoma pluća u Sjedinjenim Državama (koje su više od svjetskog prosjeka), izvješće BEIR IV dalo je vjerojatnost iznosa  $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ WML}^{-1}$ . Usporedna analiza Lubina *et al.* (1994.) došla je do sličnog iznosa za unutrašnju izloženost. Premda se rezultati ovih analiza uvelike slažu, nesigurnost u niz čimbenika koji utječu na ove procjene ipak postoji.

#### **4.1.3. Faktori koji mogu utjecati na procjene rizika**

Jasno je da su saznanja o izloženostima iz studija rudara ograničene na isključivo odrasle muškarce pa se postavlja pitanje kako dobivenim rizicima iz ovih studija možemo predvidjeti rizike opće populacije koja uključuje žene i djecu. Odbor BEIR IV (1988.) pretpostavio je da je relativan rizik jednak za oba spola temeljem ideje da razliku u osnovnim stopama karcinoma pluća među spolovima možemo objasniti razlikama u pušačkim navikama čime bi multiplikativan model mogao procijeniti zajednički učinak radona i pušenja. Ovim je pristupom vjerojatnost karcinoma pluća uzrokovana radonom viša među muškarcima nego među ženama. S druge strane, ICRP (1993.) jednostavno je odlučila koristiti isti apsolutni koeficijent rizika i za muškarce i za žene, uglavnom zbog rezultata za pušenje i izloženost zračenju među preživjelima od atomskih bombi u Japanu (Kopecky, *et al.*, 1986.), ali priznala je mogućnost precjenjenosti faktora rizika kod žena. Što se posljedica izlaganja radonu u ranijoj dobi tiče, jedini dostupni rezultati su iz studije kineskih rudara kositra, neki od kojih su bili mlađi od 13 godina pri prvom izlaganju (Xuan, *et al.*, 1993.). Relativni rizici za tu skupinu nešto su viši od onih čije je prvo

izlaganje bilo nakon 20. godine života, iako valja naglasiti manjak dosljednosti u varijaciji rizika s životnom dobi.

Multiplikativan model u izvješću Odbora BEIR IV posljedično predviđa rizike od karcinoma pluća uzrokovan izlaganju radonom nekoliko redova veličina veće kod pušača nego nepušača. Od tog izvješća, nekolicina drugih radova na tu temu je objavljena. Roscoe *et al.* (1989.) proučavali su isključivo nepušače među rudarima uranija u Coloradu, čija je srednja izloženost bila 720 WLM i utvrdio približno deseterostruko povećanje rizika od karcinoma pluća, što je čak više od relativnog rizika za sveobuhvatnu skupinu pušača i nepušača. Podaci kod kineskih rudara kositra (Xuan, *et al.*, 1993.), s druge strane, predlažu model slabiji od multiplikativnog, ali jači od aditivnog. Međutim, rezultati istraživanja rudara uranija u Novom Meksiku (Samet, *et al.*, 1991.) podudaraju se s multiplikativnim modelom, kao i oni u kontrolnoj studiji kanadskih rudara u Beaverlodgeu (L'Abbé, *et al.*, 1991.), premda potonji autori upozoravaju na mal uzorak u njihovom istraživanju (46 slučaja, 95 kontrolnih). Sve u svemu, rezultati ovih istraživanja ukazuju da je zajednički učinak izlaganja radonu i pušenja na rizik od karcinoma pluća veći od aditivnog.

#### **4.1.4. Epidemiološke studije karcinoma pluća i unutrašnjeg izlaganja radonu**

Studije provedene u Švedskoj; Edling *et al.* (1984.) i Svensson *et al.* (1987.) (1989.); ukazuju na povećanje rizika od karcinoma pluća povezanog s procjenom izlaganja radonu temeljenom na tip kuće i tlo na kojem leži. U kasnijoj studiji 210 žena s karcinomom pluća u okrugu Stockholma i 410 kontrolnih u čijim domovima su također vršena mjerenja, Pershagen *et al.* (1992.) pokazali su rastući trend u riziku s kumulativnim izlaganjem radonu; za izloženost većom od 5.000 Bq m<sup>-3</sup> god. u odnosu na onu manju od 1.250 Bq m<sup>-3</sup> god., relativan rizik iznosio je 2,3. Dvije godine kasnije, velika nacionalna studija Pershagena *et al.* (1994.) u Švedskoj, promatrala je 1.360 slučaja karcinoma pluća (586 žena, 774 muškaraca) dijagnosticiranih tijekom 1980-84. i 2.847 kontrolnih (1.380 žena, 1.457 muškaraca). Radon se mjerio u gotovo 9.000 domova u kojima su subjekti živjeli od 1947. godine. Rezultati su pokazali da rizik od karcinoma pluća raste u statistički značajnoj mjeri s porastom radona, bilo da je izražena kao vremenski težinski prosjek ili kao kumulativna izloženost. Ovdje je relativan rizik iznosio 1,3 za izlaganje kroz prosječan period razmatran u studiji (32,5 godina) pri srednjoj

koncentraciji radona u rasponu od 140-400 Bq m<sup>-3</sup> i 1,8 pri koncentracijama preko 400 Bq m<sup>-3</sup>. Ovi rizici približno su se udvostručili nakon izuzimanja onih subjekata koji su spavali pored otvorenog prozora. Ove procjene rizika su u istom rasponu kao one iz studija rudara. Postoje statistički značajni podaci da zajednički učinak radona i pušenja na rizik od karcinoma pluća prelaze aditivnost te da su bliži multiplikativnom učinku.

## **4.2. Ostali karcinomi**

### **4.2.1. Dozimetrija**

Doziranje ostalih organa radonom i njegovim kćerima promatrali su Miles i Cliff (1992.). Udisani radon može se prenijeti na razne organe nakon njegovog otapanja u krvi. Koncentracija radona u organima i posljedična doza ovise o količini masti u organima, budući da je radon oko 16 puta otopljiviji u masti nego u krvi. Naveli su godišnju dozu iznosa 16 μSv na meko tkivo koje sadrži 1% masti koja proizlazi od izlaganja na 20 Bq m<sup>-3</sup> unutar domova. Ova je doza otprilike dva reda veličine manja od one koja obično proizlazi od prodornog prirodnog zračenja po godini.

Richardson *et al.* (1991.) predložili su da zbog visokog udjela masti u koštanoj srži, čak 40%, može postojati značajan rizik od leukemije uzrokovane unutrašnjem izlaganju radonu. Temeljem pretpostavke da je ta mast jednoliko raspodjeljena u srži, godišnju dozu koja proizlazi od izlaganja na 20 Bq m<sup>-3</sup> možemo izračunati na 96 μSv. No, kako mast ipak nije jednoliko raspodjeljena, veći dio doze neće zahvatiti osjetljive stanice u koštanoj srži (Miles & Cliff, 1992.). Kao posljedica toga, iznos od 96 μSv je najvjerojatnije precjena godišnje doze. Nadalje, treba napomeniti da i dalje govorimo o redu veličine manjoj od godišnje doze koja obično proizlazi od prodornog prirodnog zračenja.

U pogledu efektivne doze, godišnji iznos koji proizlazi od izlaganja na 200 – 600 Bq m<sup>-3</sup> na svjetskoj razini koji predlaže ICRP (1993.) vjerojatno ne prelazi 0,1 – 0,3 mSv što se ozračivanja koštane srži tiče, ali zato je ona dva reda veličine veća kod ozračivanja pluća. Na osnovu toga, karcinom pluća glavna je posljedica na zdravlje koja potječe od izlaganja radonu.

### **4.2.2. Epidemiološke studije**

Darby *et al.* (1995.) proveli su detaljnu zajedničku analizu ostalih karcinoma u 11 skupina radonu izloženim rudarima. Obuhvatila je 64.000 muškaraca, s prosječnim radnim stažom od 6,4 godina i srednjom izloženosti radonu iznosa 155 WLM. Opaženih

1.179 smrti od svih karcinoma osim pluća gotovo u potpunosti odgovaraju očekivanim brojkama kod nerudara u tom podneblju. Nadalje, smrtnost nije rasla s porastom cjelokupne izloženosti. Od ukupno 28 različitih kategorija karcinoma, jedino se za karcinom gušterače našao statistički značajan rastući trend s cjelokupnom izloženosti, ali autori su to pripisali pukoj slučajnosti. Uz sve navedeno, zaključili su da ovi rezultati pokazuju da visoke koncentracije radona ne predstavljaju rizik od smrtnosti zbog ostalih karcinoma.

Analiza incidencije dječje leukemije i ne-Hodgkinovog limfoma (NHL) u Velikoj Britaniji u odnosu na unutrašnje koncentracije radona, kao i unutrašnje te vanjske stope gama zračenja, gdje su podaci prikupljeni jednoliko u velikom broju po prilično malim područjima, točnije okruzima (Muirhead, *et al.*, 1991.). Sagledano po svim okruzima, nisu utvrđene značajne korelacije između incidencije dječje leukemije i razina prirodnog zračenja.



## 5. Provedba i rezultati mjerenja

### 5.1. Tehnike mjerenja radona

Prvi korak mjerenja je odluka mjeriti sam radon ili njegove kćeri. U oba slučaja, alfa i gama radioaktivnosti pojave su koje se mogu uočiti, bilo odvojeno ili skupa. Za neke kćeri, beta radioaktivnost također se može uzeti u obzir. Neke od tehnika dostupnih:

- nuklearna emulzija,
- apsorpcija,
- scintilacijske ćelije,
- tekuće scintilacijske ćelije,
- gama spektrometrija,
- beta *monitoring*,
- detektori nuklearnih tragova,
- elektrometar ili elektroskop,
- ionizacijske komore,
- detektori površinskih barijera,
- termoluminiscentni fosfor,
- kolekcija.

Van laboratorija, mjerenja koncentracije radona na terenu podrazumijeva postavljanje detektora na određeno vrijeme. Mjerenje može biti kontinuirano ili diskretno tako što se uzimaju uzorci. Može biti pasivno kada se koncentracija radona mjeri u prirodnim uvjetima ili aktivno gdje se plin usisava u ili kroz mjerni instrument.

#### 5.1.1. Pasivni uređaji

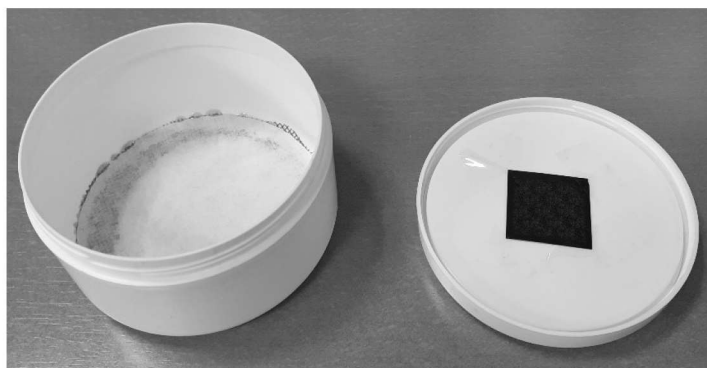
Kod direktnog mjerenja zračenja, detektor je obično postavljen unutar posude s otvorom za propuštanje radona. Posuda služi za zaštitu detektora, a opet mora obuhvatiti dovoljno velik volumen zraka kako bi u njemu nastalo što više alfa čestica i potom detektiralo u što kraćem vremenu mogućem. Najjednostavniji oblik takve posude je obična kartonska čaša okrenuta naopako (Fleischer & Mogro-Campero, 1978.). Budući da alfa-čestice iz radona i njegovog potomstva imaju domet reda veličine 5 cm u zraku, lako je shvatljivo da slobodan prostor takvog reda u posudi s detektorom osigurava maksimalnu učinkovitost.

Mjerenje koncentracije radona samo je po sebi jednostavan posao. Ipak, treba uzeti u obzir *problem* s toronom. Dva izotopa radona (radon  $^{222}\text{Rn}$  i toron  $^{220}\text{Rn}$ ) obično se javljaju zajedno, a relativan omjer njihovih količina ovisi o količinama uranija i torija prisutnom u blizini. Teoretski će se oba izotopa detektirati ukoliko se ne primijeni neki

diskriminantan mehanizam (Hambleton-Jones & Smit, 1980.). Postoje uglavnom dva rješenja ovog problema: prvi je spriječiti ulazak torona u mjerni uređaj, a drugi nekako diskriminirati između torona i radona jednom kada oba izotopa uđu u uređaj.

Pozabavit ćemo se samo s prvim načinom, s obzirom da je on korišten u ovome radu. Budući da je poluraspad torona (55,6 s) puno kraći nego od radona (3,83 d), možemo si to uzeti za korist, kao i činjenicu da oba izotopa imaju isti koeficijent difuzije u danom mediju jer je riječ o istom elementu. Shodno tome, ideja je postaviti difuzijsku barijeru na otvor posude takvu da se toronu ne omogući dovoljno vremena za prolaz kroz nju prije nego što se raspadne, a da u isto vrijeme radon stigne proći prije svog raspada. Najjednostavnija difuzijska barijera je samo određena duljina stupca zraka (Seidel & Monnin, 1982.). Pokazano je da difuzijom kroz 30 cm zraka dovoljno je da se količina torona smanji na zanemariv udio naspram početne, tako da neki mjerni uređaji nalikuju na 30 – 35 cm dugu cijev umjesto puke čaše okrenute naopako. Dno cijevi je otvoreno dok se detektor nalazi iznutra pri vrhu.

U našem slučaju, za difuzijsku barijeru koristi se tanka membrana na ulazu na dnu posude s lijeve strane slike 5.1. Membrana smanjuje veličinu uređaja i ujedno osigurava suhu atmosferu unutar volumena detekcije.



**Slika 5.1.:** Pasivni mjerni uređaj korišten u ovom radu. S lijeve strane slike je plastična posuda na čijem se dnu nalazi otvor prekriven tankom difuzijskom membranom, a s desne strane poklopac s detektorom. Posuda je tijekom mjerenja zatvorena.

U pojedinosti različitih tipova detektora, kako nemaju veze s ovim radom, nećemo ulaziti. Iz istih razloga izostavljeno je opisivanje rada aktivnih uređaja. Detektoru kakav je vidljiv na slici 5.1. posvetit ćemo poseban, idući odjeljak.

## 5.2. Detektor nuklearnih tragova

Plastični (polimerni) detektori nuklearnih tragova, SSNTD (en. *Solid State Nuclear Track Detector*), najčešća su metoda mjerenja radona danas, bilo u zatvorenom prostoru ili na terenu. Razlozi su očiti: malih su dimenzija, jednostavni za uporabu, jeftini i lako se obrađuju te iščitavaju. Oni su pasivni mjerni uređaji u smislu opisanom u prethodnom odjeljku. Premda je to svojstvo korisno u nekim pogledima, ujedno je to i glavna mana takvih uređaja: rezultati se ne mogu vidjeti uživo ili daljinski bez složene instrumentacije koja bi bila u suprotnosti sa samom svrhom odabira takvih uređaja.

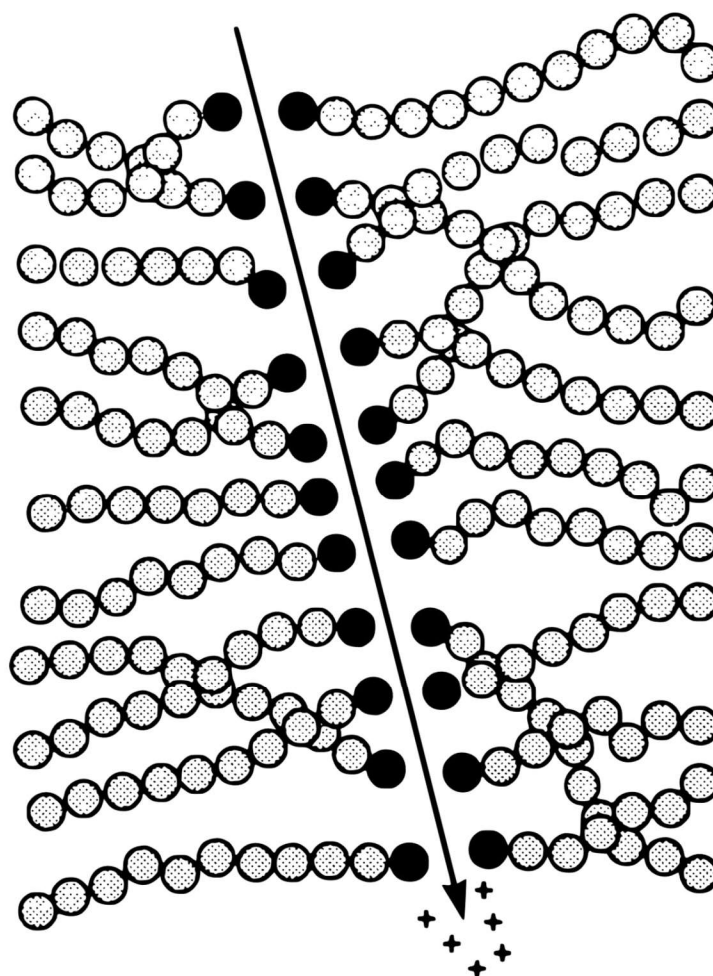
### 5.2.1. Nastajanje tragova u dielektriku

Detaljno razmatranje ove teme van je opsega ovog rada, stoga će se ovdje sažeti samo glavne značajke. Teške, nabijene čestice (od protona naviše), dakle ne i  $\beta$ -čestice niti  $\gamma$ -zrake itd., mogu ostaviti latentni kvazikontinuirani trag u dielektričnom mediju (ali ne može u većini metala ili poluvodiča) koji su relativno dugoživi pri normalnim temperaturama. Ti *latentni tragovi* mogu preživjeti čak i pri visokim temperaturama, ovisno o mediju i intenzitetu ionizacije (tj. linearne gustoće razmještenih elektrona): što je potonje više, to je trag stabilniji (ili temperaturno otporniji). Latentni tragovi mogu se vidjeti isključivo transmisivskom elektronskom mikroskopijom, budući da su široki svega nekih desetak nm, no jetkanjem se mogu proširiti u optički zamjetne veličine, što će biti objašnjeno uskoro.

Polimerne plastike najosjetljivije su od svih poznatih detektora nuklearnih tragova, kako mogu uhvatiti niskonabijene čestice sve do protona, što vrijedi za polimer tipa CR-39 kao i za mnoge nitroceluloze. Alfa-čestice mogu uhvatiti sve nitroceluloze, tako i LR 115 tipa II korišten u ovom radu. Kako je ranije navedeno, nijedan od poznatih polimera ne može uhvatiti  $\beta$ -čestice.

S obzirom da nećemo ulaziti u dubinu, sažeto, opće prihvaćeno shvaćanje nastajanja tragova u polimerima je da prolaz teško nabijenih čestica vodi do cijepanja nekih od polimernih lanaca (slika 5.2.). To također proizvodi veoma reaktivne molekularne vrste poput slobodnih radikala koji mogu biti prilično dugovječni. Kada se plastika potom tretira odgovarajućom otopinom za jetkanje (npr. alkalnim hidroksidima, poput vodene otopine NaOH ili KOH), površina rascjepa se nagriza i proširi za faktor reda veličine  $10^2 - 10^3$ . Trag zbog toga postane kvazikontinuiran i tako biva trajno urezan u polimer, termički otporan, za razliku od latentnih tragova koji se mogu izbrisati

primjenom topline. Njihovim jetkanjem, tragovi su uvećani na optičke veličine koji se onda mogu uočiti optičkim mikroskopom.

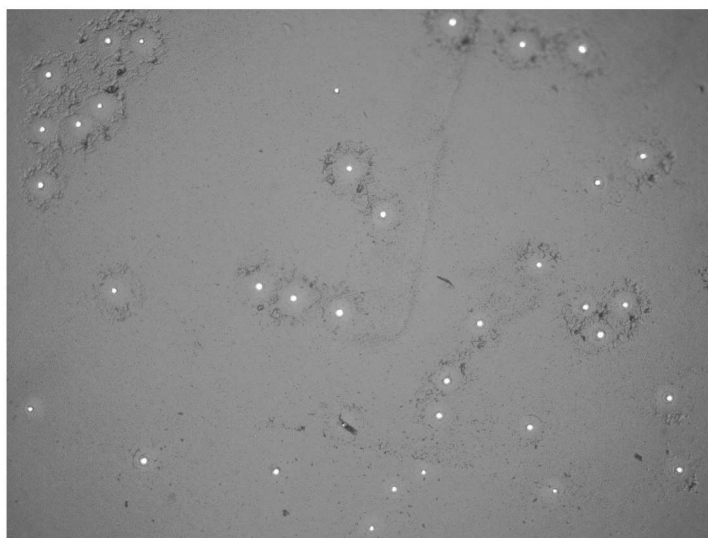


**Slika 5.2.:** Shematski prikaz lančanog rascjepa u polimerima uzrokovanim prolaskom teško nabijenih čestica. Toplinski skok duž putanje nabijene čestice uzrokuje lokalizirano taljenje, a ono, zajedno s uzbuđenjem zbog ionizacije, vodi do pucanja lanca i nastankom njegovih novih krajeva. U rascjepu ostaju kemijski reaktivna mjesta koja se mogu uvećati kada tijekom jetkanja NaOH uđe u oštećeno područje i nagriza ga. Slika iz (Durrani & Ilić, 1997.).

### 5.2.2. Brojanje tragova optičkim mikroskopom

Pri mjerenju radona, glavni uvjet općenito je samo prebrojati jetkane tragove na detektoru na takav način da vrijednosti budu statistički pouzdane. Obično su potrebne samo relativne (umjesto apsolutnih) vrijednosti, a gustoće tragova rijetko su toliko velike da bi njihovo preklapanje predstavljalo problem. Veličine i oblici jetkanih rupica će varirati:  $\alpha$ -čestice koje upadaju okomito ostavljat će kružne rupice, dok će većina jetkanih

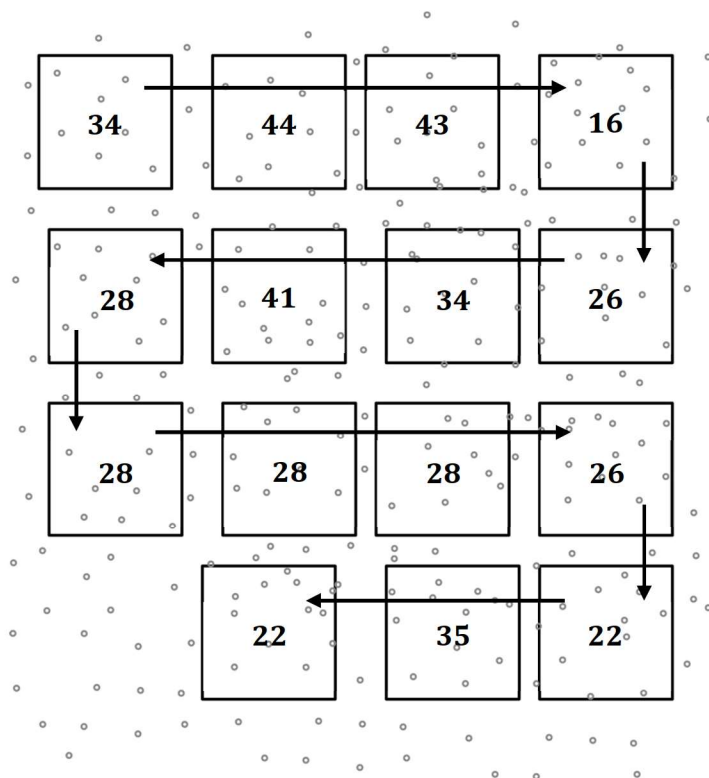
rupica biti eliptične zbog daleko češćih upada  $\alpha$ -čestica pod nekim oštrim kutom u odnosu na normalu površine detektora, s tim da taj kut ne može biti tuplji od kritičnog kuta  $\theta_c$ . Uz to, kako  $\alpha$ -čestica može poteći iz bilo koje točke izvora u zraku sve do punog dometa  $\alpha$ -čestice u zraku (tj. od 0 do recimo  $\sim 4$  cm od detektora), promjer rupice koju ona ostavi kretat će se od  $\sim 0$  (ili, strogo govoreći,  $\approx 0,3 \mu\text{m}$ , što je praktična granica rezolucije optičkog mikroskopa) sve do nekoliko  $\mu\text{m}$ , ovisno o postupku jetkanja. Prilikom prebrojavanja tragova, važno je razlikovati jetkane nuklearne tragove od pozadinskih defekata uvijek prisutnih na površini plastičnog detektora koji se također povećaju uslijed jetkanja. Kako izgleda detektor pod mikroskopom prikazano je na slici 5.3. ispod.



**Slika 5.3.:** Dio jetkanog polimernog detektora LR 115 tipa II, korištenog prilikom mjerenja za potrebe ovog rada, pod optičkim uvećanjem od 40 puta.

Postupak kojim prebrojavamo tragove je jednostavan. Krećemo od jednog ruba detektora tako da sva njegova površina upada u vidno polje mikroskopa i u njemu prebrojavamo tragove. Zatim, u pogodnom smjeru, pomičemo vidno polje duž jedne od osi, npr. udesno, sve dok ne obuhvatimo novi kvadrant, odnosno vidno polje takvo da u njemu nema niti jednog traga iz prethodnog kvadranta pa u njemu također prebrojavamo tragove. Postupak se ponavlja sve dok ne ponestane mjesta za novi kvadrant. Pri nailasku na, u ovom slučaju desni, rub detektora, sada vidno polje pomičemo duž druge osi, recimo prema dolje, također sve dok ne obuhvatimo novi kvadrant. Sada možemo zamisliti da smo u novom retku pa ćemo za iduće kvadrante pomicati se duž prve osi, dakle nazad

ulijevo. Obrazac kojim se prebrojavaju tragovi u kvadrantima bi trebao biti jasan. Prilikom pomaka iz jednog kvadranta u drugi smiju se preskočiti tragovi, bitno je samo da se izbjegne višestruko prebrojavanje istog traga. Postupak je vizualno dočaran na slici 5.4. u kojem su ujedno uneseni brojevi za jedan od detektora korištenih prilikom mjerenja za potrebe ovoga rada.



**Slika 5.4.:** Postupak brojanja tragova na polimernom detektoru optičkim mikroskopom.

Kao što je običaj kod nuklearnih događaja, gdje od velikog broja dostupnih atoma samo neki imaju opazivu reakciju, Poissonova statistika primjenjuje se kod prebrojavanja tragova. U toj statistici, grešku određuje kvadratni korijen događaja koje smo prebrojali! Toliko jednostavna, a opet ne može se dovoljno naglasiti koliko je važna jer je to stvar koja je često previđena: grešku određuju stvarni događaji koji su mjereni, a ne nekakva izračunata frekvencija ili gustoća. Na primjer, ako izbrojimo samo 400 tragova, greška standardne devijacije je 5% ( $\sqrt{400}/400 = 0,05$ ). Zato pri prebrojavanju tragova optičkim mikroskopom nije nužno izbrojati sve tragove na detektoru već samo onoliko s kolikom smo greškom zadovoljni. U slučaju prebrojavanja detektora na slici 5.4., ukupan prebrojeni broj tragova na 15 kvadranta iznosi  $N = 455$ . Znajući da je površina vidnog

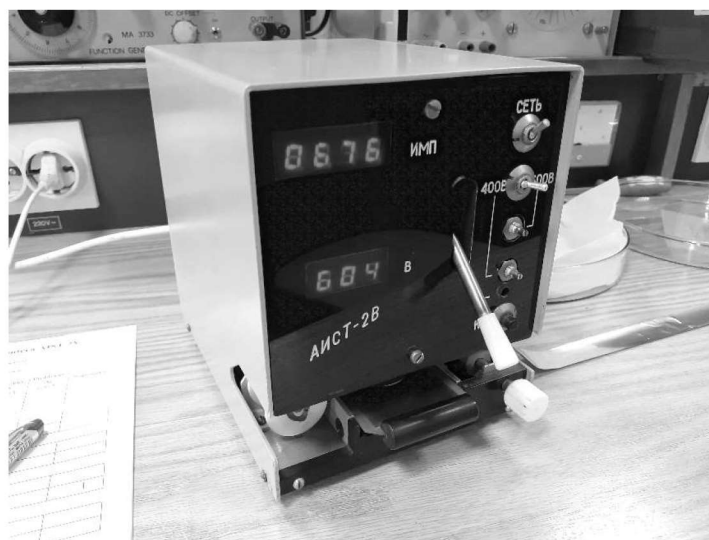
polja, odnosno kvadranta korištenog mikroskopa pri uvećanju 40 puta – veličine  $6,125625 \text{ mm}^2$ , možemo izračunati gustoću tragova jednostavnim izrazom

$$\rho = \frac{N \pm \sqrt{N}}{A} = \frac{455 \pm \sqrt{455}}{15 \cdot 6,125625 \cdot 10^{-3}} = 495 \pm 24,2 \text{ (tragova cm}^{-2}\text{)}$$

ili  $495 \pm 4,69\%$  tragova  $\text{cm}^{-2}$ .

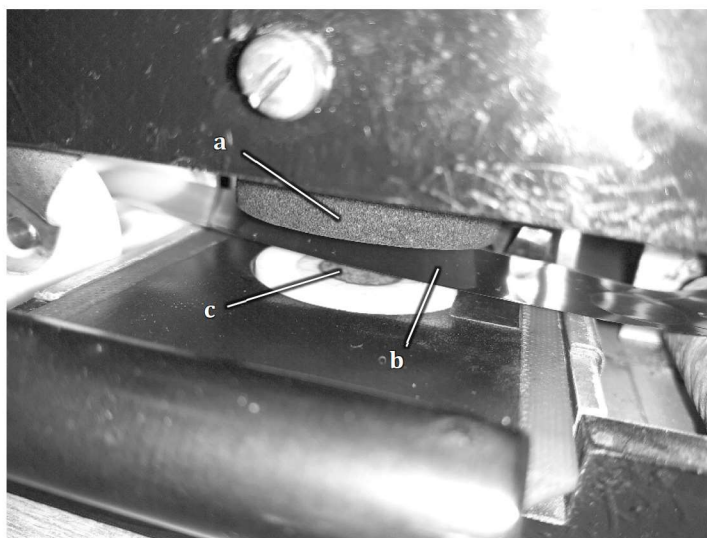
### 5.2.3. Brojanje tragova brojačem iskri

Ova tehnika brojanja tragova, za razliku od prethodne, je poluautomatska, ali može se koristiti isključivo za relativno male ( $\leq 10^3 \text{ cm}^{-2}$ ) gustoće tragova. Tehniku su izumili Cross i Tommasino (1970.). Tanki film ( $\approx 12 \mu\text{m}$ ) nitroceluloznog detektora LR 115 tipa II, ozračen  $\alpha$ -česticama (ili teškim ionima/fizijskim fragmentima) prvo se jetka kako bi se proširile rupice koje su nabijene čestice napravile. Zatim se vrši prediskrenje kako bi probili rupice koje prvotno nisu bile dovoljno izjetkane tako što primijenimo električno polje jakosti  $500 \text{ V cm}^{-1}$  ( $600 \text{ V}$  kroz film debljine  $12 \mu\text{m}$ ). Potom može uslijediti brojanje tragova brojačem iskri (slika 5.5.) tako što stavimo plastični film premazan aluminijskom folijom - Mylar® na vrh jetkanog filma i primijenimo električno polje ( $400 \text{ V}$  kroz  $12 \mu\text{m}$   $\Rightarrow 333 \text{ kV cm}^{-1}$ ).



**Slika 5.5.:** Brojač iskri АИСТ-2В (ru. АИСТ-2В) korišten pri mjerjenju. Gornji ekran prikazuje broj mjerjenja, a donji napon kroz detektorski film. S desne strane prožet je Mylarov film koji se koristi za mjerjenje. Ručkom se prislanja elektroda na film.

Aluminijski premaz, koji je s gornje strane u dodiru s detektorskim filmom prilikom mjerenja (slika 5.6.), čini gornju elektrodu kondenzatora. Donju elektrodu čini metalni nosač prstena s detektorskim filmom kao dielektrikom. Mjesta na kojima se nalaze rupice (tragovi) na detektorskom filmu predstavljaju kratki spoj za kondenzator i dolazi do preskoka iskre s jedne elektrode na drugu. Time električna struja spaljuje aluminiij direktno iznad rupice u detektorskom filmu tako da iskra ne može dva puta proći kroz istu rupicu. Tako iskra nasumično preskače rupicu po rupicu dok brojač automatski broji te preskoke. Učinkovitost ovakvog prebrojavanja obično je  $\sim 95\% \pm 5\%$  u odnosu na optičko prebrojavanje. Na Mylarovom filmu ostaje okom vidljiva preslika prebrojanih rupica.



**Slika 5.6.:** Gornja elektroda (a) ručkom vidljivoj na slici 5.5. prislanja se preko Mylarova filma (b) na detektorski film (c) i tako s dnom brojača ispod čini kondenzator. Primjenom istosmjerne struje regulirane RC spojem, rupice u detektorskom filmu čine kratak spoj između elektroda tog kondenzatora, čime dolazi do preskoka, odnosno iskrenja koje brojač bilježi.

## 5.3. Provedba mjerenja

### 5.3.1. Postavljanje i skidanje detektora

Pasivni mjerni uređaji s detektorom, jedan od kojih je prikazan na slici 5.1., postavljeni su 28. listopada 2020. u otprilike 10 sati i 30 minuta u 14 prostorija Odjela za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i 12 prostorija Odjela za matematiku istog sveučilišta – u istoj zgradi. Detektori su ciljano postavljeni u prostorije tako se one što više podudaraju s prostorijama iz ranije (2014. godine) provedbe mjerenja



koncentracije radona u sklopu sveučilišnog projekta (Stanić, *et al.*, 2015.). Ta podudarnost prostorija novih detektora u odnosu na stare na Odjelu za fiziku iznosi 71,4%, a na Odjelu za matematiku 91,7%. Odabir prostorija bio je takav da se detektorima ravnomjerno obuhvati cijeli tlocrt zgrade te da budu postavljeni u prostorijama u kojima se boravi (učionice, uredi, knjižnica). Unutar prostorija, detektori su postavljeni na ormare i police ( $\approx 2$  m visine) tako da je otvor s difuzijskom membranom usmjeren prema gore, a razlog zašto baš na ta mjesta jest taj da se smanji mogućnost nepoželjnog diranja i pomicanja, kao i da se obuhvati prostor gdje je zrak unutar prostorije potencijalno najstabilniji. Zbog toga su izbjegavana mjesta u blizini prozora, vrata, kao i ispod klima uređaja.

Gotovo punih 187 dana kasnije, 3. svibnja 2021. u 9 sati i 30 minuta, postavljeni detektori prikupljeni su sa svojih položaja na obradu. Polimerni filmovi ukolnjeni su iz posuda i stavljeni u dobro oprane prstenove (slika 5.7.), koji se poput žetona umeću u brojač iskri prilikom brojanja, višak čiji je oprezno odrezan.



**Slika 5.7.:** Neodrezani detektorski film LR 115 tipa II na prstenu za brojanje koji ima rupicu slijeva kako bi se mogao ovjesiti o stalak za pranje, jetkanje i sušenje.

Prstenovi s filmovima vješaju se o stalak za jetkanje, skup s dva prstena s nultim filmovima koji su rezani tri dana ranije, 30. travnja 2021., u međuvremenu čuvanim u hladnjaku umotani u aluminijsku foliju – oni služe za određivanje pozadinskog zračenja radona. Treba paziti da se prstenovi međusobno ne dodiruju radi tada moguće loše kemijske obrade, stoga se odvajaju malim plastičnim razdvojnica.

### 5.3.2. Jetkanje

Stalak s prstenovima uranja se u destiliranu vodu na 20 minuta kako bi se isprali i tako pripremili za jetkanje. Zatim se izranja van i stavlja u posudu s 10%-tnom vodenom otopinom natrijeva hidroksida (NaOH) prethodno zagrijanu na 50°C unutar grijanog kalorimetra, kako je vidljivo na slici 5.8. Vrijeme jetkanja je 150 minuta, tijekom kojeg treba redovito provjeravati temperaturu koja treba biti što stabilnija. Nipošto se ne smije otopina miješati kako ono može utjecati na sam proces jetkanja tragova u filmu. Po isteku vremena jetkanja, stalak se vadi van, cijedi i ponovo uranja u destiliranu vodu na završno pranje u trajanju od 20 minuta, uz povremeno izranjanje i uranjanje stalka. Poslije pranja stalak s filmovima ostavlja se sušiti na barem 24 sata u laboratoriju.



**Slika 5.8.:** Uranjanje stalka s filmovima u posudu s vodenom otopinom NaOH unutar kalorimetra. Za vrijeme jetkanja, kalorimetar je poklopljen radi što stabilnije temperature unutar njega.

### 5.3.3. Brojanje

Četiri dana nakon jetkanja, 7. svibnja 2021., brojačem iskri AIST-2V mjereni su tragovi na detektorskim filmovima, kako je opisano u odjeljku 5.2.3., s tim da je jedan film zbog oštećenja morao biti izmjeran optički na način kakav je opisan u odjeljku 5.2.2. Tragovi na svakom od filmova brojanih na brojaču iskri prebrojani su pet puta.

### 5.4. Obrada podataka

Slično odjeljku 5.2.2., gustoću tragova na filmovima prebrojanim brojačem iskri računamo izrazom

$$\rho = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{M},$$

gdje su  $A$  površina brojano područja filma unutar prstena iznosa  $1,06 \text{ cm}^2$ ,  $N_i$  redni broj prebrojavanja, a  $M = 5$  ukupan broj prebrojavanja filma.

Grešku računamo kao

$$\sigma_\rho = \frac{1}{A} \sqrt{\sum_{i=1}^M \frac{N_i}{M}}.$$

Gustoću tragova na nultim filmovima i pripadajuće greške računamo na isti način, samo ih označavamo s  $\rho_0$  i  $\sigma_{\rho_0}$ .

Koncentraciju aktivnosti radona računamo izrazom

$$c = k \frac{\Delta\rho}{\Delta t},$$

gdje su  $k = 65 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3} \text{ tr.}^{-1} \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$  koeficijent osjetljivosti,  $\Delta t = t_k - t_p$  vrijeme izloženosti filma radonu ( $t_k$  je vrijeme završetka mjerenja, a  $t_p$  vrijeme početka) i  $\Delta\rho = \rho - \rho_0$ . Lako se vidi da je mjerna jedinica koncentracije aktivnosti  $\text{Bq m}^{-3}$ .

Račun pogreške izmjerene koncentracije radona dan je izrazom

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\Delta t} \cdot (\sigma_k)^2 + \left(\frac{k}{\Delta t} \cdot \sigma_\rho\right)^2 + \left(\frac{k}{\Delta t} \cdot \sigma_{\rho_0}\right)^2}.$$

## 5.5. Rezultati mjerenja

Svih 26 postavljenih detektora uspješno je obrađeno. Usporedba novoizračunatih vrijednosti koncentracija radona po prostorijama Odjela za fiziku i Odjela za matematiku iz razdoblja od 28. listopada 2020. do 3. svibnja 2021. s onima iz razdoblja od 20. prosinca 2013. do 22. prosinca 2014. prikazana je u tablici 5.1.

**Tablica 5.1.:** Vrijednosti koncentracije radona u prostorijama Odjela za fiziku i Odjela za matematiku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku. (U stupcu položaja, -P- predstavlja prizemlje, a -I- prvi kat.)

Položaj (odjel-kat- prostorija)	$c_{2014.}^*$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$\sigma_{c, 2014.}^*$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$c_{2021.}$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$\sigma_{c, 2021.}$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$\frac{c_{2021.}}{c_{2014.}}$
fiz-P-lab	164	58	257	91	1,6
fiz-P-rač	/	/	175	63	/
fiz-I-39	20	7	184	66	9,2
fiz-I-41	31	11	130	47	4,2
fiz-I-42	12	5	71	26	5,9
fiz-I-45	/	/	91	33	/
fiz-I-52	68	24	157	56	2,3
fiz-I-53	47	17	164	59	3,5
fiz-I-56	/	/	88	32	/
fiz-I-57	30	11	117	42	3,9
fiz-I-58	24	9	119	42	5,0
fiz-I-64	/	/	121	43	/
fiz-I-67	10	4	146	52	14,6
fiz-I-68	33	12	178	63	5,4
mat-P-knjiž	46	17	<b>458</b>	163	10
mat-P-ref	59	21	130	46	2,2
mat-P-Ferd	177	63	<b>629</b>	223	3,55
mat-P-8	30	11	126	45	4,2
mat-P-14	147	52	<b>328</b>	116	2,23
mat-P-21	82	29	252	90	3,1

mat-P-30	122	44	100	36	0,8
mat-I-10	74	26	216	77	2,9
mat-I-11	45	16	<b>329</b>	117	7,4
mat-I-14	58	21	<b>299</b>	106	5,2
mat-I-31	76	27	172	61	2,3
mat-I-36	52	19	108	39	2,1

\* (Stanić, *et al.*, 2015.)

Usporedbom rezultata mjerenja koncentracije radona u prostorijama Odjela za fiziku i Odjela za matematiku, prije (2014.) i nakon projekta poboljšanja energetske učinkovitosti (2021.), može se uočiti porast koncentracije radona u gotovo svim prostorijama. U prostoriji 67 na Odjelu za fiziku, taj porast je gotovo 15 puta (14,6). Koncentracija radona mjerena 2014. godine u toj prostoriji iznosila je svega 10 Bq m<sup>-3</sup>. Ta je vrijednost odgovara koncentraciji radona na otvorenom što upućuje na to da su stari drveni prozori, koji su tada bili postavljeni, jako slabo brtvili i omogućavali nesmetanu izmjenu zraka između prostorije i okoline. Premda je faktor povećanja koncentracije radona za prostoriju 67 relativno velik, ipak koncentracija radona s novim PVC prozorima ne prelazi 300 Bq m<sup>-3</sup>, što je vrijednost nakon koje se preporuča poduzimanje mjera za smanjenje (remedijaciju) koncentracije radona u prostorijama (DZRNS, 2018.). Pogledamo li tablicu 5.1, na Odjelu za fiziku niti u jednoj prostoriji koncentracija radona ne prelazi 300 Bq m<sup>-3</sup>, dok na Odjelu za matematiku nalazimo pet prostorija s povišenom vrijednosti koncentracije radona. Ti iznosi su u tablici 5.1 podebljani. Radi se o tri prostorije u prizemlju i dvije na katu. Zbog povećane vrijednosti koncentracije radona u tim prostorijama, preporuča se daljnje praćenje koncentracije radona i češće provjetravanje prostorija za vrijeme boravka ljudi u istima.

Usporedba srednjih vrijednosti koncentracija radona na Odjelu za fiziku i Odjelu za matematiku za ista razdoblja prikazana je u tablici 5.2. ispod.

**Tablica 5.2.:** Srednje vrijednosti koncentracije radona na Odjelu za fiziku i Odjelu za matematiku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku.

Odjel	Broj detektora	$c$ (Bq m <sup>-3</sup> )	$\sigma_c$ (Bq m <sup>-3</sup> )	min. – max. (Bq m <sup>-3</sup> )
za fiziku (2013-14.)*	10	44	16	10 – 164
za matematiku (2013-14.)*	12	81	29	30 – 177
za fiziku (2020-21.)	14	143	51	71 – 257
za matematiku (2020-21.)	12	263	94	100 – 629

\* (Stanić, *et al.*, 2015.)

Srednje koncentracije radona po katovima izgledaju ovako: na prizemlju Odjela za fiziku, srednja koncentracija radona iznosi  $(216 \pm 77)_2$  Bq m<sup>-3</sup>, a na katu  $(131 \pm 47)_{12}$  Bq m<sup>-3</sup>. Na prizemlju Odjela za matematiku, srednja vrijednost koncentracije radona iznosi  $(226 \pm 81)_5$  Bq m<sup>-3</sup>, dok je na katu  $(289 \pm 103)_7$  Bq m<sup>-3</sup>.

Izmjerene srednje vrijednosti koncentracije radona na Odjelu za fiziku u razdoblju od 28. listopada 2020. do 3. svibnja 2021. 3,25 puta su veće u odnosu na onih izmjerenih u razdoblju od 20. prosinca 2013. do 22. prosinca 2014. U slučaju Odjela za matematiku, nove srednje vrijednosti koncentracije radona također su 3,25 puta veće u odnosu na stare. Premda su srednje vrijednosti koncentracije radona ispod preporučenog iznosa od 300 Bq m<sup>-3</sup>, zbog uočene povišene koncentracije radona u pojedinim prostorijama Odjela za matematiku preporučuje se daljnje praćenje stanja u tim prostorijama.

## 6. Zaključak

Povećanje srednje vrijednosti koncentracije radona u prostorijama s novom PVC stolarijom veće od trostruke u odnosu na staru drvenu u skladu je s očekivanjima iz odlomka 3.8. Nova mjerenja vršena su većim dijelom u zimskom razdoblju, dok su stara mjerenja (Stanić, *et al.*, 2015.) vršena cijele godine. Dakle, i u zimskom, kada su prozori uglavnom zatvoreni, kao i u ljetnom kada su prozori uglavnom otvoreni. Manjak ljetnog razdoblja kod novih mjerenja, što smanjuje prozračnost mjerenih prostorija, lako vjerojatno doprinosi povećanim koncentracijama. Uz to, odluka o održavanju nastave na Odjelima za fiziku i matematiku na daljinu tijekom prosinca 2020. i siječnja 2021. godine, usred pandemije koronavirusa uzrokovane sojem SARS-CoV-2, što je zbog nekorištenja mjerenih prostorija dodatno smanjilo miješanje zraka i time olakšala nakupljanje radona, također može objasniti dio ovog povećanja.

Unatoč gore navedenim i jasno malom uzorku (samo jedna zgrada je promatrana), znatno povećanje (od 1,57 do čak 15 puta) u odnosu na stare koncentracije, izuzevši samo jedne prostorije gdje je nova koncentracija radona bila manja od stare, motiv je za daljnja istraživanja povezanosti između energetske obnove građevina i koncentracije radona u njima koje kao rezultat tih obnova potencijalno rastu i time povećavaju mogućnost obolijevanja od karcinoma pluća. Stoga bi bilo dobro preporučiti mjerenje koncentracije radona nakon svake energetske obnove građevine (toplinska izolacija fasade, zamjena stolarije) radi utvrđivanja porasta koncentracije radona i eventualne potrebe za njegovom remedijacijom.

## 7. Literatura

- Åkerblom, G., 1994. Radon in water. *Environment and Health* (šv.), izdanje 3., str. 30.-35.
- Asikainen, M. & Kahlos, H., 1980. Natural radioactivity of drinking water in Finland. *Health Phys.*, izdanje 39., str. 77.-83.
- BEIR IV, 1988. *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters*, Washington DC: NAS/NRC, National Academy Press.
- Cook, G. A., 1961. Argon, Helium, and the Rare Gases. *Interscience, New York*.
- Cross, W. G. & Tommasino, L., 1970.. A rapid technique for nuclear particle damage tracks in thin foils. *Radiat. Effects*, izdanje 5., str. 85.-89..
- Darby, S. C. *et al.*, 1995.. Radon and cancers other than lung cancer in underground miners: A collaborative analysis of 11 studies. *J. Natl. Cancer Inst.*, Issue 87., str. 378.-384.
- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I. & Miachkin, V. I., 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pre Appl. Geophys.*, izdanje 117., str. 1025.-1044.
- Durrani, S. A. & Ilić, R., 1997. *Radon measurements by etched track detectors*. ISBN: 9810226667. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- DZRNS, Državni zavod za radiološku i nuklearnu sigurnost. Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja NN 38/18, članak 15. i 16. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018\\_04\\_38\\_739.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2018_04_38_739.html)
- Edling, C., Kling, H. & Axelson, O., 1984. Radon in homes - a possible cause of lung cancer.. *Scand. J. Work Environ. Hlth.*, izdanje 10., str. 25.-34.
- Fleischer, R. L., 1980. Isotopic disequilibrium of uranium: Alpha-recoil damage and preferential solution effects. *Science*, izdanje 207., str. 979.-981.
- Fleischer, R. L., 1981. Dislocation model for radon response to distant earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, izdanje 8., str. 477.-480.
- Fleischer, R. L., 1982. Alpha recoil damage and solution effects in minerals: Isotopic disequilibrium and radon release. *Geochim. Cosmochim. Acta*, izdanje 52., str. 2191.-2201.
- Fleischer, R. L., 1988. Alpha recoil damage: relation to isotopic disequilibrium and leaching of radionuclides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, izdanje 52., str. 1459.-1466.
- Fleischer, R. L. & Mogro-Campero, A., 1978. Mapping of integrated radon; emanation for detection of long distance migration of gases within the earth: Techniques and principles. *J. Geophys. Res.*, B-7(83), str. 3539.-3549.
- Fleischer, R. L., Price, P. B. & Walker, R. M., 1975. Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. *Univ. of California Press, Berkley*.
- Fleischer, R. L. & Turner, L. G., 1984. Correlations of radon and carbon isotopic measurements with petroleum and natural gas at Cement, Oklahoma. *Geophysics*, izdanje 49., str. 810.-817.
- Hambleton-Jones, B. B. & Smit, M. C. B., 1980. *ROAC - A New Dimension in Radon Prospecting*, Pretoria: Atomic Energy Board.
- Heller, H. & Poulheim, K. F., 1992. Die Exposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Wohnungen in der Bundesrepublik Deutschland und deren Bewertung. *Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 19, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart* (njem.).



- Hodgson, J. T. & Jones, R. D., 1990. Mortality of a cohort of tin miners. *Br. J. Indust. Med.*, izdanje 47., str. 665.-676.
- Hornung, R. W. & Meinhardt, T. J., 1987. Quantitative risk assessment of lung cancer in US uranium miners. *Health Phys.*, izdanje 52., str. 417.-430.
- Howe, G. R. *et al.*, 1986. Lung cancer mortality (1950-80) in relation to radon daughter exposure in a cohort of workers at the Eldorado Beaverlodge uranium mine. *J. Natl. Cancer Inst.*, izdanje 77., str. 357.-362.
- Howe, G. R. *et al.*, 1987. Lung cancer mortality (1950-80) in relation to radon daughter exposure in a cohort of workers at the Eldorado Port Radium uranium mine: Possible modification of risk by exposure rate. *J. Natl. Cancer Inst.*, izdanje 79., str. 1255.-1260.
- IARC, 1988.. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Lyon: svezak 43.: Man-made mineral fibres and radon.
- ICRP, 1993. Protection against Rn-222 at home and at work. *ICRP Publication 65, Ann. ICRP*, 2(23).
- Jönsson, G., 1987. Indoor radon gas and its detection with Kodak plastic film. *Nucl. Tracks. Radiat. Meas.*, izdanje 13., str. 85.-91.
- Jönsson, G., 1988. Indoor Rn-222 measurements in Sweden with the solid-state nuclear track detector technique. *Health Phys.*, izdanje 54., str. 271.-281.
- Jönsson, G., 1992. About Radon - where, when and how? *Studentlitteratur Publ. Comp., Lund (šv.)*, str. 1.-112.
- Junge, C. E., 1963. Air Chemistry and Radioactivity. *Academic Press, New York*.
- Kigoshi, K., 1971. Alpha-recoil Th-234: Dissolution into water and the U-234/U-238 disequilibrium in nature. *Science*, izdanje 173., str. 47.-48.
- Kopecky, K. J., E. Nakashima, T. Y. & Kato, H., 1986. *Lung cancer, radiation and smoking among A-bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki*. Hiroshima: Radiation Effects Research Foundation.
- Kulich, J., Möre, H. & Swedjemark, G. A., 1985. *Radon and Radium in Household Water*, s.l.: Swedish Radiation Protection Institute, SSI-Report 88-11 (šv.).
- Kusiak, R. A., Ritchie, A. C., Muller, J. & Springer, J., 1993. Mortality from lung cancer in Ontario uranium miners. *Br. J. Ind. Med.*, izdanje 50., str. 920.-928.
- L'Abbé, K. A. *et al.*, 1991. Radon exposure, cigarette smoking, and other mining experience in the Beaverlodge uranium miners cohort. *Health Phys.*, izdanje 60., str. 489.-495.
- Lide, D. R., 1993. *Handbook of Chemistry and Physics*. 74. ur. Florida: CRC Press.
- Malov, A. & Pokrovsky, O. S., 2011. Uranium in Sedimentary Basins: Migration and Concentration. *Minerals* (ISSN 2075-163X), 17. siječnja.
- Miles, J. C. H. & Cliff, K. D., 1992. Dose to lung and other organs from radon and thoron as a function of age. *Radiat. Prot. Dosim.*, izdanje 41., str. 251.-253.
- Mogro-Campero, A. & Fleischer, R. L., 1977. Subterrestrial fluid convection: A hypothesis for long-distance migration of radon within the earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, izdanje 34., str. 321-325.
- Morrison, H. I. & Villeneuve, P. J., 1995. *Radon Progeny Exposure and Lung Cancer Risk: Analyses of a Cohort of Newfoundland Fluorspar Miners*, Ottawa: Atomic Energy Control Board, AECB INFO-0570.
- Muirhead, C. R., Butland, B. K., Green, B. M. R. & Draper, G. J., 1991. Childhood leukaemia and natural radiation. *Lancet*, izdanje 337., str. 503.-504.

- NRC, 1991. *Comparative Dosimetry of Radon in Mines and Homes*, Washington Dc: National Academy Press.
- NRPB, 1990. *Human exposure to radon in homes: Recommendation for the practical application of the Board's statement*, str. 17.-32., s.l.: Doc. NRPB 1.
- Oreszczyn, T., D. Mumovic, I. R. & Davies, M., 2005. The Reduction in Air Infiltration due to Window Replacement in UK Dwellings: Results of a Field Study and Telephone Survey. *International Journal of Ventilation*, 29. ožujka, 4(1), str. 71.-77.
- Pershagen, G. *et al.*, 1994. Residential radon exposure and lung cancer in Sweden. *New Engl. J. Med.*, izdanje 330., str. 159.-164.
- Pershagen, G. *et al.*, 1992. Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women. *Health Phys.*, izdanje 63., str. 179.-186.
- Radford, E. P. & Renard, K. G. S. C., 1984. Lung cancer in Swedish iron ore miners exposed to low doses of radon daughters. *New Engl. J. Med.*, izdanje 310., str. 1485.-1494.
- Richardson, R. B., Eatough, J. P. & Henshaw, D. L., 1991. Dose to red bone marrow from natural radon and thoron exposure. *Br. J. Radiol.*, izdanje 64., str. 608.-624.
- Roscoe, R. J. *et al.*, 1989. Lung cancer mortality among non-smoking uranium miners exposed to radon daughters. *J. Amer. Med. Assoc.*, izdanje 262., str. 629.-633.
- Rutherford, E. & Soddy, F., 1902. Condensation of radioactive emanations. *Phil. Mag.*, izdanje 5., str. 561.-576.
- Samet, J. M. *et al.*, 1991. Lung cancer mortality and exposure to radon progeny in a cohort of New Mexico underground uranium miners. *Health Phys.*, izdanje 61., str. 745.-752.
- Scheidegger, A. E., 1960. *The Physics of Flow Through Porous Media*. Univ. of Toronto Press.
- Seidel, J. L. & Monnin, M., 1982. *Some Radon activity measurements of geophysical significance*, Bristol: Pergamon Press, Oxford.
- Sethi, T. K., El-Ghamry, M. N. & Kloecker, G. H., 2012. Radon and Lung Cancer. *Clinical Advances in Hematology & Oncology*, 10(3), str. 157.
- Silker, W. B. & Kalkwarf, D. R., 1983. *Radon diffusion in candidate soils for covering uranium mill tailings*, s.l.: US Nucl. Reg. Commission report NUREG/CR-2924, PNL-4434, str. 49.
- Stanić, D. *et al.*, 2015. "Measurement of radon at University of Osijek and colleges of applied sciences in Slavonija region" in *Proceedings of the 10th Symposium of the CRPA*. Zagreb, Croatian Radiation Protection Association.
- Stranden, E., Kolstad, A. K. & B, L., 1984. Radon exhalation: Moisture and temperature dependence. *Health Phys.*, izdanje 47., str. 480.-484.
- Svensson, C., Eklund, G. & Pershagen, G., 1987. A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon. *Health Phys.*, izdanje 65., str. 234.-251.
- Svensson, C., Pershagen, G. & Klominck, J., 1989. Lung cancer in women and type of dwelling in relation to radon exposure. *Cancer Research*, izdanje 49., str. 1861.-1865.
- Swedish radon commission, 1983. *Radon in Dwellings*, s.l.: SOU 1983:6 (šv.).
- Tanner, A. B., 1964. Radon mitigation in the ground, a review. *Natural Radiation Environment (ur. J. A. S. Adams i W. M. Lowder)*, University of Chicago Press, str. 161.-190.
- Tirmarche, M. *et al.*, 1993. Mortality of a cohort of French uranium miners exposed to relatively low radon concentrations. *Br. J. Cancer*, izdanje 67., str. 1090.-1097.

Tomášek, L. *et al.*, 1994. Patterns of lung cancer mortality among uranium miners in West Bohemia with varying rates of exposure to radon and its progeny. *Radiat. Res.*, izdanje 137., str. 251.-261.

Winter, M. & Wicke, A., 1993. Environmental radioactivity, radiation ecology, radiation effects. *Progress in Radiation Protection, Band I, Verlag TÜV, Rheinald (njem.)*.

Woodward, A. *et al.*, 1991. Radon daughter exposures at the Radium Hill uranium mine and lung cancer rates among former workers, 1952-87. *Cancer Causes and Control*, izdanje 2., str. 213.-220.

Xuan, X. Z. *et al.*, 1993. A cohort study in Southern China of tin miners exposed to radon and radon decay products. *Health Phys.*, izdanje 64., str. 120.-131.