

UNIVERZA V NOVI GORICI
FAKULTETA ZA ZNANOSTI O OKOLJU

Špela ŠELIGA

**STOPNJA RADIOAKTIVNEGA RAVNOTEŽJA MED
RADONOM IN NJEGOVIMI KRATKOŽIVIMI
RAZPADNIMI PRODUKTI**

DIPLOMSKO DELO

Mentorica: Janja Vaupotič

Nova Gorica, 2008

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici doc. dr. Janji Vaupotič za vso pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela in prof. dr. Ivanu Kobalu za strokovne pripombe.

Posebej se zahvaljujem tudi mojim domačim in Janiju.

POVZETEK

V diplomskem delu sem študirala stopnjo radioaktivnega ravnotežja med radonom (^{222}Rn) in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti (RnDP). Na dveh različnih merilnih mestih, v radonski komori laboratorija na Odseku za znanosti o okolju Instituta Jožef Stefan in v bivanjskem okolju (moje stanovanje), sem merila radon in njegove kratkožive razpadne produkte. Pri analizi podatkov sem upoštevala tudi temperaturo in relativno zračno vlažnost, ves čas meritev pa sem beležila aktivnosti, ki so se v določenem prostoru izvajale. Za meritve sem uporabljala prenosna merilnika EQF 3020-2 (Sarad, Nemčija), s katerima sem kontinuirno merila koncentracije radona in radonovih kratkoživih razpadnih produktov, ravnotežni faktor (F) ter delež (f_{un}) nevezanih RnDP. Za vzporedne meritve radona pa sem uporabljala tudi kontinuirna merilnika radona RadonScout (Sarad, Nemčija) in AlphaGuard (Genitron, Nemčija). Meritve so potekale v različnih časovnih intervalih, od sredine septembra do sredine decembra 2007. Ravnotežni faktor v radonski komori je v območju od 0,005 do 0,09, delež nevezanih RnDP pa od 0,02 do 0,90. V bivanjskem okolju se F giblje od 0,01 do 0,80, f_{un} pa od 0,01 do 0,70. Tako na F kot f_{un} so v veliki meri vplivale dejavnosti, ki so se izvajale v bivanjskem okolju in delovni režim v radonski komori.

Ključne besede: radon, radonovi kratkoživi razpadni produkti, ravnotežni faktor, delež nevezanih radonovih razpadnih produktov, radonska komora, bivanjski prostor

SUMMARY

I have studied the state of radioactive equilibrium between radon and its short-lived decay products under different conditions. Portable EQF 3020-2 devices (Sarad, Germany) were used to continuously monitor activity, concentrations of radon (Rn) and radon short-lived decay products (RnDP), the equilibrium factor (F) between Rn and RnDP, and unattached fractions of RnDP (f_{un}). Measurements were carried out in a radon chamber and in a dwelling over the period from September to December 2007. Air temperature and relative humidity were also recorded. In the radon chamber, F ranged from 0.005 to 0.09 and f_{un} from 0.02 to 0.90 while, in the dwelling, values ranged from 0.01 to 0.80 and from 0.01 to 0.70, respectively. Both F and f_{un} were influenced greatly by the operational regime in the radon chamber and household activities in the dwelling.

Key words: radon, radon short-lived decay products, equilibrium factor, unattached fraction of radon short-lived decay products, radon chamber, dwelling

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA.....	I
POVZETEK – SUMMARY.....	III
KAZALO VSEBINE.....	V
1 UVOD.....	1
1.1 Cilji diplomskega dela.....	2
2 TEORETIČNE OSNOVE.....	2
2.1 Osnove radioaktivnosti in definicija enot.....	3
2.2 Fizikalno – kemijske lastnosti radona in njegovih razpadnih produktov.....	4
2.3 Radonovi razpadni produkti v bivanjskem okolju.....	8
2.4 Obnašanje radonovih razpadnih produktov -vezava na aerosole in odlaganje na površine.....	8
2.4.1 Aerosoli v bivanjskem okolju.....	10
2.5 Radon v naravi in vstop v bivanjsko okolje.....	10
2.5.1 Emanacijski kefcient	11
2.5.2 Transportni mehanizmi.....	11
2.5.3 Radon v bivanjskem okolju.....	12
2.5.4 Koncentracije radona v bivanjskem okolju.....	13
2.6 Dozimetrija radona in njegovih razpadnih produktov.....	13
3 EKSPERIMENTALNI DEL.....	14
3.1 Merilne tehnike.....	15
3.1.1 Načini merjenja radona in njegovih razpadnih produktov.....	15
3.1.2 Kontinuirni merilnik radonovih razpadnih produktov EQF 3020-2.....	15
3.1.3 Kontinuirni merilnik radona RadonScout.....	16
3.1.4 Kontinuirni merilnik radona Alphaguard.....	17
3.2 Merilna mesta in potek meritev.....	18
3.2.1 Opis laboratorija.....	18
3.2.2 Opis radonske komore.....	18
3.2.3 Potek meritev v laboratoriju in radonski komori.....	19
3.2.4 Bivanjsko okolje.....	20
3.2.5 Potek meritev v stanovanju.....	21
4 REZULTATI IN RAZPRAVA.....	23
4.1 Radonska komora.....	23
4.1.1 Poskus 1. Odpiranje pokrova komore za različne čase.....	26
4.1.2 Poskus 2. Prepihovanja komore za različne čase.....	32
4.1.3 Rezultati meritev v laboratoriju.....	36
4.2 Bivanjski prostor.....	39
4.2.1 Kuhinja.....	40
4.2.2 Kopalnica.....	48
4.2.3 Kletni prostor.....	51
5 ZAKLJUČKI.....	53
6 VIRI.....	56

1 UVOD

V zraku je vedno in povsod navzoč radioaktivni žlahtni plin radon s svojimi razpadnimi produkti, katerega nastanek je vezan na naravno radioaktivnost zemeljske skorje. Radon in njegovi kratkoživi razpadni produkti prispevajo več kot polovico k obsewni dozi, ki jo v povprečju prejme človek od vseh naravnih virov ionizirajočih sevanj (UNSCEAR, 2000), zato učinke radona in njegovih razpadnih produktov v svetu že vrsto let intenzivno raziskujejo, predvsem učinke žarkov alfa na občutljivo tkivo dihalnega sistema in njihovo povezanost s pljučnim rakom.

Radon (^{222}Rn) z razpadom alfa razpada v radioaktivne produkte polonij (^{218}Po in ^{214}Po), z razpadom beta-gama pa v svinec (^{214}Pb) in bizmut (^{214}Bi) (Nero Jr., 1988). Zaradi kratkega razpolovnega časa glede na radon jih imenujemo kratkožive radonove razpadne produkte (RnDP). Ločimo nevezane radonove razpadne produkte (f_{un}), velikosti pod 50 nm in vezane radonove razpadne produkte (f_{att}), velikosti od 200 do 600 nm. Kakšno bo razmerje nevezanih in vezanih RnDP je odvisno od mikroklimatskih razmer: temperature in relativne vlažnosti zraka, koncentracije in velikostne porazdelitve aerosolov, gibanja zraka, človekovih dejavnosti v prostoru in podobno (Nero Jr., 1988). Ko dihamo zrak, ki je kontaminiran z Rn in RnDP, Rn vdihnemo in izdihnemo, le manjši del radona bo razpadel v pljučih. Radon prispeva le približno 5 % k obsewni dozi v pljučih (Nero Jr., 1988), pa čeprav uporabljamo splošen izraz "dozimetrija radona". Po drugi strani, pa so RnDP aerosoli, ki se tako odlagajo na stene dihalnih poti v ustih, nosu in pljučih, kjer dalje razpadajo in poškodujejo bližnje tkivo. Zaradi kratkega razpolovnega časa (30 min) glede na radon, obstaja večja verjetnost, da bodo v pljučih razpadli do ^{210}Pb , še preden bodo odstranjeni preko čistilnih mehanizmov dihalnih poti. Za tkivo so še posebej nevarni žarki alfa, saj se pri razpadu alfa sprosti največ energije, ki se absorbira v zelo tenki plasti tkiva (Nero Jr., 1988). Zato sta za tkivo respiratornega trakta od radonovih razpadnih produktov najbolj nevarna ^{218}Po in ^{214}Po , ki sta sevalca alfa. Ker so za poškodbe pljuč odgovorni radonovi razpadni produkti, in ne sam radon, je za oceno obsewne obremenitve potrebno poznati koncentracije RnDP, ali pa alternativno poleg koncentracije radona tudi ravnotežni faktor, F , ki podaja stopnjo radioaktivnega ravnotežja med Rn in RnDP. Eden od pomembnih parametrov v dozimetriji radona je tudi delež nevezanih radonovih razpadnih produktov.

Meritve povprečnih koncentracij radona v zraku so dokaj preproste z uporabo detektorjev jedrskih sledi in primerne za masovno uporabo. Ker pa je za izračun doze potrebno poznati predvsem koncentracijo RnDP, je splošna praksa v dozimetriji radona, da se izmerjeno koncentracijo Rn pretvori v koncentracijo RnDP z uporabo ravnotežnega faktorja, priporočenega s strani mednarodnih organizacij kot so United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), International Commission on Radiological Protection (ICRP), International Atomic Energy Agency (IAEA). Seveda lahko koncentracijo RnDP, F in f_{un} tudi izmerimo, so pa te meritve mnogo bolj zahtevne kot meritve Rn, saj zanje potrebujemo drago merilno opremo s katero lahko opravljamo le omejeno število meritev. So pa tovrstne raziskave zelo dragocene za izboljšanje dozimetrije radona.

V svetu še vedno prevladujejo raziskave plina radona, medtem ko se s študijem radonovih razpadnih produktov ukvarja znatno manj raziskovalnih skupin. Ena od vodilnih skupin, ki je razvila svoj merilni sistem in izvedla obsežne raziskave nevezanih in vezanih radonovih razpadnih produktov je skupina prof. Porstendörferja (Butterweck

et al., 1992; Reineking and Porstendörfer, 1990). Prav tako je svoj merilni sistem izdelala raziskovalna skupina prof. Yamade, obe skupini pa sta raziskovali predvsem osnovne fizikalne lastnosti radonovih razpadnih produktov v vezani in nevezani obliki, in sicer v modelnih hišah. Z razvojem komercialnih prenosnih merilnih sistemov so možnosti in zanimanje za tovrstne raziskave narasle (Chen et al., 1998; El-Hussein, 1996), še vedno pa je zelo malo podatkov iz realnega delovnega in bivanjskega okolja. V Sloveniji so največ raziskav radona in njegovih razpadnih produktov v vezani in nevezani obliki izvedli v vrtcih in šolah s povišanimi koncentracijami radona (Vaupotič and Kobal, 2006; Vaupotič and Kobal, 2007; Vaupotič, 2007).

Zaradi velikega števila parametrov, ki vplivajo na koncentracijo radona in njegovih razpadnih produktov v zraku nekega prostora, je kljub vsemu današnjemu znanju problem preveč kompleksen in zaenkrat še ni matematično-fizikalnega modela, ki bi znal dovolj zanesljivo napovedovati koncentracije in bi zamenjal meritve. Tako je brez nekaj predhodnih meritev vsako napovedovanje koncentracij radona in razpadnih produktov v nekem prostoru zgolj ugibanje. Potrebne so osnovne raziskave radona in radonovih razpadnih produktov tako v modelnem, kot v bivanjskem okolju, da spoznamo, kako se F in f_{un} spreminjata in kateri parametri na to najbolj vplivajo.

1.1 Cilji diplomskega dela

Namen mojega diplomskega dela je bil raziskati, kako na ravnotežni faktor med radonom in radonovimi razpadnimi produkti vplivajo meteorološki parametri (temperatura, relativna vlažnost zraka) ter bivanjske navade v bivanjskem okolju. Da bi pa bolje razumela fizikalne procese, ki so osnova za te vplive, sem poiskala tudi korelacije med koncentracijo R_n in R_nDP , med F in koncentracijo R_n , med koncentracijo R_n in R_nDP ter F na eni strani in f_{un} na drugi strani.

V ta namen sem v dveh različnih okoljih, radonski komori s povišano koncentracijo R_n (približno 12 kBq m^{-3}) v laboratoriju in v bivanjskem okolju, merila koncentracije radona in njegovih razpadnih produktov, F in f_{un} ter temperaturo in relativno zračno vlažnost. Za meritve sem uporabljala prenosni merilnik EQF 3020-2, ki nam ob meritvah R_n omogoča tudi meritve vezanih in nevezanih R_nDP , ravnotežnega faktorja, temperature in relativne vlažnosti zraka. V komori smo simulirali bivanjsko okolje tako, da smo z odpiranjem pokrova in prepihanjem spreminjali pogoje in študirali vpliv prezračevanja ter spremenjenega deleža aerosolov, relativne vlažnosti zraka in temperature na koncentracijo radona in radonovih razpadnih produktov. Vse aktivnosti v komori, laboratoriju in stanovanju smo v času trajanja eksperimenta beležili. Rezultati raziskave bodo prispevali k boljšemu poznavanju mehanizma rekombinacije pozitivno nabitih R_nDP , njihovo interakcijo z aerosoli in depozicijo radioaktivnih aerosolov na stene, tla in predmete v prostoru.

2 TEORETIČNE OSNOVE

Radon sodi med kemične elemente z edinstvenimi lastnostmi, ki nam omogočajo njegovo uporabo pri raziskavah v različnih znanstvenih disciplinah. Ena izmed teh lastnosti je radioaktivnost, ki omogoča enostavno detekcijo radona, pomembna pa sta

tudi plinasto agregatno stanje radona in njegova inertnost, ki mu omogočata dobro mobilnost v mediju, skozi katerega se giblje in s tem vstopa v naše okolje (Nero Jr., 1988).

V tem poglavju bom predstavila lastnosti radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov, navajam pa tudi teoretične podlage o koncentracijah radona v tleh, o transportu ter o izhajanju radona iz tal v ozračje in s tem v naše bivanjsko okolje. Obravnavala bom tudi dejavnike, ki vplivajo na koncentracijo radona in radonovih razpadnih produktov v bivanjskem okolju in posledično na radioaktivno ravnotežje med Rn in RnDP in f_{un} , ki je pomemben pokazatelj obsevne doze na pljuča, ki jo posameznik prejme. f_{un} je pomemben parameter v dozimetriji radona, ker omogoča izračun doznega pretvorbenega faktorja (DCF_D), ki nam podaja ekvivalentno dozo na pljuča od vdihanih radonovih razpadnih produktov.

2.1 Osnove radioaktivnosti in definicija enot

Radioaktivnost je pojav, pri katerem nestabilno atomsko jedro razpade. Pri razpadu alfa in beta nastane drugo jedro, obenem pa se sprosti še visokoenergijski delec. To je helijevo jedro pri razpadu alfa ali pa elektron ali pozitron pri razpadu beta. Če jedro po razpadu ostane v vzbujenem stanju, preide v osnovno stanje z izsevanjem žarkov gama.

Hitrost radioaktivnega razpada (odvod števila radioaktivnih jeder N po času t) matematično zapišemo z diferencialno enačbo:

$$A = -dN / dt = \lambda \times N \quad (1)$$

Pri tem je λ konstanta radioaktivnega razpada (v enotah recipročnega časa: s^{-1} , h^{-1} , min^{-1} , $leto^{-1}$). Količnik dN/dt imenujemo aktivnost radioaktivne snovi, A , in ima enoto 1 becquerel (Bq), kar ustreza enemu razpadu na sekundo. Integracija gornje enačbe v mejah časa od $t = t_0 = 0$, ko je $N = N_0$, do $t = t$, ko je $N = N$, nam da rešitev:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Če obe strani enačbe pomnožimo z λ , dobimo enačbo:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda t} \quad (3)$$

iz katere lahko izračunamo, na kakšno aktivnost A pade začetna aktivnost A_0 v času t . Namesto konstante λ lahko uporabljamo razpolovni čas, $t_{1/2}$, to je čas ($t = t_{1/2}$), v katerem pade N_0 na $1/2N_0$ oziroma A_0 na $1/2A_0$, torej:

$$A_0/2 = A_0 \times e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (4)$$

oziroma:

$$\ln(1/2) = -\lambda t_{1/2} \text{ ali } \ln 2 = \lambda t_{1/2}, \quad (5)$$

iz česar sledi:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad \text{ali} \quad \lambda = \ln 2 / t_{1/2}. \quad (6)$$

Tako kot λ , je tudi $t_{1/2}$ karakteristična konstanta za nek radioaktiven element; je pa za praktično uporabo bolj primerna, ker ima enoto časa, in ne recipročnega časa. Tako lahko enačbi (2) in (3) zapišemo v obliki:

$$N = N_0 \times \exp(-\ln 2 \times t / t_{1/2}) \quad \text{ozioroma} \quad A = A_0 \times \exp(-\ln 2 \times t / t_{1/2}) \quad (7)$$

To obliko sem uporabljala tudi pri svojih računih.

2.2 Fizikalno – kemijske lastnosti radona in njegovih razpadnih produktov

Radon je kemični element, ki ima v periodnem sistemu simbol Rn in atomsko število 86. Vrelišče radona je pri $-61,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (211,35 K), tališče pa pri $-71 \text{ }^\circ\text{C}$ (202,15 K). Pri normalnih pogojih ($T = 273,15 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$) je radon brez barve in okusa in ima specifično gostoto $9,73 \text{ g dm}^{-3}$ (Kemija, 2004). Ta radioaktivni žlahtni plin je eden najtežjih plinov. Poznanih je več kot dvajset izotopov radona, med njimi se najpogosteje omenjajo ^{222}Rn (radon), ^{220}Rn (toron) in ^{219}Rn (aktinon). Radon najdemo v zraku, radioaktivnih vrelih, nekaterih zemeljskih plinih in v radioaktivnih mineralih. Izmed vseh naštetih ima radon najdaljši razpolovni čas (3,83 dneva), kar mu omogoča, da kljub radioaktivnemu razpadu pride z difuzijo in konvekcijo iz zemlje v ozračje. Zaradi te fizikalne lastnosti se kot plin lahko pomika skozi snov in dospe v ozračje in s tem v naše okolje še preden razpade.

Radon nastaja v naravi kot vmesni člen pri radioaktivnem razpadu urana ^{238}U in ^{235}U ter torija ^{232}Th . V vseh razpadnih vrstah nastaja radon neposredno iz radija in sicer dobimo v uranovi razpadni vrsti ^{222}Rn (radon), v torijevi ^{220}Rn (toron) in v aktinijevi ^{219}Rn (aktinon). Na sliki 1 so shematsko prikazani vsi trije razpadni nizi.

Delež ^{220}Rn (toron) v zraku je majhen zaradi njegove razmeroma kratke razpolovne dobe ($t_{1/2} = 55,0 \text{ s}$). Ima dva kratkoživa razpadna produkta, sevalca alfa, to sta ^{216}Po in ^{212}Po in dva sevalca beta-gama, ^{212}Pb in ^{212}Bi (slika 1a).

^{219}Rn (aktinon) najdemo v zraku le izjemoma, saj zaradi izredno kratke razpolovne dobe ($t_{1/2} = 4,0 \text{ s}$) razpade že v zemlji v svoje razpadne produkte, dva med njimi sta sevalca alfa, ^{215}Po in ^{211}Po , in dva sevalca beta-gama, ^{211}Pb in ^{211}Bi (slika 1c).

^{222}Rn z najdaljšo razpolovno dobo ($t_{1/2} = 3,83 \text{ dni}$) je najpomembnejši radonov izotop. Ima naslednje razpadne produkte: dva sevalca alfa, ^{218}Po in ^{214}Po in dva sevalca beta-gama, ^{214}Pb in ^{214}Bi (slika 1b). Izotop ^{210}Pb sicer tudi razpada, a ima razmeroma velik razpolovni čas ($t_{1/2} = 21 \text{ let}$), zato bom z njim razpadno verigo zaključila.

Ker je radon prisoten v ozračju najdlje, od tod dalje, ko govorim o radonu in njegovih razpadnih produktih, imam v mislih izključno izotop ^{222}Rn in njegove kratkožive razpadne produkte. Lastnosti radona in njegovih razpadnih produktov so zbrane v tabeli 1.

Slika 1. Razpadni nizi: a) torijev, b) uranov, c) aktinijev (Zmazek, 2004).

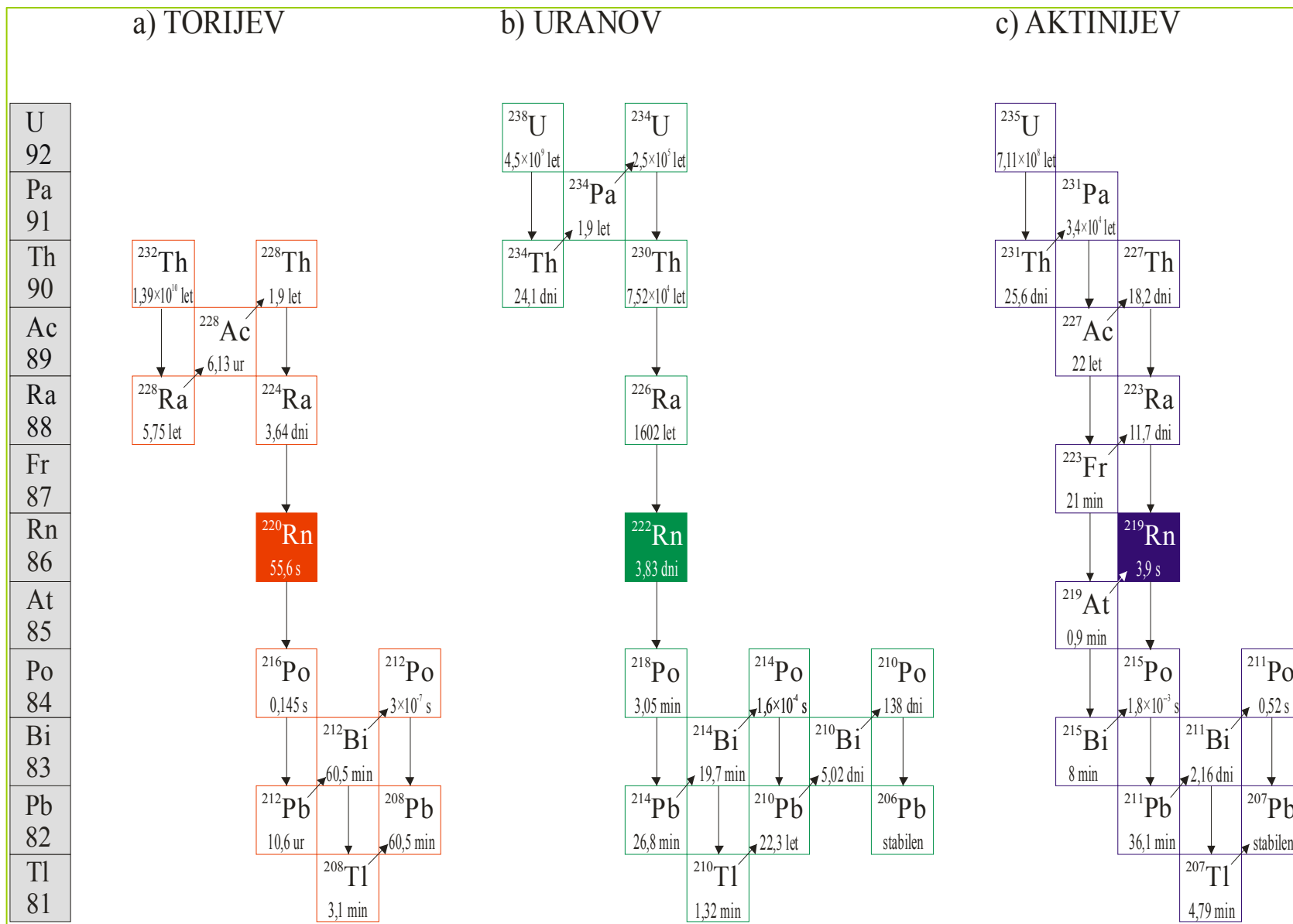
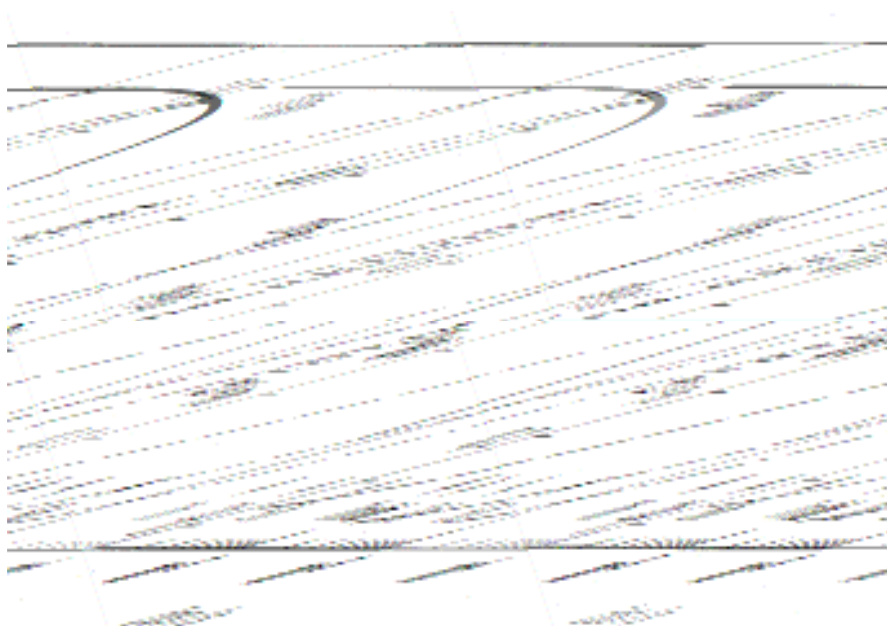


Tabela 1. Lastnosti radona in radonovih razpadnih produktov.

RADIONUKLID	RAZPOLOVNI ČAS	TIPI SEVANJA IN GLAVNE ENERGIJE (MeV)		
		alfa	beta	gama
²²² Rn	3,83 dni	5,4897		
²¹⁸ Po	3,05 min	6,0026		
²¹⁴ Pb	26,8 min		0,67; 0,73	0,2952; 0,3520
²¹⁴ Bi	19,7 min		1,51; 1,54; 3,17; 3,27	0,6094; 1,1204; 1,7645
²¹⁴ Po	163,7 μs	7,6869		
²¹⁰ Pb	22,3 let		0,017; 0,061	
²¹⁰ Bi	5,01 dni		1,161	
²¹⁰ Po	138,38 dni	5,3044		

Poleg že opisanih lastnosti radona in radonovih razpadnih produktov je potrebno omeniti ravnotežni faktor, ki določa stopnjo radioaktivnega ravnotežja med radonom in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti. Kot je razvidno s slike 2, bi se v mirnem in čistem zraku v približno 3 urah vzpostavilo radioaktivno ravnotežje med radonom in njegovimi kratkoživimi razpadnimi produkti, se pravi, da bi dobili iz 1 Bq prvotno prisotnega radona po 1 Bq vsakega od njegovih razpadnih produktov.



Slika 2. Hitrost rasti in razpada radonovih kratkoživih razpadnih produktov v prvotnem čistem vzorcu radona (Vaupotič, 1995).

V realnih pogojih (vlažen zrak, prašni delci, prepih) se radioaktivno ravnotežje nikoli ne vzpostavi, saj se radonovi razpadni produkti hitro po nastanku vežejo na aerosole ali odložijo na površinah predmetov v prostoru (Butterweck et al., 1992). To ravnotežje je glede na mikroklimatske pogoje v zaprtih prostorih od 0,2 do 0,8 (oziroma od 20 do 80 %), običajno pa v bivanjskem okolju okrog 0,5 (oziroma 50 %) (UNSCEAR, 2000).

Koncentracijo radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov v okolju (v zraku) ponavadi podajamo v Bq m^{-3} , čeprav bi pravilneje govorili o koncentracijah aktivnosti. Koncentracije kratkoživih razpadnih produktov radona ponavadi podajamo kot skupno koncentracijo vseh kratkoživih razpadnih produktov, ki je normalizirana na celotno energijo sevanja alfa, ki se bo sprostila iz mešanice vseh navzočih kratkoživih razpadnih produktov, ko bodo dokončno razpadli. Ta količina se imenuje koncentracija potencialne energije alfa (*PAEC*) in jo merimo v enotah MeV L^{-1} oziroma v J m^{-3} .

Stopnjo radioaktivnega ravnotežja med radonom in mešanico razpadnih produktov merimo z ravnotežnim faktorjem *F*, ki je definiran kot razmerje potencialne energije alfa (*PAEC*), ki jo pridobimo z merjenjem koncentracije radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov v zraku in dejansko prisotno koncentracijo radona v zraku. Ravnotežni faktor je podan z izrazom (5).

$$F = \frac{PAEC}{34640 \times C_{Rn-222}} \quad (5)$$

Koncentracija celotne potencialne energije alfa (*PAEC*) je podana z izrazom (6), kot vsota potencialne energije alfa vezanih (att) in nevezanih (un) radonovih razpadnih produktov:

$$PAEC = PAEC^{att} + PAEC^{un} \quad (6)$$

$PAEC^{att}$ in $PAEC^{un}$ pa izračunamo z izrazom (7), v katerem oznaka *C* predstavlja koncentracijo (Bq m^{-3}) posameznega vezanega ($x = att$) oziroma nevezanega ($x = un$) radonovega razpadnega produkta:

$$PAEC^x = 3690 \times C_{Po-218}^x + 17830 \times C_{Pb-214}^x + 13120 \times C_{Bi-214}^x \quad (7)$$

Za poljubno mešanico razpadnih produktov radona v zraku lahko izrazimo koncentracijo potencialne energije alfa s tako imenovano ravnotežno enakovredno koncentracijo radona, *EEC*, ki bi jo mešanica imela, če bi bilo v njej vzpostavljeno radioaktivno ravnotežje med Rn in RnDP. Podana je (v enotah Bq m^{-3}) z naslednjim izrazom:

$$EEC_{Rn} = 0,1065 \times C_{Po-218} + 0,515 \times C_{Pb-214} + 0,379 \times C_{Bi-214} \quad (8)$$

Tako kot pri *PAEC*, lahko tudi *EEC* podajamo posebej za vezane in nevezane RnDP.

Povezavo med enotami za koncentracijo sproščene potencialne energije alfa *PAEC* in enotami za ravnotežno enakovredno koncentracijo radona *EEC* kaže tabela 2.

Tabela 2. Povezava med enotami *PAEC* in *EEC* za radon.

<i>PAEC</i> (Rn)			<i>EEC</i> (Rn)	
WL	MeV L^{-1}	$\mu\text{J m}^{-3}$	Bq m^{-3}	pCi L^{-1}
1	$1,28 \times 10^5$	20,8	3700	100

Stara enota za PAEC je Working level (WL), ki se v rudarstvu še vedno uporablja pri dozimetriji jamskih delavcev, je izpeljana iz stare enote za aktivnost (Ci). Enota 1 WL je enaka koncentraciji 100 pCi L^{-1} radona, ki je v ravnovesju s svojimi kratkoživimi razpadnimi produkti. 1 WL pomeni torej koncentracijo sproščene potencialne energije alfa 128 GeV v enem litru zraka oziroma $20,8 \mu\text{J}$ v enem m^3 zraka. Tolikšno PAEC imajo kratkoživi razpadni produkti, ki so v radioaktivnem ravnotežju z radonom ^{222}Rn , ki ima koncentracijo 3700 Bq m^{-3} . WL (working level), predstavlja takšno koncentracijo radonovih kratkoživih razpadnih produktov, da je njihova skupna energija alfa v enem litru enaka $1,28 \times 10^5 \text{ MeV}$.

2.3 Radonovi razpadni produkti v bivanjskem okolju

V bivanjskem okolju je predvsem pomemben delež nevezanih radonovih razpadnih produktov. Doza, ki jo dobimo od nevezanih radonovih razpadnih produktov, je lahko od 6 do 38 krat višja, kot doza, ki jo dobimo od radonovih razpadnih produktov, ki so vezani na aerosole (Nero Jr., 1988). Delež nevezanih radonovih razpadnih produktov je v prostoru običajno med 0,05 in 0,20, s srednjo vrednostjo okrog 0,08 (Vaupotič, 1995; UNSCEAR, 2000; Nero Jr., 1988) in je odvisen od koncentracije in velikosti aerosolov (Nero Jr., 1988). V dosedanjih raziskavah so poskušali ugotoviti kako v bivanjskem okolju različni parametri vplivajo na faktor ravnotežja in delež nevezanih radonovih razpadnih produktov. Parametri, ki v največji meri vplivajo na F in f_{un} so značilnosti prostora (hitrost vstopa aerosolov v prostor, hitrost prezračevanja), karakteristike aerosolov (koncentracija, velikostna porazdelitev) in fizikalni pogoji (pritrdjevanje na aerosole, posedanje). Ugotovljeno je bilo, da povišanje koncentracije aerosolov poviša faktor ravnotežja, ker je proces vezave na aerosole hitrejši kot proces posedanja na stene in tla (Butterweck et al., 1992). Delež nevezanih radonovih razpadnih produktov se z naraščanjem aerosolov zniža (Nero Jr., 1988).

Delež nevezanih radonovih razpadnih produktov je definiran kot tisti del potencialne energije alfa, ki ni vezana na zračne delce in jo nosijo prosti oziroma nevezani radonovi razpadni produkti in je podan z izrazom (12).

$$f_{un} = \frac{PAEC^{un}}{PAEC^{att} + PAEC^{un}} \quad (12)$$

Delež nevezanih RnDP (f_{un}) je pomemben parameter v dozimetriji radona, ker omogoča izračun doznega pretvorbenega faktorja (DCF_D), ki nam podaja efektivno dozo na pljuča od vdihanih radonovih razpadnih produktov, ki je podan z izrazom (13).

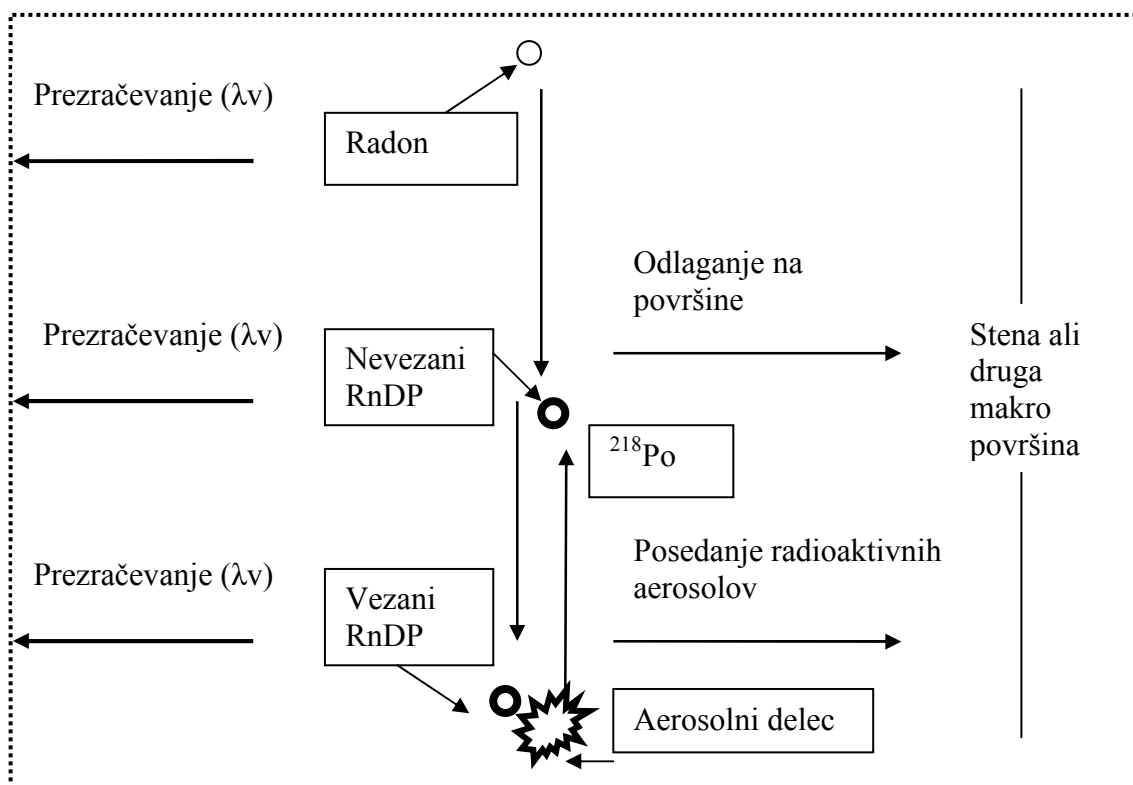
$$DCF_D = 11,35 + 0,43 \times f_{un} \quad (13)$$

2.4 Obnašanje radonovih razpadnih produktov - vezava na aerosole in odlaganje na površine

Radonovi kratkoživi razpadni produkti (RnDP) so za razliko od radona, ki je plin, kovine. Ti produkti so ob svojem nastanku pozitivno nabiti atomi, ali v manjši meri nevtralni atomi, ki se rekombinirajo z molekulami zraka in vode in tvorijo skupke

velikosti pod 50 nm (imenujemo jih nevezani RnDP), kasneje se pa delno tudi usedejo na prašne delce v zraku in tako tvorijo radioaktivne aerosole velikosti od 200 do 600 nm (imenujemo jih vezani RnDP). Po nastanku je nadaljna usoda RnDP odvisna od razmer v okolju, v katerem nastajajo. Za razliko od radona, je obnašanje radonovih razpadnih produktov mnogo bolj kompleksno. Čeprav imamo znano koncentracijo radona v zaprtem prostoru, lahko koncentracije razpadnih produktov močno varirajo, saj se lahko le-ti odstranjujejo iz zraka na različne načine (nadaljni razpad, adsorpcija na aerosole in desorpcija z njih ter posedanje na tla in stene) (Nazaroff et al., 1988). Še posebej je posedanje na stene in pohištvo pomembno v bivanjskem okolju, saj lahko v zraku bistveno zniža koncentracije radonovih razpadnih produktov.

Mehanizmi odstranjevanja radona in razpadnih produktov (če ne upoštevamo radioaktivnega razpada) so shematsko prikazani na sliki 3. Ko je RnDP enkrat formiran, se lahko veže z delci v zraku. Vezan ali ne, je lahko RnDP odstranjen z depozicijo / odlaganjem na površino, s prezračevanjem, ali z radioaktivnim razpadom.



Slika 3. Mehanizmi odstranjevanja radona in razpadnih produktov (če ne upoštevamo radioaktivnega razpada). Ko je RnDP enkrat formiran, se lahko veže z delci v zraku. Ta proces je tudi reverzibilen za ^{218}Po . Vezan ali ne, je lahko RnDP odstranjen z depozicijo / odlaganjem na površino, s prezračevanjem, ali z radioaktivnim razpadom.

Radonovi kratkoživi razpadni produkti v zraku hitro, prej kot v eni sekundi, reagirajo z molekulami sledilnih plinov (NO_x , NH_3 , SO_2) ali vodne pare (Nero Jr., 1988). Ion $^{218}\text{Po}^+$ na primer reagira tudi z O_2 , pri čemer nastane $^{218}\text{PO}_2^+$, ki se lahko nevtralizira z vezanjem elektronov iz NO ali NO_2 . Nevtralizacijski mehanizmi so odvisni od prisotnosti nabitih delcev ter sledilnih plinov in organskih hlapov v zraku. Proces je hitrejši v bolj onesnaženem zraku. Atome nevezanih radonovih razpadnih produktov lahko obdajo polarne molekule in tako tvorijo bodisi gruče ali stabilne komplekse. Tako na primer povišanje relativne vlažnosti od 1 % na 100 % poveča premer delcev, na katere so vezani radonovi razpadni produkti, od 1,3 nm na 2,3 nm (Vaupotič, 1995).

Nevezani radonovi kratkoživi razpadni produkti se v sorazmerno kratkem času, od 1 do 100 sekund, pritrjujejo na aerosole in tvorijo tako imenovane vezane razpadne produkte. Razmerje med deležem vezanih in nevezanih razpadnih produktov je odvisno od številnih parametrov, prvenstveno pa od velikosti in koncentracije aerosolov.

2.4.1 Aerosoli v bivanjskem okolju

Zrak navadno vsebuje številne suhe ali mokre delce, imenovane aerosolni delci ali aerosoli. Ti aerosoli se razlikujejo v velikosti od skoraj atomskih dimenzij pa do nekaj mikrometrov in igrajo veliko vlogo pri obnašanju radonovih kratkoživih razpadnih produktov. Proces vezave radonovih razpadnih produktov na aerosole je rezultat naključnega gibanja razpadnih produktov in aerosolnih delcev in se lahko obravnava kot poseben primer aerosolne koagulacije. Velikost aerosolov in njihova koncentracija sta osnovna parametra, ki v bivanjskem okolju vplivata na koncentracije radonovih razpadnih produktov v zraku. Na velikost aerosola vplivajo njegove fizikalne lastnosti kot oblika in premer. Koncentracije aerosolov v prostoru so običajno v območju od 7000 do 30.000 delcev v cm^3 zraka. Ob prisotnosti izvorov aerosolov (kuhanje, kajenje, sesanje, gibanje) se koncentracije zvišajo tudi na 50.000 do 100.000 delcev v cm^3 zraka (Nero Jr., 1988; Nazaroff et al., 1988). Ugotovljeno je bilo, da dejavnosti v bivanjskem prostoru predvsem kajenje, kuhanje ter cvrtje ustvarjajo ena do dvakrat večje aerosolne delce, kot bi se sicer pojavljali (Nero Jr., 1988; Nazaroff et al., 1988).

Depozicija radioaktivnih aerosolov na stene, tla in predmete v prostoru je v veliki meri odvisna od dejavnosti, ki se izvajajo v nekem prostoru. Kakšno bo razmerje nevezanih in vezanih RnDP, je odvisno od mikroklimatskih razmer: temperature in relativne vlažnosti zraka, koncentracije in velikostne porazdelitve aerosolov, gibanja zraka in človekovih dejavnosti v prostoru. Ker je stopnja posedanja radonovih razpadnih produktov močno odvisna od tega, ali se je RnDP vezal na aerosol ali ne (in s tem tudi na karakteristiko delcev v zraku), igrajo aerosoli v zraku zelo pomembno vlogo.

2.5 Radon v naravi in vstop v bivanjsko okolje

Radon in njegovi razpadni produkti s sevanjem alfa (v manjši meri tudi beta in gama) poškodujejo občutljivo tkivo dihalnega sistema in tako povečajo tveganje za nastanek pljučnega raka.

Mehanizmi, s katerimi radon izhaja na prosto, so odvisni od številnih parametrov, zato se koncentracija radona v zraku stalno spreminja. Glavni izvor radona v bivanjskem okolju je površinska plast zemlje, zato je največji prispevek radona v bivanjsko okolje iz tal. Ločimo dve skupini parametrov, ki vplivajo na koncentracijo radona in na njeno spreminjanje v prostoru. V prvi so naravni dejavniki, kot lokalna geologija (prepustnost) in kemijske značilnosti tal (vsebnost radionuklidov uranovega razpadnega niza do radona) ter klimatski in mikroklimatski dejavniki (Nazaroff et al., 1988). V drugo skupino pa uvrščamo parametre, ki so povezani z dejavnostjo človeka, in sicer kakovost gradnje bivanjskih prostorov in bivanjske navade ljudi.

2.5.1 Emanacijski koeficient

Prvotni izvor radona ^{238}U je naravno prisoten prazaprav v vseh kamninah, torej tudi v sestavi vseh vrst tal. Pot radona v tleh se začne z razpadom radija ^{226}Ra , kjer delež radona preide tudi v praznine ali pore tal, kjer je kot plin lahko mobilan. Emanacijski koeficient oziroma emanacijska moč je količina, ki pove, kolikšen delež nastalega radona pride iz trdne faze v prazen prostor med mineralnimi zrcni oziroma v zrak v porah, pojav sam pa imenujemo emanacija. Ob razpadu radija, prejme radon 86 keV kinetične energije (Nazzaroff et al., 1988). Odrivna energija novo nastalega jedra atoma radona povzroči, da bo ta atom prepotoval v mineralnih zrcnih od 0,02 - 0,07 μm , v vodi 0,1 μm in v zraku v porah 63 μm (Nazzaroff et al., 1988). Sestava in struktura tal vplivata na emanacijo radona iz zrcn zemlje, na njegovo kopičenje v porah in na transport radona iz zemlje na površino.

2.5.2 Transportni mehanizmi

Transport radona iz por v zemlji ali kamninah v ozračje, kot velja tudi za izhajanje radona iz gradbenih materialov v bivanjske prostore, je odvisen od gradienta koncentracije in gradienta tlaka (Nazzarof et al., 1988). Transport radona v tleh je omogočen z molekularno difuzijo, kjer se radonovi atomi spontano razvrščajo po pornih fluidih (termalne vode, metan, ogljikov dioksid in drugi) in s konvekcijo, kjer radon potuje skozi praznine tal s fluidi, bodisi ga s seboj prinašajo fluidi-geoplina tako kot nekatere druge plinaste komponente. V manj prepustnih tleh je transport omejen bolj na difuzijo, po načelu gradienta koncentracije, v bolj propustnih tleh pa prevladuje transport s konvekcijo, pod vplivom gradienta tlaka, ki nastane zaradi spremembe meteoroloških pogojev (Gundersen et al., 1992).

Najvišje koncentracije radona najdemo v talnem zraku, običajno od nekaj 10 kBq m^{-3} do nekaj 100 kBq m^{-3} , v ozračju pa se radon hitro razredčuje in njegova koncentracija z višino upada ter redko preseže 50 Bq m^{-3} (Nazzarof et al., 1988). Drugače pa je v zaprtih oziroma bivanjskih prostorih, kamor radon vstopa iz tal skozi razpoke in odprtine v betonski talni plošči, skozi stične robove med temeljno ploščo in stenami, skozi kanalizacijske odprtine in po slabo tesnjenih vodovodnih napeljavah. V zaprtih prostorih, kjer je izmenjava zraka šibka, se iz tal in sten izhajajoči radon kopiči in lahko doseže nekaj velikostnih razredov večje koncentracije kot na prostem. V stanovanjskih zgradbah so izmerili koncentracije od nekaj 10 do nekaj 100 Bq m^{-3} , v posameznih primerih pa tudi do nekaj 1000 Bq m^{-3} (Vaupotič, 1995; Wilkening, 1990). Ker je največji prispevek radona iz tal, je razumljivo, da so najvišje koncentracije radona v zraku v kletah, vendar ne samo zaradi visokih koncentracij v zemlji in prodiranja v kletne prostore, temveč tudi zato, ker so ti prostori ponavadi slabo prezračevani. Različne vstope radona v prostor shematsko kaže slika 4.



Slika 4. Možni vstopi radona v prostor. (EPA, 2006)

2.5.3 Radon v bivanjskem okolju

Uporaba gradbenih materialov, ki imajo povišano koncentracijo urana ali radija, ter gradnja hiš na neprimerni podlagi (elektrofiletrski pepel in žindra, rudniška jalovina) lahko poviša koncentracije radona in razpadnih produktov v bivanjskem prostoru. (Vaupotič, 1995). Poleg naštetih dejavnikov igra pomembno vlogo tudi kvaliteta gradnje bivanjskih prostorov (tesnenje), pa tudi velikost in oblika zgradbe (EPA, 2006).

Voda in zemeljski plin predstavljata le manjši vir radona v bivanjskem okolju. Pri uporabi vode se radon, ki je raztopljen v njej, sprošča v zrak. Ta vir ne predstavlja velike dodatne obremenitve v bivanjskem okolju, saj je faktor prehoda voda - zrak enak 10^{-4} . Če je koncentracija radona v vodi 10 kBq m^{-3} , bi to prispevalo h koncentraciji v zraku 1 Bq m^{-3} (Vaupotič, 1995). V površinskih vodah so srednje koncentracije radona okrog 1 kBq m^{-3} , v podtalnici pa okrog 10 kBq m^{-3} (Vaupotič, 1995). Radon je tudi v zemeljskem plinu in se pri gorenju sprošča v zrak. Pri nas so na območju Ljubljane izmerili v zemeljskem plinu okrog 60 Bq m^{-3} in je ta prispevek k celotni koncentraciji v bivanjskem okolju zanemarljiv (Vaupotič, 1995).

Pomemben dejavnik, ki se uvršča med bivanjske navade ljudi je prezračevalni režim, ki ga izvajamo v prostoru (Nazaroff et al., 1988). S samim prezračevanjem naredimo veliko v zvezi z zmanjševanjem koncentracij radona in s tem njegovih kratkoživih razpadnih produktov. Kljub zaprtim oknom in vratom poteka delna izmenjava notranjega zraka z zunanjim (prezračevanje). Pomembni faktorji, ki vplivajo na stopnjo prezračevanja, vključujejo konstrukcijo in upravljanje zgradbe (starost, tesnjenost oken in vrat, itd.), kot tudi naravne pogoje (atmosferski tlak, temperatura, smer in hitrost vetra). Kadar imamo v prostoru nizke koncentracije radona, pa prezračevanje morda celo pomeni dodaten vnos radona. Pozimi se namreč lahko zgodi, predvsem pri temperaturnih inverzijah in ob padanju zračnega tlaka, da so koncentracije v zunanjem zraku večje kot znotraj. V takih primerih je prezračevanje seveda prej škodljivo kot koristno (UNSCEAR 2000; Nazaroff et al., 1988; EPA, 2006).

Na koncentracijo radona v nekem prostoru torej vplivajo:

- geološke značilnosti
- gradbeni materiali in način gradnje
- navade ljudi
- meteorološki parametri
- oddaljenost od kletnih prostorov

2.5.4 Koncentracije radona v bivanjskem okolju

Mednarodne organizacije (UNSCEAR, ICRP, IAEA in druge) izdajajo priporočila o tistih najvišjih koncentracijah radona, ki jih v bivanjskem okolju še lahko dopuščamo, pravimo jim mejne vrednosti. Vsaka država pri pripravi takšnih priporočil upošteva predvsem svoje lokalne geološke in mikroklimatske značilnosti. Glede na vedno nova spoznanja so se mejne letne koncentracije radona od začetka raziskav do danes precej spreminjale. Danes so mejne koncentracije radona za domove med 200 in 600 Bq m⁻³, za delovno okolje pa med 500 in 1500 Bq m⁻³.

Zakonodajo s področja radioaktivnosti ureja v Sloveniji *Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti* (Ur. l. RS, št. 67/2002), ki v svojih aktih obravnava tudi radon in dozimetrijo. *Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih* določa, da povprečna letna koncentracija v bivanjskem prostoru ne sme presegati 400 Bq m⁻³, v delovnem prostoru pa ne 1000 Bq m⁻³ (Ur. l. RS, št. 115/2003). Če so vrednosti povišane, lahko prejmemo previsoke efektivne doze. Področje dozimetrije pa ureja *Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji* (Ur. l. RS, št. 49/2004).

Vedno nova spoznanja na področju dozimetrije bodo seveda vplivala na mejne vrednosti koncentracij, ki jih strokovnjaki predlagajo, upravni organi pa potem opredelijo najvišje dovoljene vrednosti radona v delovnem in bivanjskem okolju in jih kontrolirajo. Teh vrednosti zato ne smemo vzeti kot nekaj dokončnega, ampak so vedno le odraz trenutnega znanja o škodljivih vplivih radona na človeka.

2.6 Dozimetrija radona in njegovih razpadnih produktov

Ker dozimetrija ni bila predmet moje raziskave, podajam le osnovne definicije ter na kratko predstavim problem dozimetrije radona ter povezavo z f_{un} , enim od parametrov, ki sem jih študirala.

Poznamo tri osnovne definicije doze:

- absorbirana doza
- enakovredna doza
- efektivna doza

Absorbirana doza radioaktivnega sevanja je množina absorbirane energije na enoto mase. Njena enota je 1 J kg^{-1} in jo imenujemo 1 Gy (gray). Če govorimo o tkivu, nas bolj zanima **enakovredna doza**, ki jo dobimo tako, da absorbirano dozo v tkivu pomnožimo z obsevnim utežnim faktorjem, ki upošteva tudi biološki učinek sevanja. Ta faktor je za sevanje alfa 20, za sevanje beta in gama pa 1. Enota enakovredne doze je 1 Sv (sievert). Tako 1 Gy absorbirane doze pomeni 20 Sv enakovredne doze pri sevanju alfa, medtem ko 1 Gy pri sevanju beta in gama pomeni 1 Sv. Pri ovrednotenju obsevne obremenitve človeka pogosto uporabljamo tudi **efektivno dozo**. Dobimo jo tako, da enakovredno dozo za neko tkivo pomnožimo z utežnim faktorjem za to tkivo in seštejemo za celotno telo. Ker so pri dihanju radona in njegovih razpadnih produktov v glavnem izpostavljena pljuča, upoštevamo pri izračunu efektivne doze, ki jo povzročijo radon in njegovi razpadni produkti, le utežne faktorje za pljuča, in sicer 0,06 za bronhialni epitelij in 0,06 za pljučno tkivo, medtem ko so utežni faktorji za ostala tkiva v telesu zanemarljivi (Čakš et al., 2002).

Doze, ki jo prejme pljučno tkivo zaradi vdihanega radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov, ne moremo izmeriti. Lahko jo le ocenimo s pomočjo modelnih raziskav. V dozimetričnem modelu ob upoštevanju zgradbe dihalnih poti, mehanizmov usedanja aerosolov in njihovega odstranjevanja ter fizioloških parametrov dihanja ovrednotimo učinke sevanja na celice. Podajamo jih kot dozne pretvorbene faktorje (*DCF*). V dozimetriji radona je dozni pretvorbeni faktor definiran kot razmerje med izmerjeno ekvivalentno dozo na pljuča, izraženo v mSv in izpostavljenostjo radonovim razpadnim produktom, izraženim v WLM ali Bq m^{-3} . Vrednosti *DCF* lahko bazirajo na rezultatih epidemioloških študij (*DCF_E*) ali so izračunane z dozimetričnimi modeli (*DCF_D*).

Dozimetrični pristop preračunavanja doznega pretvorbene faktorja (*DCF_D*) je bil šele pred kratkim vključen v problematiko radona, s strani raziskovalne skupine prof. Birchalla (Birchall and James, 1994). *DCF_D* je izračunan na podlagi spremenjenega respiratornega modela človeka (ICRP, 1994). Parametri, ki, po mnenju prof. Birchalla v največji meri vplivajo na *DCF_D* v sledečem zaporedju so: delež nevezanih radonovih razpadnih produktov, koncentracija in velikostna porazdelitev aerosolov, velikost nevezanih aerosolnih delcev in drugi (Birchall and James, 1994). Z deležom nevezanih radonovih razpadnih produktov lahko izračunamo dozni pretvorbeni faktor (*DCF_D*), kjer je povezava med f_{un} in *DCF* prikazana empirično z izrazom (13) v poglavju 2.3. Delež nevezane potencialne energije alfa f_{un} povzroči za en velikostni razred večjo dozo na pljuča, kot enak delež potencialne energije alfa, ki je vezana na zračne delce (Nero Jr., 1988).

3 EKSPERIMENTALNI DEL

V tem poglavju bom predstavila in obravnavala merilne tehnike, ki sem jih uporabila in opisala merilna mesta ter potek meritev. Podrobneje bom predstavila kontinuirni merilnik radona in njegovih razpadnih produktov EQF 3020-2 ter merilna instrumenta za kontinuirno merjenje radona AlphaGuard in RadonScout.

Raziskavo radona in njegovih razpadnih produktov sem zasnovala tako, da sem v radonski komori v laboratoriju in v stanovanju kontinuirno merila koncentracije Rn in RnDP, F , f_{un} , temperaturo in relativno vlažnost zraka. Te meritve nam omogočajo kontinuirni merilniki EQF 3020-2, ki sem jih uporabila v svoji raziskavi. Na merilnih

mestih so meritve potekale z kontinuirnima merilnikoma EQF 3020-2, dopolnjene pa so bile z merilnikoma RadonScout in AlphaGuard. Beležila sem tudi aktivnosti v prostoru, kjer so meritve potekale, ter režim prezračevanja. Pri statistični analizi podatkov me je najbolj zanimal vpliv meteoroloških parametrov in bivanjskih navad na F in f_{un} . Poiskala sem tudi korelacije med koncentracijo Rn in RnDP, med F in koncentracijo Rn, med koncentracijo Rn in RnDP ter F na eni strani in f_{un} na drugi strani.

Meritve radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov sem v okviru svojega diplomskega dela izvajala v jesensko – zimskih mesecih leta 2007, od septembra do novembra.

V diplomskem delu sem se osredotočila na dejavnike, ki vplivajo na koncentracijo radona v notranjem zraku, zato parametrov zunanjega ozračja nisem merila in vključila v razpravo. Za boljše razumevanje o gibanju radona v stanovanju in o koncentracijah, podajam tudi opis stavbe, njene gradbene materiale in geološko podlago, na kateri stoji.

3.1 Merilne tehnike

3.1.1 Načini merjenja radona in njegovih razpadnih produktov

Metode za merjenje radona in njegovih kratkoživih razpadnih produktov se razlikujejo med seboj glede na vrsto merjenega sevanja, čas merjenja in način vzorčenja.

Meritve radona in njegovih razpadnih produktov temeljijo na detekciji sevanj α , β ali γ žarkov, ki nastajajo pri radioaktivnih razpadih. Večina metod temelji na detekciji α sevanja, katerega izvor je lahko neposredni razpad radona ali pa razpad njegovih kratkoživih razpadnih produktov. Merilne tehnike se razlikujejo glede na čas trajanja meritve in jih delimo v *integralne*, *trenutne* in *kontinuirne* meritve. Pri integralnih meritvah dobimo povprečne koncentracije radona. Pri trenutnih meritvah ugotavljamo koncentracijo v zraku na eni točki, po principu enkratnega odvzema vzorca. Kontinuirne meritve dajejo časovno odvisnost koncentracij na merjenem mestu v krajših časovnih intervalih skozi daljše obdobje, največkrat 1 do 2 tedna. Glede na način vzorčenja delimo tehnike na *aktivne* in *pasivne*. Pri aktivni tehniki naprava črpa zrak preko detektorja in poleg radona meri tudi druge parametre. Pri pasivnih detektorjih pa se vzorčenje najpogosteje odvija preko difuzije, končni rezultat pa je podan kot povprečna vrednost za določeno merilno obdobje.

3.1.2 Kontinuirni merilnik radonovih razpadnih produktov EQF 3020-2

V svoji raziskavi sem uporabila merilni instrument EQF 3020-2 (Streil et al., 1996). Ena meritev traja 2 uri: najprej črpalka črpa zrak s pretokom $2,4 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1}$ preko filtra za odstranjevanje večjih prašnih delcev (nad $1 \mu\text{m}$), preko mrežice za ločitev nevezanih (velikosti pod 50 nm) od vezanih RnDP in preko dveh ločenih polvodniških detektorjev (150 mm^2), ki sta na negativni napetosti glede na ohišje komore, tako da se na njih deponirajo razpadni produkti, in sicer na enem vezani in na drugem nevezani. Ko je

črpanje končano, se prične štetje, ki traja do polnih 2 ur, ko se izpišejo in shranijo rezultati meritve: koncentracija radona, koncentracije posameznih radonovih razpadnih produktov (posebej vezanih in nevezanih), koncentracija potencialne energija alfa (posebej vezane in nevezane) in ravnotežna enakovredna koncentracija radona. Poleg tega nam instrument izmeri tudi temperaturo in relativno vlažnost zraka. Nato se začne naslednje črpanje in s tem naslednja meritev.

Dobljeni rezultati so prikazani in shranjeni v interni spomin merilnika, ob koncu vsakega dve-urnega cikla. Podatke prenesemo na osebni računalnik in jih obdelamo (v našem primeru s pomočjo programa Excel). Merilno območje za radon je od 2 Bq m^{-3} do 10 MBq m^{-3} , za radonove razpadne produkte v nevezani in v vezani obliki pa od 2 Bq m^{-3} do 500 kBq m^{-3} . Tehnika omogoča določitve zelo nizkega dela aktivnosti radonovih razpadnih produktov, ki niso vezani na aerosole.



Slika 5. Kontinuirni merilnik radona in njegovih razpadnih produktov EQF 3020-2. (Sarad Instruments...EQF 3020)

3.1.3 Kontinuirni merilnik radonovih razpadnih produktov RadonScout

Merilnik RadonScout ($175 \text{ mm} \times 135 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$) je primeren za dolgotrajnejše meritve koncentracij radona. V prostoru kontinuirno meri koncentracijo radona ter sočasno še temperaturo in relativno vlažnost zraka. Priklučitev na vir elektrike ni potrebna, saj zmogljiva baterija omogoča večmesečne meritve. Merilno območje radona je od 50 Bq m^{-3} do 1 MBq m^{-3} . Radon difundira v merilno komoro. Polvodniški detektor na negativni napetosti (50 V) lovi ionizirane radonove razpadne produkte. Z alfa spektroskopijo izračuna koncentracijo aktivnosti radona glede na razpadne konstante zbranih razpadnih produktov. Podatke prenesmo na računalnik z direktno povezavo na modem (analogni, ISDN, GSM), lahko tudi med samim delovanjem merilnika, omogočen je grafični izpis le-teh. Zaradi visoke občutljivosti merilnika bodo variacije o aktivnostih koncentracijah detektirane pravilno, četudi so te koncentracije nizke. Zaradi difuzijskega načina delovanja, vpliva torona na rezultat ni.



Slika 6. Kontinuirni merilnik radona RadonScout. (Sarad Instruments...RadonScout)

3.1.4 Kontinuirni merilnik radona AlphaGuard

Prenosni kontinuirni merilni sistem AlphaGuard omogoča merjenje radona, temperature, relativne vlažnosti zraka in zračnega tlaka. Kapaciteta spomina omogoča shranjevanje podatkov do 6 mesecev. Posamezen cikel merjenja traja 1 uro, merilno območje za radon je od 2 Bq m^{-3} do 2 MBq m^{-3} . Detektor temelji na pulzni ionizacijski komori. Zrak, ki ga analiziramo, prehaja z difuzijo skozi filter iz steklenih vlaken v ionizacijsko komoro z volumnom $0,56 \text{ dm}^3$. Notranja površina komore je kovinska, na sredini pa je vzdolž komore nameščena elektroda. Med to elektrodo in ohišjem komore je električno polje visoke napetosti (+750 V). Z razpadom α pride do ionizacije zraka v komori, nabiti delci potujejo proti elektrodi, tok ki ga merimo, pa je sorazmeren množini α delcev. Meritve radonovih razpadnih produktov s tem merilnikom niso mogoče (Genitron Instruments, 1998). Podatke z internega spomina prenesemo na osebni računalnik in tako je možna nadaljnja obdelava podatkov.



Slika 7. Kontinuirni merilnik radona AlphaGuard (Genitron Instruments, 1998).

Vsi instrumenti so bili v času dobave umerjeni v laboratorijih proizvajalcev, od takrat dalje pa jih preverjajo pri proizvajalcih vsaki dve leti, dodatno pa še na mednarodnih in domačih interkomparacijskih meritvah.

3.2 Merilna mesta in potek meritev

Meritve sem izvedla v:

- radonski komori Centra za radon v Odseku za znanosti o okolju na Institutu Jožef Stefan, v kateri sem izvedla dva poskusa pri različnih eksperimentalnih pogojih, in sicer:
 - pri občasnem odpiranju pokrova komore, s čimer sem simulirala prezračevanje v bivalnem okolju,
 - pri prepihanju komore s sušilnikom za lase, s čimer sem simulirala razmere v bivalnem okolju, ki jih povzroči gibanje ljudi in odpiranje vrat med prostori

sočasno sem meritve izvajala tudi v sobi-laboratoriju, v kateri stoji radonska komora

- bivanjskem okolju (svojem stanovanju), kjer sem študirala vpliv različnih dejavnosti na vrednosti merjenih parametrov, in sicer:
 - prezračevanje, gibanje, kuhanje, cvrtje, uporaba pečice, kajenje in sesanje v kuhinji
 - prhanje v kopalnici
 - za podrobnejšo sliko o koncentracijah in gibanju radona v stanovanjski zgradbi sem postavila merilnik radona tudi v klet, ki je predstavljala nekakšno referenčno merilno mesto.

3.2.1 Opis laboratorija

Laboratorij obsega 32 m², v višino meri 3 m. Digestorija in delovni pult zasedajo večji del laboratorija, ob njih pa so v prostoru še omare in aparature. Prostor ima razmeroma veliko število površin, na katere bi se RnDP lahko posedli oziroma odložili. V laboratoriju sta dve večji okni.

3.2.2 Opis radonske komore

Komora (500 mm × 500 mm × 300 mm) in volumna 75 dm³ je bila zasnovana tako, da zagotavlja zadostno tesnitev in tako preprečuje mešanje z zrakom v prostoru (slika 8). Ogrodje komore je iz aluminija, pokrov iz pleksi stekla. Dno komore smo tesno zaprli z gumo (5 mm) in dodatno ovili z lepilnim trakom, da smo zagotovili dobro tesnjenje. Luknji v strani komore, ki sta namenjeni za priklop podaljška na vir električne energije, smo zatesnili s tesnilnim kitom. Med poskusi je bila komora postavljena na tla laboratorija.



Slika 8. Komora.

Kot vir radona v komori smo uporabili ročno uro (slika 9), ki ima na številčnici in kazalcih nanešen premaz iz ^{226}Ra z aktivnostjo 4 kBq. Ker stekleni pokrov ne tesni, iz ure izhaja radon, ki lahko doseže v komori maksimalno koncentracijo do 12 kBq m^{-3} . Ura je last Centra za radon, ki skrbi za njeno dokumentacijo in ustrezno hranjenje.



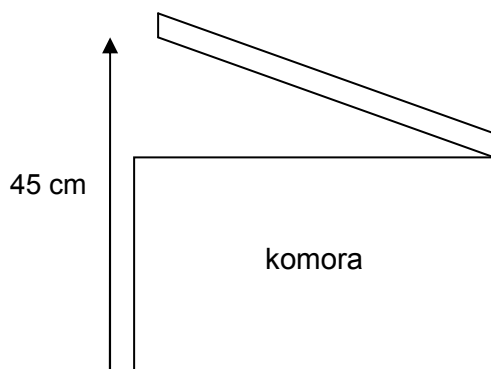
Slika 9. Ročna ura, vir radona.

3.2.3 Potek meritev v laboratoriju in v radonski komori

V komoro smo postavili izvor radona in kontinurna merilnika EQF 3020-2 in AlphaGuard, ter ju priključili na vir električne energije preko podaljška, ki smo ga postavili v komoro ob merilnika. Instrument AlphaGuard sem postavila v komoro kot referenčni instrument za primerjavo koncentracij radona.

V prvem poskusu v komori sem študirala kako odpiranje pokrova komore vpliva na spremembe v koncentraciji radona in razpadnih produktov ter na F in f_{un} . Pri poskusu odpiranja komore smo pazili, da je bil pokrov komore vsakokrat odprt pod enakimi pogoji (45 cm od tal), vendar za različno dolge čase: 5 s, 10 s, 20 s, 1 min in 5 min. V ta namen sem uporabljala meter in tako vsakič zagotovila isto višino odprtega pokrova

(višina odprtega pokrova je 15 cm, površina odprtine je 750 cm², volumen komore je 75 dm³). Odpiranje komore je shematsko prikazano na sliki 10.



Slika 10. Shematski prikaz odpiranja komore

V drugem poskusu s preprihovanjem s sušilnikom za lase sem študirala kako gibanje zraka, predvsem pa večja množina aerosolov v zraku komore (zaradi uporabe sušilnika se iz tal in sten zopet dvigajo v zrak) vpliva na spremembe v koncentraciji radona in razpadnih produktov ter na F in f_{un} . Sušilec las (fen) smo vstavili v komoro in ga vklapljali preko podaljška za različno dolge čase, in sicer tako, da komore nismo odpirali. Preprihovanje je trajalo različno dolgo: 0,5 min, 1 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min in 60 min.

Sočasno s poskusoma v komori so potekale meritve radona in razpadnih produktov ter F in f_{un} v radonskem laboratoriju, in sicer od 21. septembra do 11. oktobra 2007. V laboratoriju smo kontinuirni instrument EQF 3020-2 postavili na laboratorijski pult sredi prostora, oddaljen približno 90 cm od tal in okrog 3,5 m od vrat in od oken. V laboratoriju so bili običajni delovni pogoji, vse aktivnosti (vklop digestorijev, električnega grelca, odprta / zaprta vrata laboratorija) v času trajanja eksperimenta smo beležili. Vse poskuse (odpiranje in preprihovanje) v komori smo izvajali vedno nekaj minut (1 do 5) pred ciklom črpanja zraka merilnikov.

3.2.4 Bivanjsko okolje

Drugi del raziskave sem izvedla v svojem stanovanju (kuhinja in kopalnica), kjer sem merila iste parametre kot v laboratoriju in radonski komori (C_{Rn} , C_{RnDP} , F , f_{un} , RH , T), dodatno pa sem koncentracijo radona izmerila še v kleti stanovanjskega bloka.

Geološka podlaga okoliša zgradbe - stanovanjskega bloka, v kateri sem izvajala meritve je sledeča. Stanovanje se nahaja v Mengšu, v občini Domžale, kjer prevladujejo pretežno glinasti sedimenti kvartarne (holocenske) starosti v vzhodnem delu občine, oziroma kvartarni prodni zasip Kamniške Bistrice in Pšate v osrednjem in zahodnem delu občine. Najstarejše kamnine so permkarbonski peščenjaki, skrilavci in meljevci, ki se nahajajo predvsem severozahodno od Rov, v tem delu se pojavljajo tudi kremenovi peščenjaki, peščenjaki, meljevci in skrilavci srednjepermske starosti. V občini Domžale najdemo od avtomorfni tal predvsem tla na apnencih in dolomitih, kjer prevladujejo rjava pokarbonatna tla, manj pa je rendzin. Dosedanje raziskave radona v

zgradbah po Sloveniji povišanih koncentracij na področju občine Domžale niso pokazale (Vaupotič et al., 1994; Vaupotič et al., 2000).

Zgradba - stanovanjski blok v katerem je moje stanovanje, je bil zgrajen leta 1989. Med uporabljenimi materiali pri gradnji objekta sta bila predvsem armiran beton in opeka (votlaki). Zgradba je v celoti podkletena.

Kletni prostor, v katerem je bil merilnik radona RadonScout, obsega 5 m² in meri v višino 2,3 m. Tla so betonska, kakovost gradnje je dobra. Kletni prostor je neposredno pod stanovanjem, v katerem sem izvajala meritve.

Stanovanje je pritlično, kar pomeni, da bi lahko prišlo do vstopa radona iz kleti v stanovanje. Velikost stanovanja je 45 m², v višino meri 2,5 m in je razdeljeno v dve večji sobi, kopalnico, hodnik ter balkon. V stanovanju ni naprave za čiščenje ali hlajenje zraka (klime), tako da prezračevanje poteka le z odpiranjem oken in vrat. Pozimi je stanovanje ogrevano z radiatorji (vroča voda). V nadaljevanju je podrobnejši opis sob, v katerih sta bila merilnika.

Kuhinja ima dve večji okni z zavesami in vrata, ki jo ločijo od ostalih prostorov. Njena velikost je 20 m². Opremljena z kuhinjskim pultom, stenskimi omarami, večjo mizo, v prostoru sta še naslonjač in manjša miza. Glede na velikost kuhinje ima prostor razmeroma veliko površin, na katere se RnDP lahko posedajo.

Kopalnica nima oken. Njena velikost je 8 m², od tega je proste površine dokaj malo, saj ima glede na velikost razmeroma veliko površin (pralni stroj, omara, kopalna kad, stenska omarica). V kopalnici je zračnik, na katerem je ventilator, ki ga je možno vključiti preko stikala in s tem prezračevati prostor.

3.2.5 Potek meritev v stanovanju

Z meritvami v bivanjskem okolju smo želeli ugotoviti, kako na koncentracijo radona in razpadnih produktov vplivajo bivanjske navade posameznika oziroma aktivnosti, ki se v določenem prostoru izvajajo. V ta namen sem v svojem stanovanju, v kuhinji in v kopalnici, z kontinuirnima merilnikoma EQF 3020-2 merila navedene parametre. Meritve v stanovanju so potekale od 8. do 24. novembra 2007. Z dodatnimi meritvami v kleti pa sem želela dobiti čimbolj popolno sliko o koncentracijah in gibanju radona v stavbi. Čeprav sem meritve radona v kleti izvajala približno 2 do 3 tedne kasneje kot v stanovanju, menimo, da bi bila koncentracija v stanovanju lahko odraz koncentracije v kleti, saj se meteorološke razmere, od časa izvajanja meritev v stanovanju do časa izvajanja meritev v kleti, niso bistveno spremenile.

V kuhinji in kopalnici sem beležila čas posamezne aktivnosti (kuhanja, cvrtja, odpiranja in zapiranja oken in vrat, prezračevanja, večje uporabe vode, gibanja stanovalcev, uporabe sesalnika za prah, brisanja prahu, kajenja). Vse večje aktivnosti sem vedno izvajala približno 1 do 20 min pred pričetkom 6 minutnega črpanja zraka posameznega 2 urnega merilnega ciklusa merilnika EQF 3020-2, z namenom, da bi dobila čimbolj popolno sliko o vplivu različnih dejavnosti na spremembe v merjenih parametrih.

Merilnik EQF 3020-2 sem postavila v kuhinjo, kjer je potekalo največ raznolikih aktivnosti zanimivih za naš poskus. Merilnik je bil ves čas poskusa nameščen na istem

mestu, in sicer na trdni površini na višini 60 cm od tal, okrog 1,5 m stran od vrat in 2 m stran od oken (slika 11). Nanj ni bilo direktnega škodnega vpliva zaradi določenih aktivnosti (voda bi lahko zmočila detektor, cvrtje na olju bi lahko uničilo detektor merilnika). Pri poskusih prezračevanja v kuhinji sem odpirala obe okni (na pol odprto, površina odprtine je $0,175 \text{ m}^3$, volumen prostora je $48,5 \text{ m}^3$), medtem, ko so bila vrata prostora zaprta.



Slika 11. EQF 3020-2 v kuhinji.

Merilnik EQF 3020-2 sem postavila v kopalnico na višino 1,3 m, 1 m stran od vrat, na mesto, varno pred možnimi poškodbami in direktnemu vplivu vode (med prhanjem), z namenom preučevanja izhajanja radona iz vode in s tem eventualnega prispevka h koncentraciji radona v prostoru ter vpliva RH na merjene parametre, predvsem na koncentracijo R_n in na delež f_{att} in f_{un} .

Merilnik RadonScout v kleti, kot referenčni instrument, sem postavila na višino 30 cm od tal (slika 12) in ga na tem referenčnem mestu pustila do konca poskusa (2 tedna). V kletnem prostoru stanovanjskega bloka sem meritve radona izvajala od 1. do 16. decembra, ker za istočasno izvajanje meritev v kleti in stanovanju nisem imela razpoložljive merilne opreme. Vplive prezračevanja in aktivnosti v kletnem prostoru nisem spremljala in beležila, saj nas je predvsem zanimala koncentracija radona.



Slika 12. Kontinuirni merilnik radona RadonScout v kleti zgradbe.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Primarni cilj diplomskega dela je bil raziskati, kako na ravnotežni faktor in delež nevezanih radonovih razpadnih produktov vplivajo meteorološki parametri (temperatura, relativna vlažnost zraka) in delovni režim v delovnem okolju (prezračevanje, gibanje v prostoru) ter bivanjske navade v bivanjskem okolju (prezračevanje, gibanje, kuhanje, kajenje). Zanimala nas je predvsem časovna odvisnost koncentracije radona in razpadnih produktov, F in f_{un} ter temperature (T) in relativne vlage (RH).

Prvi del poglavja vsebuje rezultate in razlage poskusov, ki sem jih izvajala v radonski komori, kjer smo simulirali pogoje bivanjskega okolja. Spreminjali smo pogoje v komori in ugotavljali kako vplivajo na koncentracijo radona in njegovih razpadnih produktov v časovni dinamiki. Drugi del tega poglavja pa je namenjen diskusiji rezultatov, dobljenih v prostorih izbranega bivanjskega okolja. Pregledala in analizirala sem rezultate, dobljene v bivanjskem okolju, ter poskušala raziskati vplive različnih dejavnikov na koncentracije radona in radonovih razpadnih produktov in posledično na F in f_{un} . Rezultati so prikazani večinoma v grafični obliki.

4.1 Radonska komora

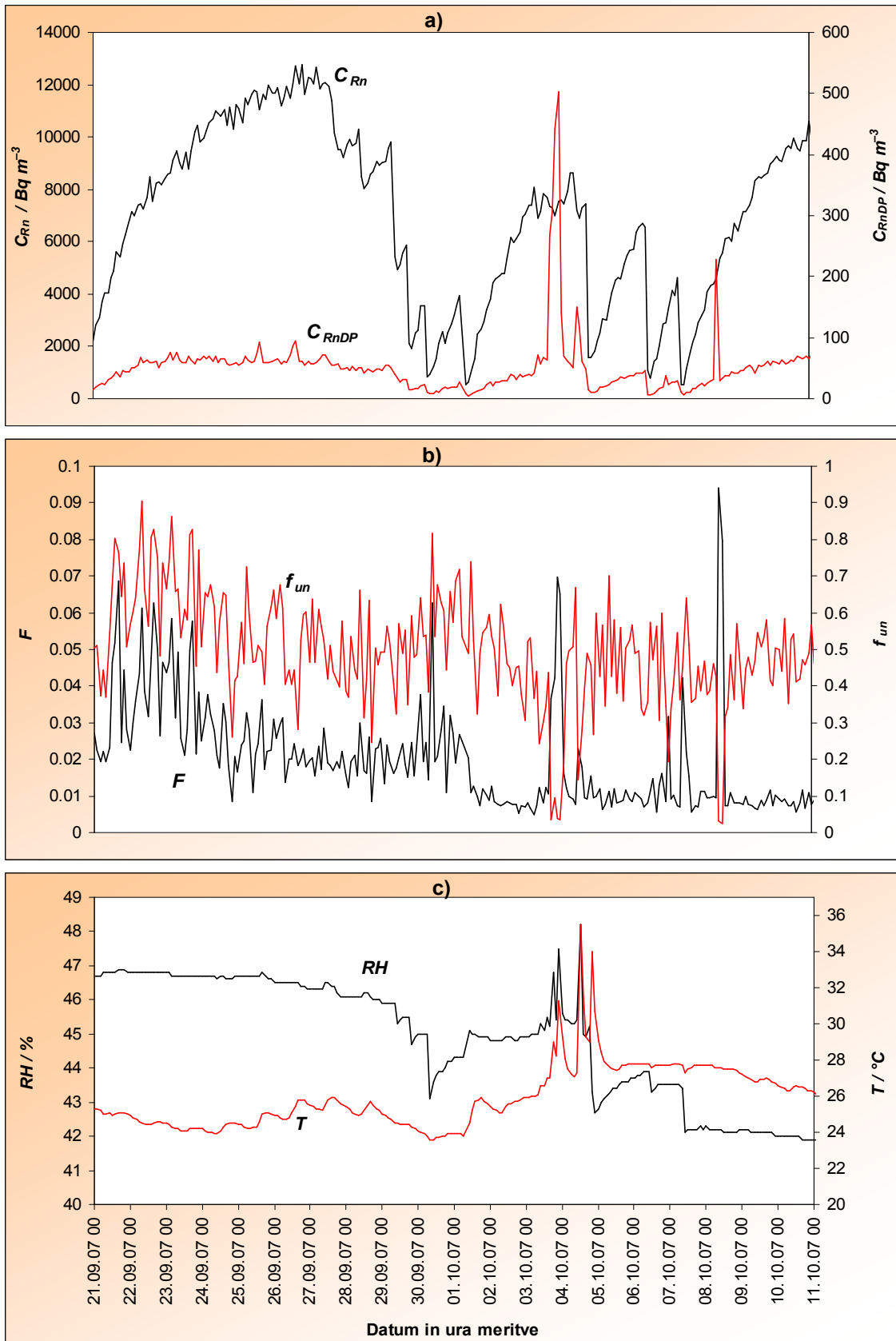
Slika 13 prikazuje časovno odvisnost parametrov: a) koncentracije radona (C_{Rn}) in radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežnega faktorja (F) in deleža nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperature (T) in relativne vlažnosti zraka (RH), merjenih v komori, s kontinuirnim merilnim instrumentom EQF 3020-2 preko celotnega obdobja meritev (od 21. septembra do 11. oktobra, 2007), ki vključujejo dva različna poskusa, in sicer odpiranje pokrova komore za različne čase in prepihanje zaprte komore s sušilcem za lase za različne čase. Poskus z odpiranjem pokrova komore sem izvajala med 27. in 30. septembrom, poskus s prepivanjem pa sem izvajala med 3. in 5. oktobrom. Rezultate poskusov (odpiranja pokrova in prepihanja komore) posebej obravnavam in so prikazani v nadaljevanju. Prikazani so tudi rezultati meritev (slika 13) po končanem poskusu prepihanja od 5. do 11. oktobra. Pri ponovnih poskusih prepihanja komore je prišlo zaradi pregretja sušilca za lase do okvare. Rezultate tega dela poskusa grafično prikažem, vendar jih zaradi obsežnosti in kompleksnosti razprave, v razpravo ne vključim.

Opaznih je več nihanj v koncentraciji radona in razpadnih produktov v posameznih časovnih intervalih (slika 13a), kjer so koncentracije radona od 500 Bq m^{-3} do 12 kBq m^{-3} , koncentracije radonovih razpadnih produktov pa od 10 do 500 Bq m^{-3} . Ker smo v komoro postavili vir radona, je po pričakovanju koncentracija radona naraščala. Po približno štirih dneh je dosegla maksimalno vrednost 12 kBq m^{-3} . Koncentracija RnDP je bila precej nižja, zato imamo tudi nizko povprečno vrednost ravnotežnega faktorja, le $0,006$. Vzrok za nizke koncentracije RnDP je v majhnem volumnu komore, velikih odlagalnih površinah in nizki koncentraciji aerosolnih delcev. Domnevamo, da so se skoraj vsi radonovi razpadni produkti (vezani in nevezani) posedli na površine v komori (dno, stene, merilnika EQF 3020-2 in AlphaGuard, ura, podaljšek za priključek električnega toka). Domnevamo, da se je del RnDP tudi 'vezal-prilepil' na elektrostatično pleksi-steklo, ki je služilo, kot pokrov komore.

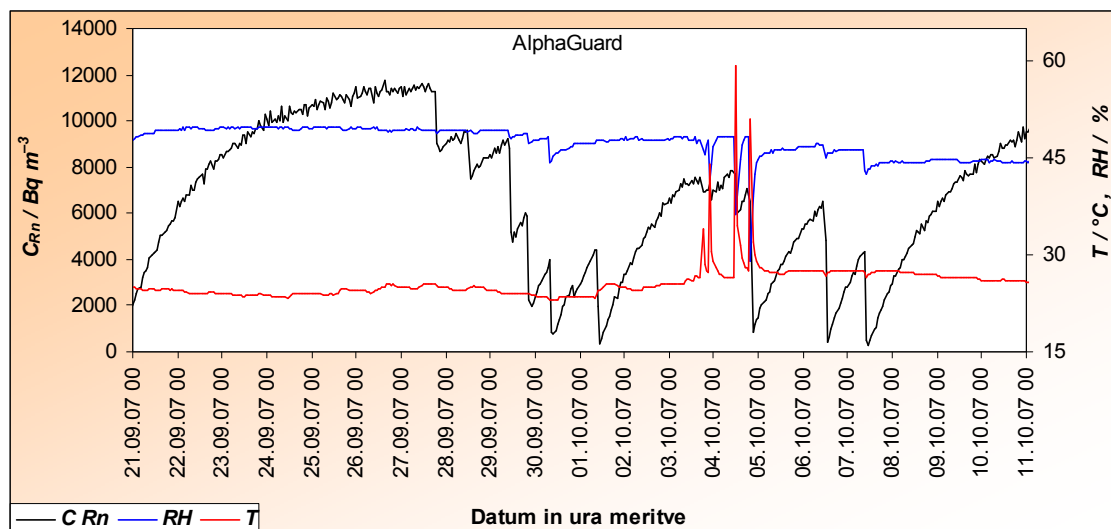
Radon je bil detektiran v znatno višjih koncentracijah, saj je plin in se tako ne veže na aerosolne delce in se ne poseda. Posedanje delcev in s tem razpadnih produktov, kot tudi posedanje nevezanih razpadnih produktov, pripisujemo zelo mirnemu okolju tesno zaprte komore, kjer mešanja zraka praktično ni bilo. Radonovi razpadni produkti so se hitro posedli in jih tako v zraku komore, od koder merilnik črpa, ni preostalo veliko. Pomembno je poudariti, da v je v zaprti komori koncentracija radona naraščala, medtem, ko dodatnega vnosa aerosolnih delcev v komoro ni bilo in se tako novo nastali RnDP niso imeli na kaj vezati. Če je koncentracija aerosolov bistveno nižja, je pričakovati bistveno večji delež nevezanih razpadnih produktov, to pa se odraža v zelo nizkem ravnotežnem faktorju. Ravnotežni faktor je bil med 0,005 in 0,09 (slika 13b). Vrednosti f_{un} nihajo med 0,02 in 0,90. Ker je bila v komori koncentracija aerosolov nizka, se je vezal le manjši del RnDP, večji del RnDP pa je ostal nevezan. Visoka povprečna vrednost f_{un} (0,50), potrjuje nizko povprečno vrednost F v komori (0,02). Sicer pa se te vrednosti med različnimi poskusi zelo spreminjajo.

Na sliki 13c je prikazan potek temperature in relativne vlažnosti zraka v komori. Temperatura v komori je od 23, 5 do 35,5 °C, relativna vlažnost zraka pa od 42 % do 47,5 %. Večja nihanja se pričakovano, pojavljajo med izvajanjem poskusov. Predvsem me je zanimal vpliv RH na f_{un} , saj naj bi zvišanje vlage v zraku povečalo velikost aerosolnih delcev, s tem se poveča stopnja vezave RnDP na aerosole, kar pa znižuje f_{un} (Chu and Liu, 1996). Med celotno meritvijo v komori ni opaziti jasno izražene korelacije med RH in f_{un} .

Kot omenjeno, so bile meritve v komori dopolnjene z kontinuirnim merilnikom AlphaGuard, ki je služil kot referenčni instrument. Tovrstni merilni sistemi merijo koncentracijo radona, temperaturo, relativno vlažnost zraka in zračni tlak. Rezultati meritev z merilnikom AlphaGuard (slika 14) so pokazali majhno odstopanje od vrednosti, ki smo jih dobili za iste parametre z kontinuirnim merilnikom EQF 3020-2.



Slika 13. Časovna odvisnost merjenih parametrov v komori v obdobju od 21. septembra do 11. oktobra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).



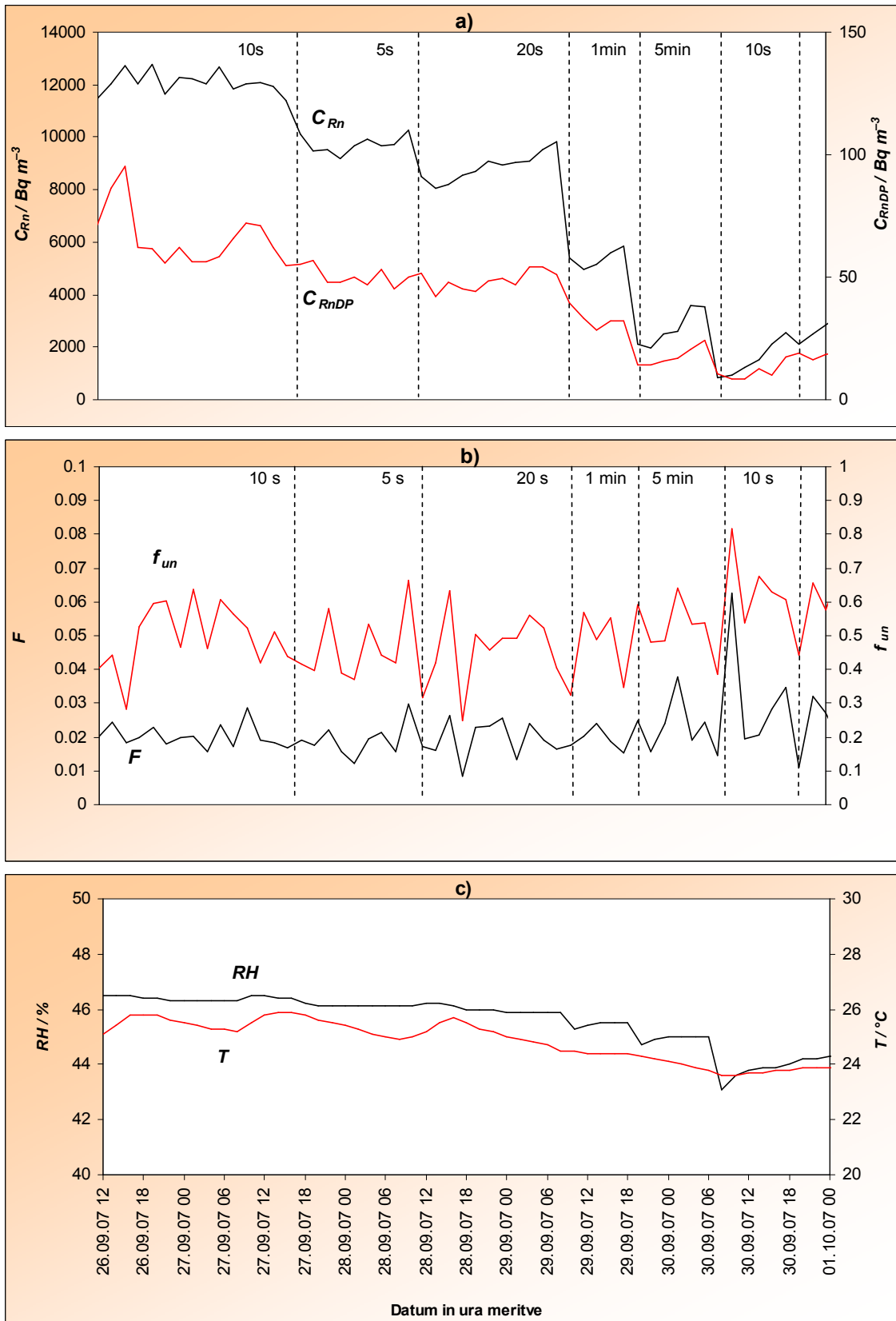
Slika 14. Časovna odvisnost merjenih parametrov: koncentracije radona (C_{Rn}), temperature (T) in relativne vlažnosti zraka (RH) v komori, merjenih z merilnikom AlphaGuard v obdobju od 21.septembra do 11. novembra 2007.

4.1.1 Poskus 1. Odpiranje pokrova komore za različno dolge čase

S poskusom odpiranja pokrova komore sem poskušala simulirati proces zniževanja koncentracije radona zaradi prezračevanja prostorov. Zanimalo me je, kako odpiranje pokrova komore, ki simulira odpiranje vrat in oken v bivanjskem okolju, za različno dolge čase vpliva na koncentracijo radona in v kolikšni meri. Odpiranje pokrova komore je pri vseh eksperimentih potekalo enako (slika 10), komora pa je bila odprta različno dolgo, in sicer od nekaj sekund do 5 minut. Vsako odpiranje sem izvedla tako, da sem komoro ponovno zaprla 1 minuto pred ponovnim črpanjem, da bi si s tem pridobila čimbolj natančno sliko o dogajanju v komori zaradi odpiranja pokrova komore.

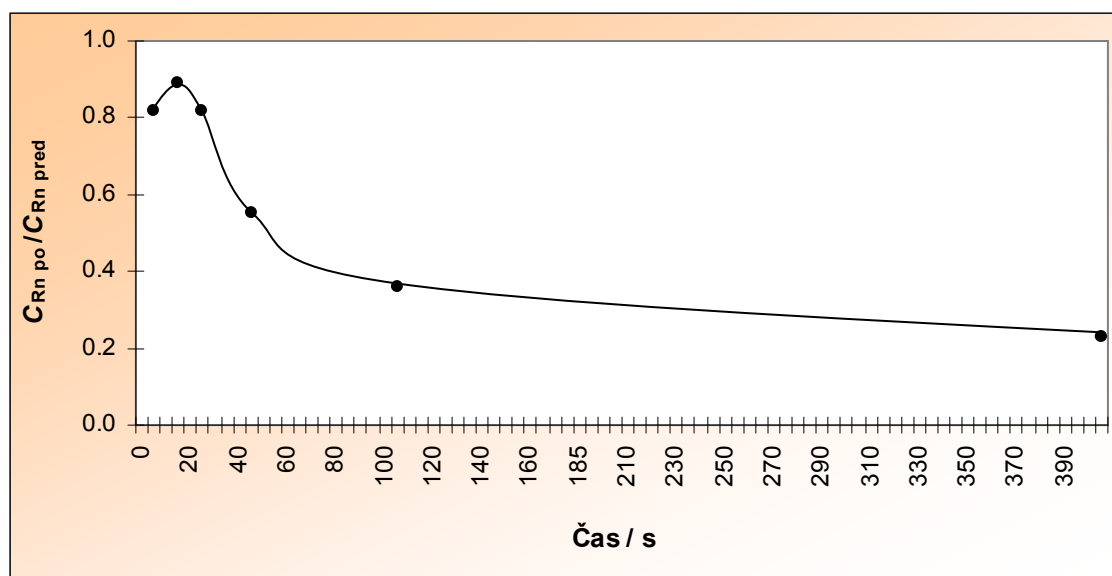
Odpiranje pokrova komore je povzročilo izrazito znižanje v koncentraciji radona (slika 15a). Prekinjene navpične črte (slika 15a in 15b) označujejo beleženo koncentracijo ali vrednost merjenega parametra takoj po tem, ko sem pokrov odprla za določen čas. Časi (10 s, 5 s, 20 s, 1 min, 5 min) označeni na levi strani črt označujejo trajanje odprtja pokrova oziroma koliko časa je bil pokrov komore odprt (slika 15a in 15b).

Največje znižanje v koncentraciji radona se pojavi na dan 29. septembra, ko sem odprla pokrov za 20 sekund. Kljub temu, da so bili časi odpiranja pokrova po tem datumu daljši, znižanja v koncentracijah niso bila več tolikšna. Zaradi znižane koncentracije radona v komori po treh odpiranjih pokrova padec koncentracije ni več tako izrazit. Ta poskus jasno demonstrira, kako prezračevanje (odpiranje pokrova komore) v primeru visokih koncentracij v zaprtem prostoru, znižuje koncentracijo radona. Seveda tega poskusa ne moremo direktno aplicirati v bivanjsko in delovno okolje, ki se lahko bistveno razlikujejo od komore, vidimo pa, da prezračevanje znatno znižuje koncentracijo radona. Ko smo prenehali z odpiranjem pokrova komore, se je vrednost Rn pričela ponovno zviševati, kar je instrument zaznal običajno po drugi meritvi (4 urah).



Slika 15. Časovna odvisnost merjenih parametrov v komori v obdobju od 26. septembra do 1. oktobra 2007 med poskusom 1 (odpiranje pokrova): a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).

Padanje radona zaradi odpiranja pokrova komore je prikazano grafično na sliki 16. Pri odprtju pokrova za 5 do 10 sekund je padec koncentracije radona le do 20 %, pri odprtju za 20 sekund do 50 %, pri odprtju za 1 minuto do 65 % in pri 5 minutah je padec koncentracije radona do skoraj 80 %.



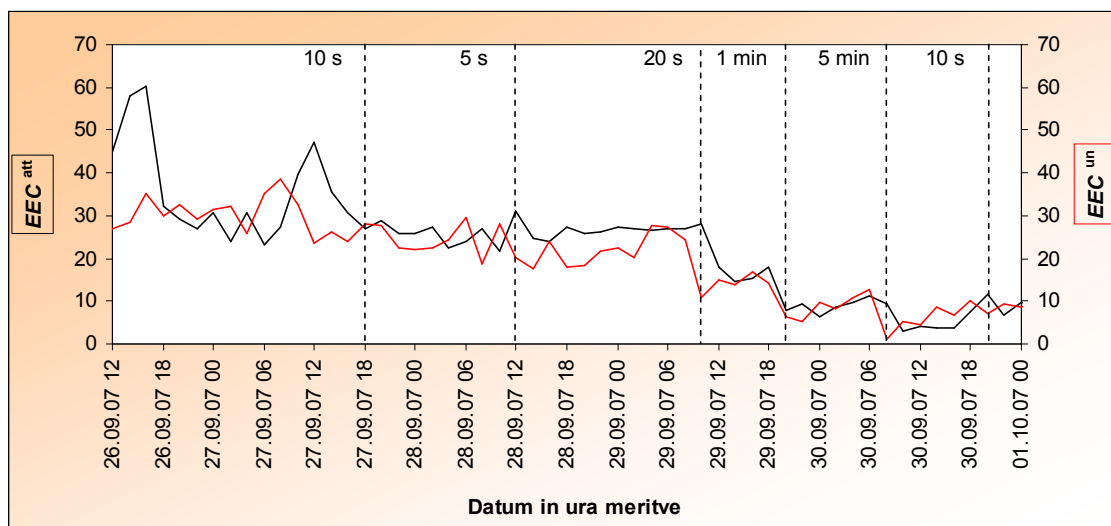
Slika 16. Znižanje koncentracije radona v komori po odpiranju pokrova za različne čase (5s, 10s, 20s, 60s in 300s) med poskusom 1 (odpiranje pokrova).

Pri poskusu odpiranja pokrova komore se zniža tudi koncentracija RnDP (slika 15a), saj se zrak iz komore meša z zrakom iz laboratorija, kjer je koncentracija Rn in RnDP nižja kot v komori. Koncentracija RnDP se postopoma znižuje in po prenehanju poskusa pade na 20 % povprečne vrednosti.

Na sliki 15b je prikazana odvisnost F od f_{un} med poskusom odpiranja pokrova komore za različno dolge čase. Opazimo, da se vrednost f_{un} v vseh primerih, razen enkrat (1 min odprt pokrov) zniža, medtem ko se vrednost F ponekod zviša, ponekod zniža. Za vsako odpiranje komore sem iskala korelacijo med f_{un} in F , T ter RH . Pričakovane negativne korelacije med F in f_{un} ni bilo opaziti, pojavi se celo rahla pozitivna korelacija (slika 18.1). Domnevamo, da kjer so koncentracije RnDP zelo nizke, zvišanje deleža nevezanih RnDP povzroči istočasno zvišanje F , saj tista frakcija, ki prevladuje, določa F , v našem primeru je to nevezana frakcija. Sicer se F in f_{un} nista bistveno spreminjala med poskusom odpiranja komore, po prenehanju odpiranja pokrova komore, ko je bila C_{Rn} zelo znižana, pa je opaziti narast v F in f_{un} . To pripisujemo dejstvu, da kjer je koncentracija radona nizka, je koncentracija RnDP višja in posledično tudi F . Ker pa je večji del RnDP nevezan, se zviša tudi f_{un} .

Temperatura in relativna vlažnost se v času odpiranja pokrova znižata in sledita temperaturi in relativni vlažnosti v zraku laboratorija (slika 15c). Temperatura se med poskusom odpiranja ne zniža več kot za 2°C, relativna vlažnost zraka pa se zniža iz začetnih 46,5 % na 43 %. Spremembe v temperaturi in vlažnosti zraka niso velike in je težko oceniti vpliv na F in f_{un} . Pojavi se rahla negativna korelacija med f_{un} in RH (slika 18.2).

Zanimalo me je, kako odpiranje pokrova komore vpliva na razmerje vezane in nevezane frakcije RnDP. Prikazan je časovni potek enakovredne ravnotežne koncentracije vezanih RnDP (EEC^{att}) in nevezanih RnDP (EEC^{un}) (slika 17). Odpiranje komore je povzročilo spremembe v vrednostih vezane in nevezane frakcije RnDP, vendar vezana rahlo prevladuje. To smo pričakovali, saj smo z odpiranjem pokrova vnesli aerosolne delce. Vendar predvidevamo, da jih v zraku laboratorija ni bilo veliko in tako je bil narast v vezani frakciji, glede na nevezano, minimalen. Ob narastu vezane frakcije se nevezana zniža (slika 17).



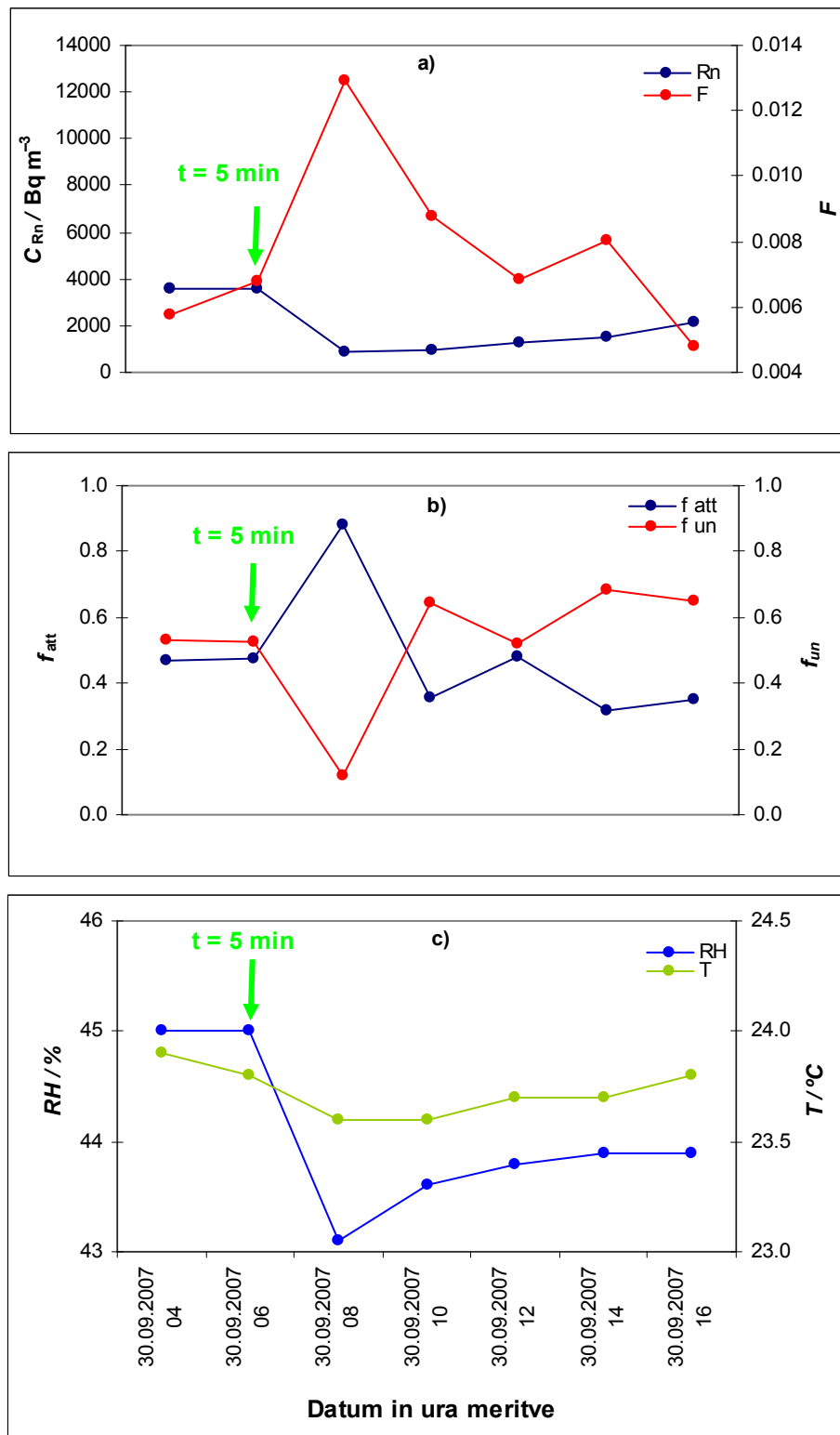
Slika 17. Časovna odvisnost ravnotežne enakovredne koncentracije vezanih RnDP (EEC^{att}) in nevezanih RnDP (EEC^{un}) v komori med poskusom 1 (odpiranje pokrova).

V tabeli 3 so zbrane vrednosti merjenih parametrov neposredno pred odpiranjem pokrova in 2 uri po odpiranju (1. meritve). Faktor po/pred je pri Rn pri različno dolgo odprti komori padel od 0,89 do 0,23, delež RnDP pa je padel do 0,45 ali narasel do 1,07. Najbolj izrazita je rast F , od 1,10 vse do 2,58. Pri deležu f_{att} smo razen v četrtem poskusu zaznali povišanje, od 1,14 do 1,87, pri f_{un} pa pri istih poskusih ustrezno znižanje, od 0,22 do 0,86. Meritve RH in T so pokazale odstopanja za faktor manj kot 0,01 od vrednosti pred odpiranjem pokrova komore. Vidimo, da je najbolj izrazita sprememba večine merjenih parametrov pri poskusu, ko smo pokrov komore odprli za 5 minut in se je zrak v komori dodobra zmešal z zrakom iz laboratorija. Rezultate tega poskusa podajam tudi v grafični obliki (slika 18), saj najbolj nazorno kažejo soodvisnost merjenih parametrov in njihovo spreminjanje.

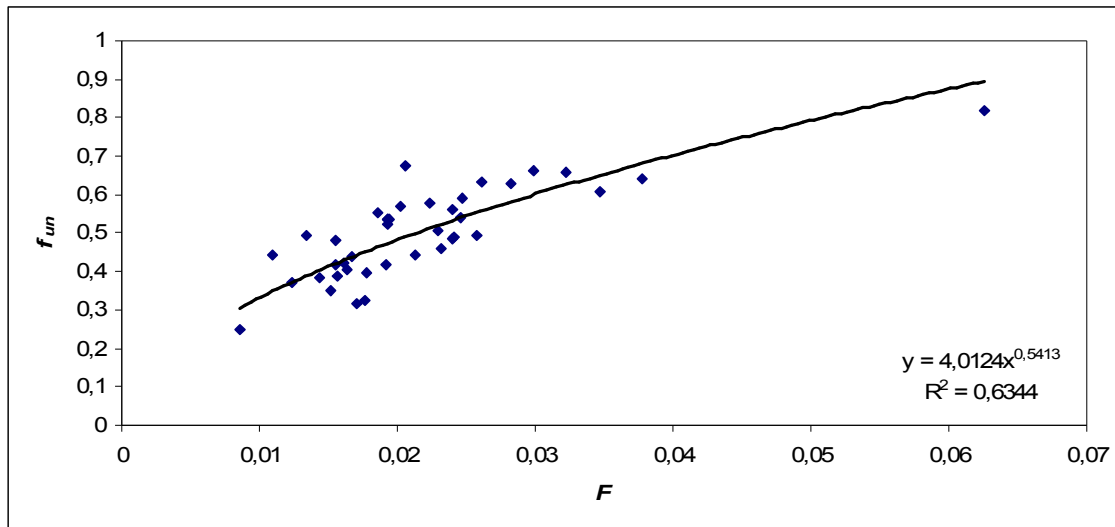
Vsak graf na sliki 18 kaže rezultate 7 zaporednih meritev s pričetkom 2 uri pred odpiranjem pokrova komore in zaključkom 10 ur po odpiranju pokrova. Na sliki 18 vidimo, da koncentracija radona pade in je po 2 urah na okrog 20 % začetne vrednosti, nato prične zaradi prisotnosti izvora v komori zopet naraščati. V 10 urah naraste za faktor 2,55. Po odprtju komore je zelo izrazit porast F , za faktor 18,97, ki pa v naslednjih 2 urah pade za faktor 0,68 in se v naslednjih 6 urah še zniža. Delež f_{un} se zniža iz 0,53 na 0,12, kar je 0,22 začetne vrednosti, vendar v naslednjih urah zopet raste in je po 10 urah zopet 0,65. Ustrezno se po odprtju komore zviša delež f_{att} , ki s 0,47 naraste na 0,88, vendar v naslednjih urah zopet pada in je po 10 urah le še 0,35.

Tabela 3. Merjeni parametri a) pred in b) po odprtju pokrova komore ter c) delež po/pred.

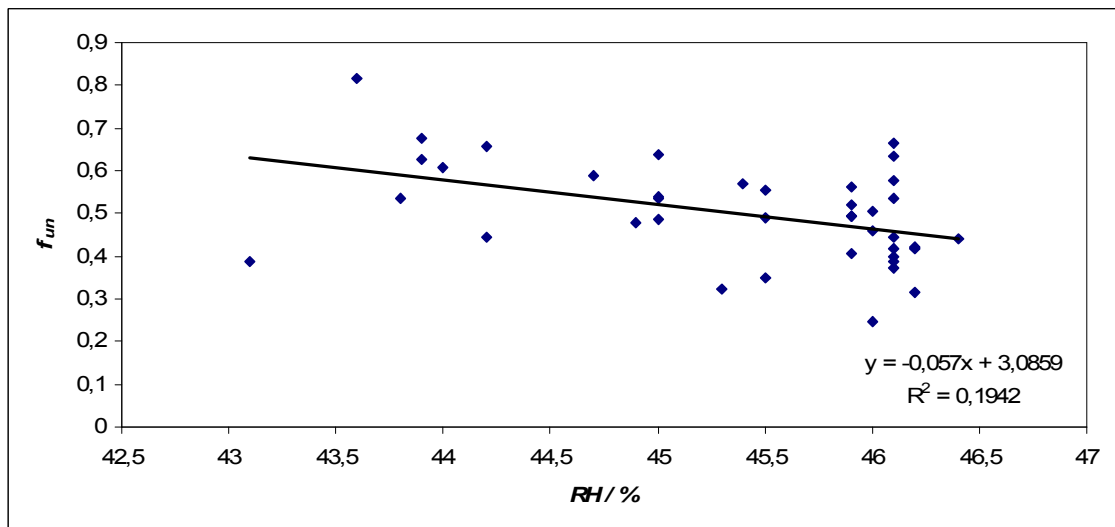
$C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$	$C_{RnDP} / \text{Bq m}^{-3}$	F	f_{att}	f_{un}	$RH / \%$	$T / ^\circ\text{C}$
27.9.2007 16:00 (10 sekund)						
a) 11384	54,6	0,021	0,49	0,51	46,4	25,9
b) 10136	55,0	0,023	0,56	0,44	46,2	25,8
c) 0,89	1,01	1,10	1,14	0,86	0,996	0,996
28.9.2007 10:00 (5 sekund)						
a) 10288	50,0	0,020	0,44	0,56	46,1	25,0
b) 8478	51,6	0,023	0,61	0,39	46,2	25,2
c) 0,82	1,03	1,15	1,39	0,70	1,002	1,008
29.9.2007 8:00 (20 sekund)						
a) 9826	51,3	0,020	0,53	0,47	45,9	24,5
b) 5415	39,2	0,025	0,72	0,28	45,3	24,5
c) 0,55	0,76	1,25	1,36	0,60	0,987	1,000
29.9.2007 18:00 (1 minuta)						
a) 5861	31,9	0,021	0,56	0,44	45,5	24,4
b) 2100	14,2	0,029	0,56	0,44	44,7	24,3
c) 0,36	0,45	1,38	1,00	1,00	0,982	0,996
30.9.2007 6:00 (5 minut)						
a) 3561	24,2	0,019	0,47	0,53	45,0	23,8
b) 836	10,8	0,049	0,88	0,12	43,1	23,6
c) 0,23	0,45	2,58	1,87	0,22	0,958	0,992
30.9.2007 18:00 (10 sekund)						
a) 2577	17,6	0,024	0,42	0,58	44,0	23,8
b) 2113	18,9	0,019	0,62	0,38	44,2	23,9
c) 0,82	1,07	0,79	1,48	0,66	1,005	1,004



Slika 18. Časovna odvisnost merjenih parametrov v komori 30. septembra 2007 pri odprtju pokrova komore za 5 minut: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in ravnotežni faktor (F), b) delež vezanih (f_{att}) RnDP in nevezanih RnDP (f_{un}), c) relativna vlaga (RH) in temperatura (T).



Slika 18.1. Odvisnost f_{un} - deleža nevezanih RnDP od F - ravnotežnega faktorja v komori med poskusom 1 (odpiranje pokrova).



Slika 18.2 Odvisnost f_{un} - deleža nevezanih RnDP od RH- relativne zračne vlažnosti v komori med poskusom 1 (odpiranje pokrova).

4.1.2 Poskus 2. Preprihanje komore za različne čase

Ker smo želeli podrobneje preučiti obnašanje RnDP, predvsem njihovo vezavo na aerosolne delce in posedanje na površine, sem komoro preprihovala s sušilnikom za lase različno dolge čase, in sicer od 1 do 35 minut, vedno tako, da sem preprihanje prekinila 1 minuto pred pričetkom črpanja, da smo dobili čimbolj natančno sliko o vplivu preprihanja komore na merjene prametre. Fen sem vklapljal in izklapljal izven komore preko električnega podaljška. Datumi in čas preprihanja s fenom so prikazani v tabeli 4.

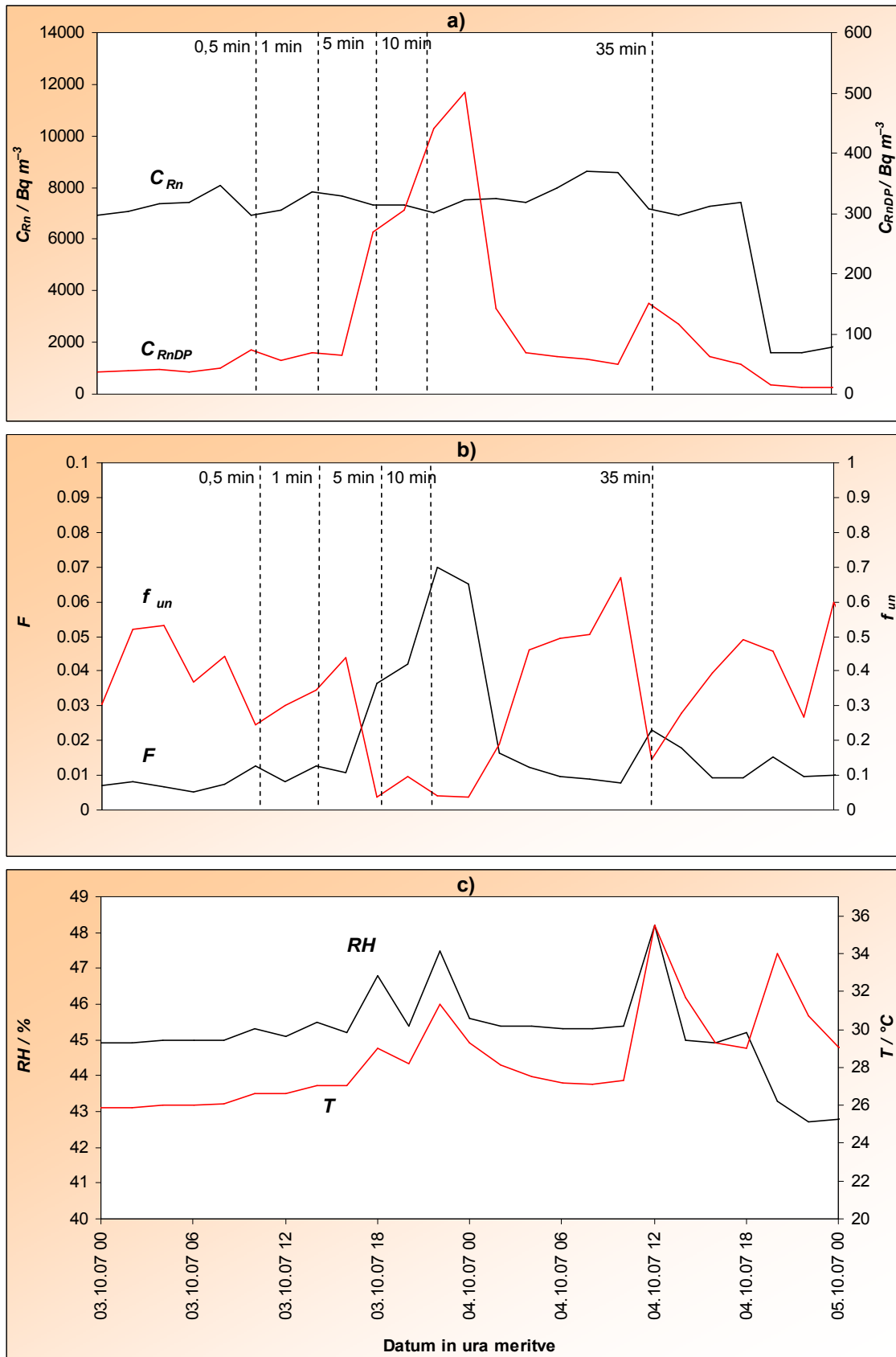
Prekinjene navpične črte (slika 19a in 19b) označujejo beleženo koncentracijo ali vrednost merjenega parametra po tem, ko sem komoro preprihovala za določen čas.

Časi (10 s, 5 s, 20 s, 1 min, 5 min) označeni na levi strani črt označujejo trajanje prepihanja komore s fenom (slika 19a in 19b).

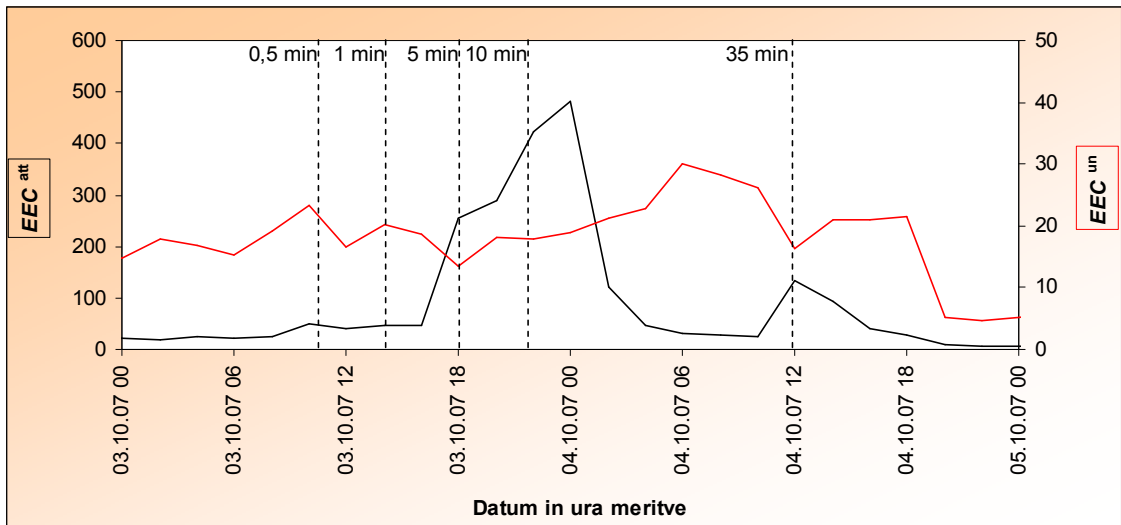
Kot pričakovano, prepihanje s fenom ni bistveno vplivalo na koncentracijo radona, medtem ko se koncentracija radonovih razpadnih produktov v določenem časovnem intervalu izrazito zviša. Po prvih dveh krajših prepihanjih ni bilo opaznih sprememb v prikazanih parametrih (slika 19). Ko smo komoro prepihovali za daljši čas (5 in 10 minut), vezana frakcija RnDP močno naraste in delež nevezanih RnDP pade (slika 19a in 19b). Povišanje vezanih RnDP se odraža tudi na zvišanem F , ki se iz povprečne vrednosti 0,02 zviša na 0,075, obenem pa f_{un} pade iz povprečne vrednosti 0,50 na 0,03. V zelo kratkem času (nekaj ur) se RnDP ponovno posedejo, kar povzroči padec vrednosti F in ponovno zvišanje f_{un} . Opazna je negativna korelacija med f_{un} in F (slika 20.1), ki je med poskusom 2 (prepihanje) bolj izražena kot pri poskusu 1 (odpiranje pokrova).

Predvidevamo, da smo s prepihanjem komore s fenom povzročili dvig posedlih vezanih RnDP, kar se odraža v zvišanih koncentracijah EEC^{att} (slika 20). Koncentracija EEC^{att} se tako po treh poskusih prepihanja zviša za faktor okrog 10, EEC^{un} pa rahlo pade. S prepihanjem smo verjetno povzročili tudi prehoden porast nevezane frakcije, ki se je že posedla na površine v komori in to je povzročilo sočasno rahlo zvišanje EEC^{un} pri 1 min trajajočem prepihanju. EEC^{un} nato pade zaradi intenzivnejše vezave na aerosole, katerih število v zraku se s prepihanjem poveča.

V tabeli 4 so zbrane vrednosti merjenih parametrov neposredno pred prepihanjem in 2 uri po prepihanju komore. Vidimo, da se koncentracija Rn med prepihanjem le malo spremeni (faktor po/pred je od 0,96 do 1,08). RnDP znatno narastejo šele po 5 in 10 min prepihanju, kar se odraža tudi v vrednosti F . Po pričakovanju je najbolj zaznaven porast f_{att} , po 5 min prepihanju njen delež naraste iz 0,71 na 0,95 (faktor po/pred 1,34), po nadaljnjem 10 min prepihanju pa iz 0,94 na 0,96 (faktor po/pred je 1,02). Seveda se ustrezno zniža delež f_{un} , po 5 min prepihanju pade iz 0,29 na 0,05 (faktor po/pred je 0,17), po nadaljnjem 10 min prepihanju pa iz 0,06 na 0,04 (faktor po/pred je 0,66). Po 35 min prepihanju komore naslednji dan se RnDP znižajo, kar ima za posledico znižanje F . Ker je po prepihanju na razpolago več aerosolov, imamo izrazit porast deleža f_{att} , iz 0,47 na 0,89 (faktor po/pred je 1,89) in padec f_{un} , iz 0,53 na 0,11 (faktor po/pred je 0,21). Relativna vlažnost v komori med poskusi prepihanja rahlo narašča, od 45,0 % do 48,2 %, prav tako temperatura, od 26,1 do 31,8 °C. Dvig temperature je zaradi delovanja sušilca za lase večji. Ker pa so spremembe RH in T relativno majhne, menimo, da ima najbolj izrazit vpliv na spremembe F in deleža f_{un} porast števila aerosolov, ki se med prepihanjem dvigajo z odloženih površin v zrak. Pa vendar je negativna korelacija med f_{un} in RH (slika 20.2) pri poskusu 2 (prepihanje) bolj izražena kot pri poskusu 1 (odpiranje pokrova).



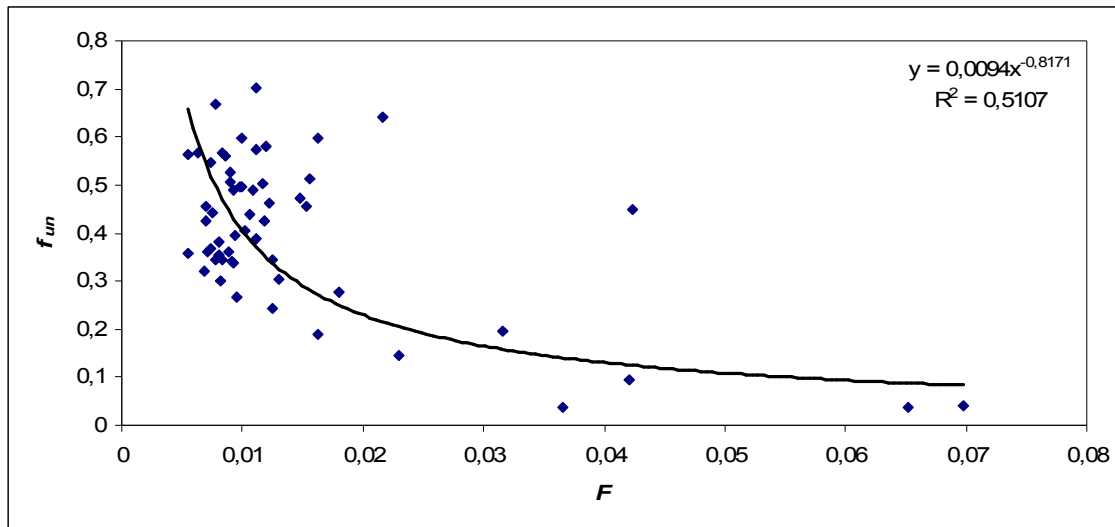
Slika 19. Časovna odvisnost merjenih parametrov v komori v obdobju od 3. do 5. oktobra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlaga (RH) med poskusom 2 (prepihovanje).



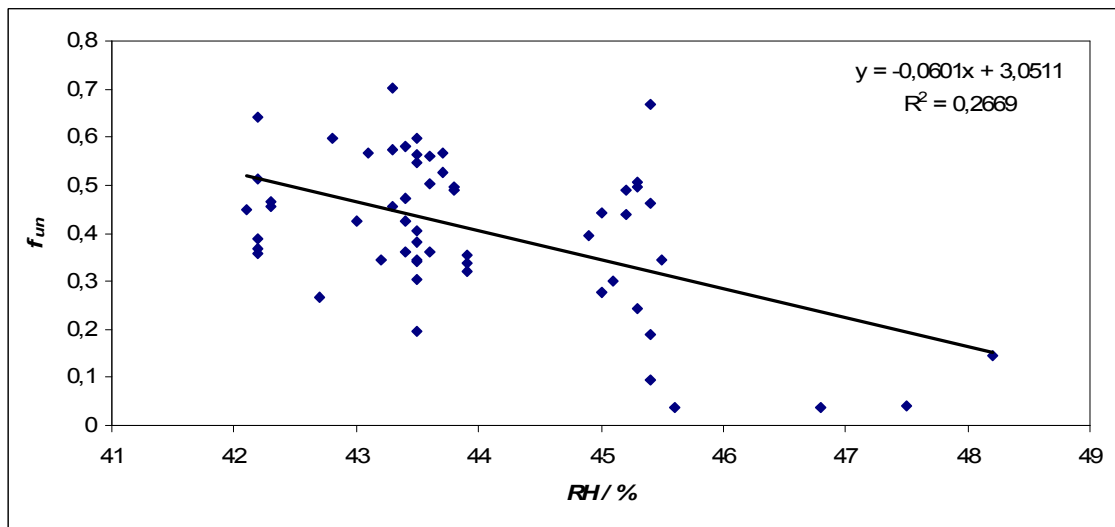
Slika 20. Časovna odvisnost ravnotežne enakovredne koncentracije vezanih RnDP (EEC^{att}) in nevezanih RnDP (EEC^{un}) med poskusom 2 (prepihovanje).

Tabela 4. Merjeni parametri a) pred in b) po prepihovanju komore ter c) delež po/pred

C_{Rn} / Bq m ⁻³	C_{RnDP} / Bq m ⁻³	F	f_{att}	f_{un}	RH / %	T / °C
3.10.2007 9:55 (prepihovanje 0,5 min)						
a) 6900	73	0,011	0,56	0,44	45,0	26,1
b) 7132	56	0,008	0,68	0,32	45,3	26,6
c) 1,03	0,77	0,73	1,21	0,73	1,007	1,019
3.10.2007 13:55 (prepihovanje 1 min)						
a) 7843	68	0,009	0,71	0,29	45,1	26,6
b) 7677	64	0,008	0,70	0,30	45,5	27,0
c) 0,98	0,94	0,89	0,99	1,03	1,009	1,015
3.10.2007 17:50 (prepihovanje 5 min)						
a) 7345	268	0,036	0,71	0,29	45,2	27,0
b) 7319	306	0,042	0,95	0,05	46,8	29,0
c) 0,996	1,14	1,17	1,34	0,17	1,035	1,074
3.10.2007 21:45 (prepihovanje 10 min)						
a) 7003	441	0,063	0,94	0,06	45,4	28,2
b) 7540	502	0,067	0,96	0,04	47,5	31,8
c) 1,08	1,14	1,06	1,02	0,66	1,046	1,128
4.10.2007 11:25 (prepihovanje 35 min)						
a) 7191	150	0,021	0,47	0,53	45,4	27,3
b) 6909	115	0,017	0,89	0,11	48,2	35,5
c) 0,96	0,77	0,81	1,89	0,21	1,062	1,300



Slika 20.1 Odvisnost f_{un} - deleža nevezanih RnDP od F - ravnotežnega faktorja v komori med poskusom 2 (prepihovanje).



Slika 20.2 Odvisnost f_{un} - deleža nevezanih RnDP od RH - relativne zračne vlažnosti v komori med poskusom 2 (prepihovanje).

4.1.3 Rezultati meritev v laboratoriju

Koncentracija radona v laboratoriju je v območju od 88 do 227 Bq m^{-3} in se bistveno ne spreminja (slika 21a). Povprečna koncentracija radona v laboratoriju je 140 Bq m^{-3} . Izračunali smo, da se zaradi odpiranju komore (poskus 1) koncentracija radona v laboratoriju zviša za 2 do 4 Bq m^{-3} , kar pa so vrednosti v okviru instrumentalnih napak instrumenta in jih zato z meritvami nismo zaznali. Vzrok za tako majhen prispevek komore h koncentraciji radona v laboratoriju je velika razlika med volumnom komore ($0,075 \text{ m}^3$) in volumnom laboratorija ($94,5 \text{ m}^3$).

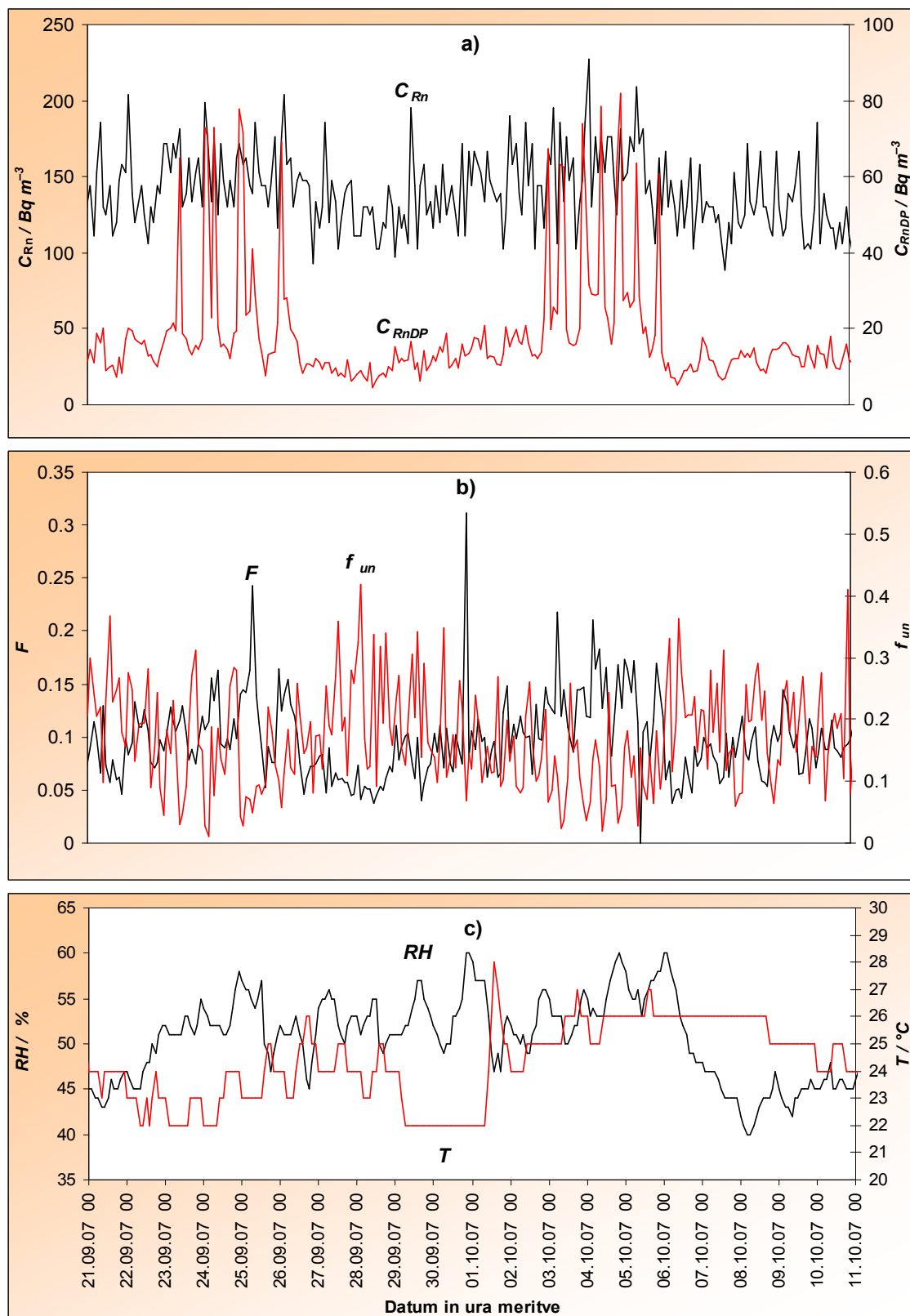
Radonovi razpadni produkti so v območju od 4 do 82 Bq m^{-3} s povprečno koncentracijo 18 Bq m^{-3} . Porasta RnDP v obdobju od 27. do 30. 9 in od 3. do 6. 10. nista povezana s poskusi v komori temveč z delovnim režimom oziroma dejavnostmi v laboratoriju (slika

21a). V zraku laboratorija je zaradi intenzivnega prezračevanja razmeroma nizka koncentracija RnDP, zato je nizka tudi vrednost ravnotežnega faktorja, od 0,03 do 0,50, s povprečno vrednostjo 0,13. Pojavita se dve večji zvišanji vrednosti F , in sicer 25. septembra ob 8 uri in 30. septembra ob 22 uri (slika 21.2). V obeh primerih v prostoru ni bilo posebnih aktivnosti, zato je vzrok težko pojasniti. V prvem primeru je bil to delovni dan, v drugem primeru pa dela prost dan, ko v prostoru ni bilo nikogar. Na sliki 21.2 je lepo vidna obratno sorazmerna zveza med koncentracijo radona in F .

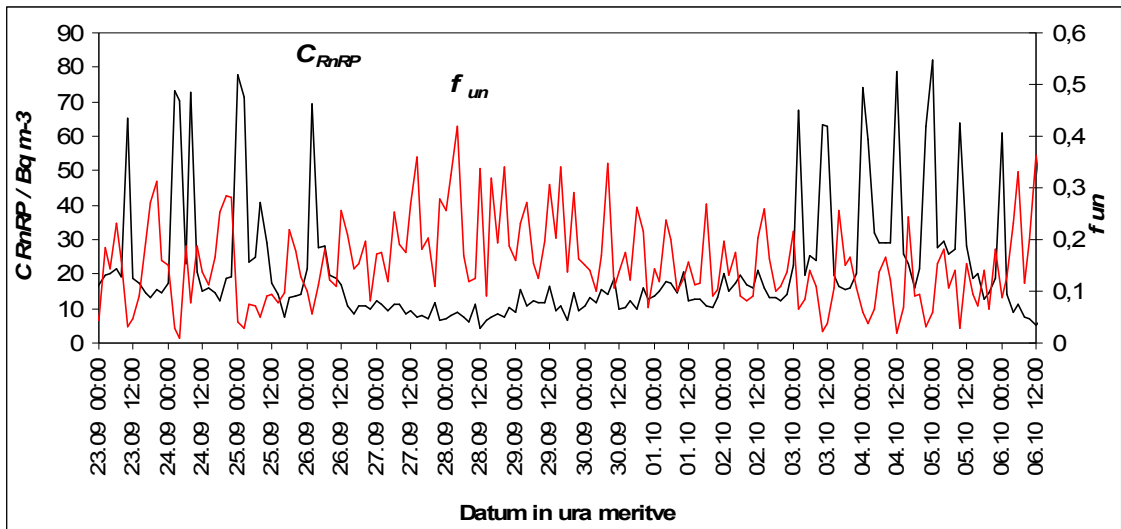
Delež f_{un} je v radonskem laboratoriju od 0,01 do 0,59 s povprečno vrednostjo 0,13 in je podoben kot v vrtcih in šolah. V vrtcih je bila geometrična srednja vrednost f_{un} 0,14 in v šolah 0,12 (Vaupotič and Kobal, 2006; Vaupotič, 2007). Na sliki 21b vidimo, da povišanje F spremlja padec deleža f_{un} , vendar pa ta trend ni zelo jasno izražen. Prav tako ni opaziti večjih razlik v vrednostih F in f_{un} v času delovnika v primerjavi z vikendom. Ob zvišanju v koncentraciji razpadnih produktov, se delež nevezanih razpadnih produktov zniža (slika 21.1), medtem ko se F zviša.

Temperatura je bila v območju od 22,0 do 28,0 °C s povprečno vrednostjo 24,3 °C, relativna vlažnost pa od 40,0 do 60 % s povprečno vrednostjo 50,7 % (slika 21c). Zaradi gretja laboratorija s kaloriferjem se v času delovnika pojavi zvišanje temperature, ki pa pade med soboto in nedeljo. Večjega vpliva temperature in relativne vlažnosti zraka na C_{Rn} in C_{RnDP} , nismo opazili, prav tako ne na f_{un} .

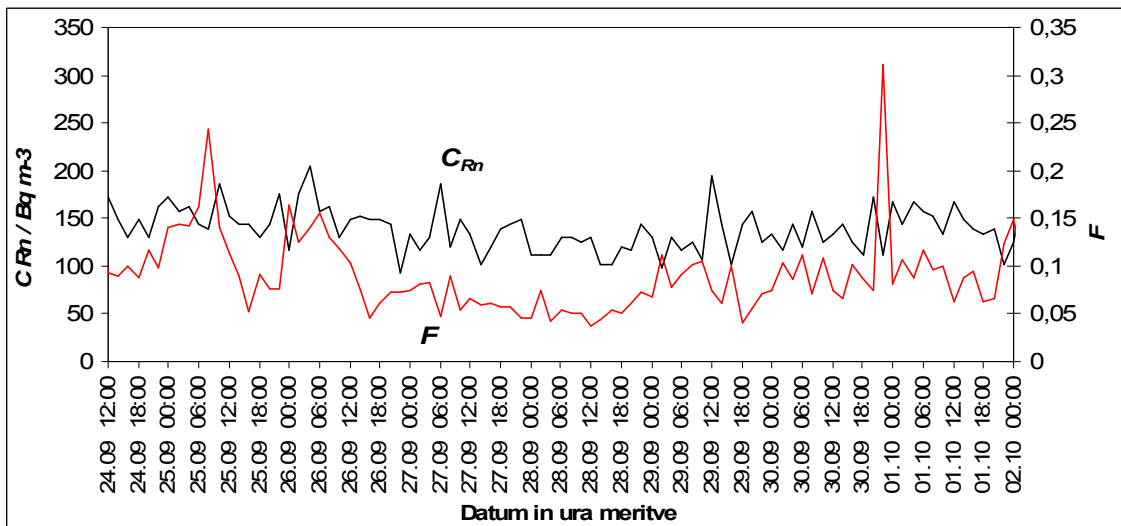
Zaradi nizkih koncentracij merjenih parametrov v laboratoriju je tudi vpliv zraka iz laboratorija na poskus odpiranja komore relativno majhen.



Slika 21. Časovna odvisnost merjenih parametrov v laboratoriju v obdobju od 21. septembra do 11. oktobra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).



Slika 21.1. Časovna odvisnost koncentracije radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}) in deleža nevezanih razpadnih produktov (f_{un}) v laboratoriju času od 23. septembra do 6. oktobra 2007.



Slika 21.2. Časovna odvisnost koncentracije radona (C_{Rn}) in ravnotežnega faktorja (F) v laboratoriju času od 23. septembra do 6. oktobra 2007..

4.2 Bivanjski prostor

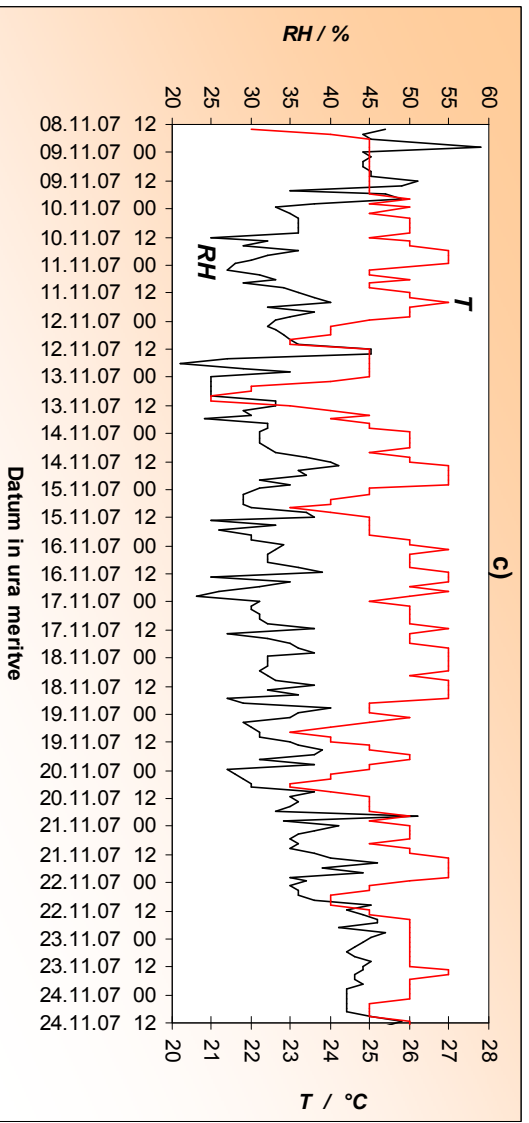
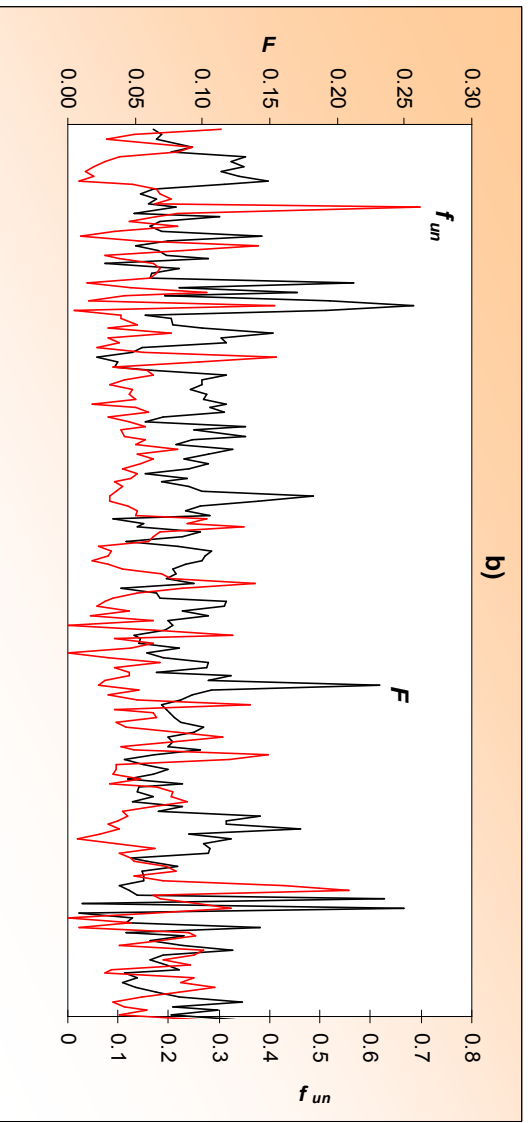
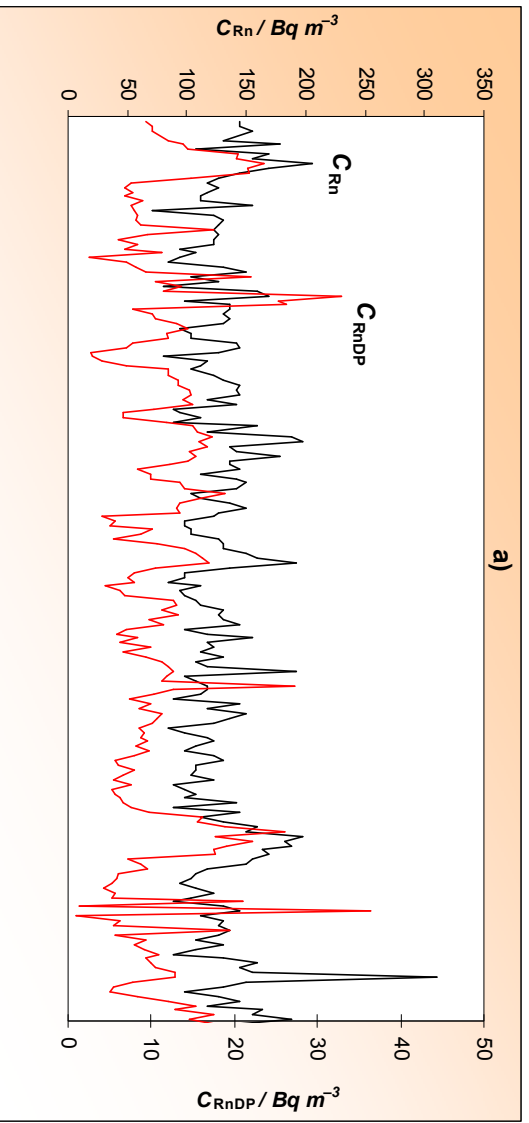
Pri meritvah v stanovanju namenjam največjo pozornost rezultatom iz kuhinje, kjer je potekalo največ različnih aktivnosti, ki bi lahko vplivale na spremembe vrednosti merjenih parametrov. Raziskovala sem, kako prezračevanje prostora vpliva na znižanje C_{Rn} , predvsem pa me je zanimalo, ali in v kakšni meri vpliva povišanje aerosolnih delcev v zraku prostora zaradi določenih dejavnosti, na razmerje vezanih in nevezanih RnDP.

4.2.1 Kuhinja

Koncentracija radona v kuhinji precej niha in je nekajkrat dosega vrednosti do 200 Bq m^{-3} , vendar se v nekaj urah izrazito zniža (slika 22a). Povprečna koncentracija radona v kuhinji je v časovnem intervalu od 8. do 24. novembra 128 Bq m^{-3} . Najvišjo vrednost je dosegla 23. novembra ob 16 uri, in sicer 310 Bq m^{-3} . Vzrok za povišanje koncentracije je kopičenje radona v kuhinji zaradi zaprtih vrat in oken. Koncentracija radona je naraščala ponoči, vse do jutra, ker tega dne oken in vrat nismo odpirali, se je koncentracija radona zvišala za približno 150 % glede na povprečno vrednost. V času meritve se je koncentracija radona še petkrat zvišala za približno 100 % in dosegla vrednosti od 190 do 200 Bq m^{-3} , v glavnem pa koncentracija radona ne presega 150 Bq m^{-3} .

Vzrok za povišane koncentracije radona je v vseh primerih zmanjšano prezračevanje. Ker sem meritve izvajala v zimskem času, tudi prezračevanje ni tako aktivno kot sicer. Opazno je, da se koncentracija radona povzpne ponoči in doseže najvišjo vrednost proti jutru. Glavni vzrok je v zaprtih oknih in vratih, vendar je možnih vzrokov za povišano koncentracijo več, kot na primer: povišana koncentracija radona v kleti in podobno. Podnevi vplivajo na znižanje koncentracije radona aktivnosti v prostoru, kot je prezračevanje (odprta okna, vrata) in gibanje v prostoru (povečano mešanje zraka). V največji meri vpliva na koncentracijo radona prezračevanje, saj se koncentracija radona opazno zniža, ko prostor prezračimo. Koncentracije radonovih razpadnih produktov sledijo koncentracijam radona, njihova povprečna koncentracija je 12 Bq m^{-3} (slika 22a).

Vzrok za velika nihanja v vrednostih ravnotežnega faktorja F (slika 22b) so raznolike aktivnosti, ki so se dogajale v prostoru in vplivale na koncentracijo radonovih razpadnih produktov in tako tudi na vrednost F . Ta se giblje od 0,01 do 0,26, f_{un} pa od 0,01 do 0,70. Povišanja vrednosti F se pojavijo ob povišani koncentraciji vezanih razpadnih produktov, ti pa se zvišajo zaradi aktivnosti v prostoru, ki zvišajo koncentracijo aerosolov. Povprečna vrednost ravnotežnega faktorja v kuhinji je 0,10. Vzrok v nizkem F je majhnost prostora, v katerem je razmeroma veliko površin, na katere se RnDP posedajo. F naraste nad 0,20 petkrat, nato do naslednje meritve (po 2 urah) pade. Povprečna vrednost f_{un} je 0,15, ta naraste preko vrednosti 0,40 dvakrat, 9. novembra ob polnoči in 22. novembra ob 5:30, ko se v prostoru ni izvajala nikakršna aktivnost.



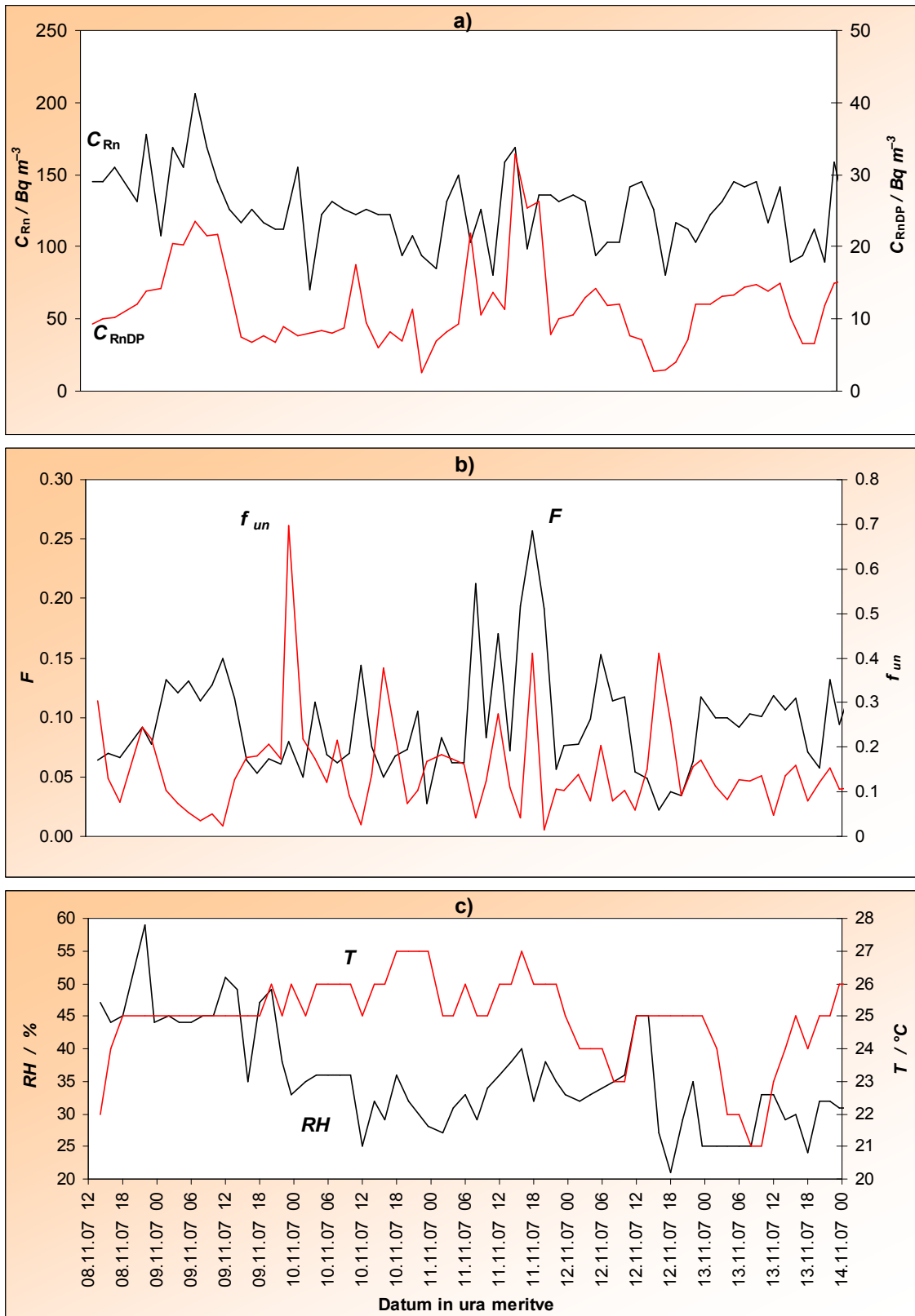
Slika 22. Časovna odvisnost merjenih parametrov v kuhinji v obdobju od 8. do 24. novembra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih $RnDP$ (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).

Temperatura v prostoru je bila od 21 do 27°C (slika 22c). Ta se zniža, ko prostor prezračimo, zviša pa zaradi dejavnosti, kot je kuhanje, ko je več oseb v prostoru, predvsem pa ob uporabi pečice. Relativna vlažnost zraka se giblje med 20 % in 60 %, s povprečno vrednostjo 36 %. Poleg dejavnosti v prostoru pa na relativno vlago v notranjem zraku vpliva tudi vlažnost zraka zunaj. Vlažnost v notranjem zraku se zviša ob dejavnostih, kot so kuhanje, sušenje perila in drugih. Ker je stanovanje razmeroma majhno, je vpliv izvajanih dejavnosti na T in RH toliko večji.

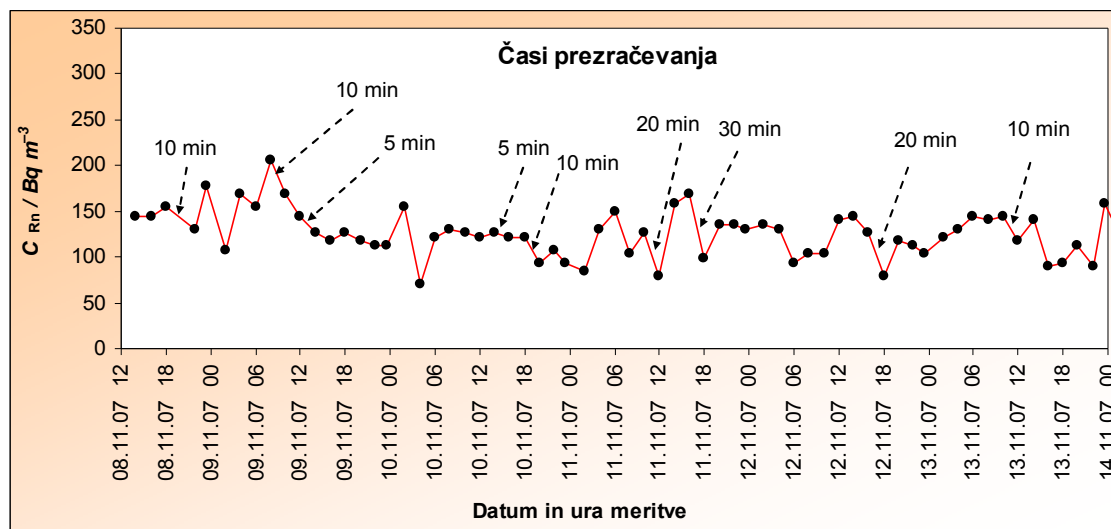
Za podrobnejši prikaz vpliva raznih dejavnikov na spremembe v koncentraciji radona in razpadnih produktov ter F in f_{un} , sem pri grafični predstavitvi rezultatov izbrala krajše časovno obdobje merjenja, in sicer od 8. do 14. novembra. Prikazan je časovni potek C_{Rn} in C_{RnDP} , F in f_{un} ter T in RH v tem časovnem obdobju (slika 23).

Zanimal me je vpliv prezračevanja na koncentracijo radona v kuhinji. S puščicami so (slika 24) označeni različni časi prezračevanja (odpiranja oken), ki sem jih izvajala 1 do 30 minut pred pričetkom 6 minutnega črpanja zraka pri 2 urnem merilnem ciklu merilnika. Delež znižanja v koncentraciji Rn zaradi prezračevanja (odpiranja oken) za različno dolge čase je prikazan v tabeli 5. Po pričakovanju se koncentracija radona najbolj zniža, ko smo prostor prezračevali za najdaljši čas (30 min). Ker pa je koncentracija radona v prostoru dokaj nizka, do večjih znižanj ni prišlo. Koncentracija radona pri 5 min prezračevanju pade za 5 do 15 %, pri 10 min za 5 do 20 %, pri 20 min za 10 do 40 % in pri 30 min tudi za 50 %. To so le približne vrednosti, saj v nekaterih primerih prezračevanja do znižanja v koncentraciji radona ni prišlo ali pa je bilo znižanje glede na čas prezračevanje manjše, kot pričakovano, saj na gibanje zraka v prostoru vpliva več faktorjev in je težko oceniti, v kolikšni meri prezračevanje vpliva na znižanje koncentracije radona. Vendar lahko zaključimo, da je prezračevanje prostora kljub vsemu učinkovit ukrep za znižanje koncentracije radona.

Zanimalo me je tudi, kako določene aktivnosti vplivajo na razmerje vezanih in nevezanih $RnDP$. V kuhinji sem izvajala raznolike aktivnosti (kuhanje, cvrtje, uporaba pečice, kajenje, uporaba sesalnika). Kot že opisano (2.4.1), je vzrok v povišanih vrednostih vezane frakcije v povečani količini aerosolnih delcev, ki so naravnega izvora ali jih ustvarjamo z aktivnostmi, kot kuhanje, cvrtje, kajenje, uporaba sesalnika in drugi. Vpliv teh aktivnosti na koncentracijo vezanih (EEC^{att}) in nevezanih (EEC^{un}) razpadnih produktov je prikazan na sliki 25. Kot je razvidno s slike, prevladuje EEC^{att} . Do tolikšnega nihanja v EEC^{att} in EEC^{un} verjetno prihaja zaradi številnih aktivnosti, ki sem jih izvajala v stanovanju, predvsem pa v kuhinji. Zvišanjem EEC^{att} lahko pripišemo veliko različnih vzrokov.



Slika 23. Časovna odvisnost merjenih parametrov v kuhinji v obdobju od 8. do 14. novembra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).

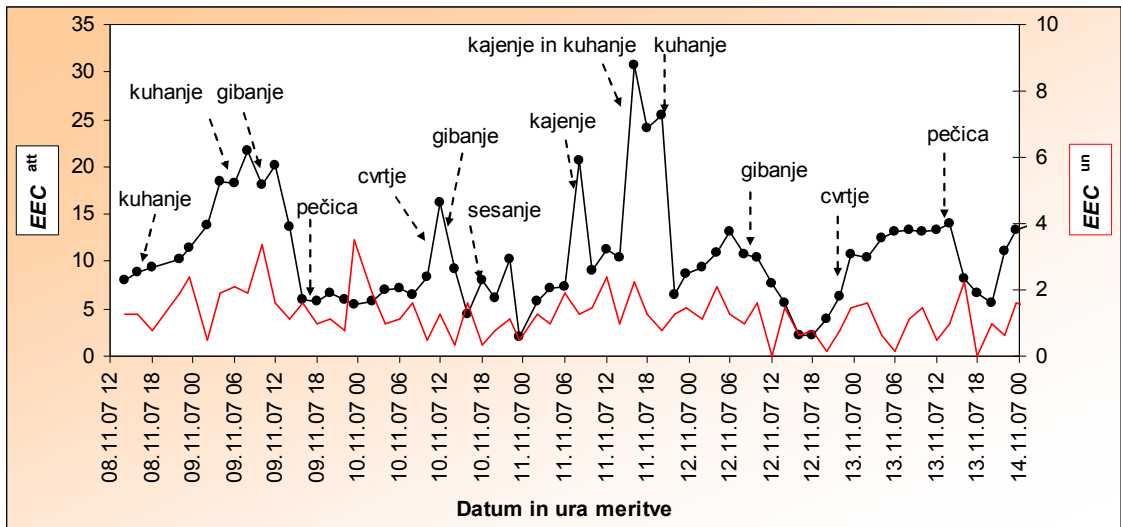


Slika 24. Časovna odvisnost koncentracije radona (C_{Rn}) in različni časi prezračevanja (puščice) v kuhinji.

Tabela 5. Koncentracija radona ($Bq\ m^{-3}$) a) pred in b) po odpiranju oken (prezračevanju) ter c) delež po/pred in d) odstotek znižanja.

Datum in ura odpiranja oken ter trajanje zračenja	C_{Rn} pred	C_{Rn} po	Delež po/pred	Odstotek po/pred
	a)	b)	c)	d)
8.11.2007 21:50 (10 min)	155	131	0,85	15 %
9.11.2007 9:50 (10 min)	206	169	0,82	18 %
9.11.2007 13:55 (5 min)	145	126	0,87	13 %
10.11.2007 15:55 (5 min)	126	122	0,97	3 %
10.11.2007 19:50 (10 min)	122	94	0,77	23 %
11.11.2007 11:40 (20 min)	126	79	0,63	37 %
11.11.2007 17:30 (30 min)	169	98	0,58	42 %
12.11.2007 17:40 (20 min)	126	79	0,63	37 %
13.11.2007 11:50 (10 min)	145	117	0,81	19 %

Izrazitejših je več vrhov EEC^{att} (slika 25), kjer koncentracije dosega do $33\ Bq\ m^{-3}$, medtem ko je EEC^{un} precej nižja, le do $4\ Bq\ m^{-3}$. Iz primerjave podatkov beleženih aktivnosti, ki so se v prostoru izvajale med izvajanjem meritev in rezultatov meritev, sem prišla do sklepa, da je skupni vpliv kuhanja in kajenja najpogostejši vzrok v zvišanih koncentracijah vezanih RnDP. Precejšnja povišanja v EEC^{att} se pojavljajo tudi, ko v prostoru kuhamo, cvremo, čistimo s sesalnikom za prah, vendar niso tako izrazita kot pri kombiniranem vplivu kajenja in kuhanja. Ker nam število aerosolnih delcev v prostoru ni znano, lahko le sklepamo, da so aktivnosti kot kajenje in kuhanje, glavni vzrok v povišanju vezanih RnDP. Raziskava kaže, da z naštetimi aktivnostmi zvišujemo koncentracijo aerosolnih delcev in s tem koncentracijo vezanih RnDP. V tabeli 6 so prikazane spremembe v koncentracijah Rn, RnDP, deležu F , f_{att} , f_{un} ter RH in T zaradi različnih aktivnosti v stanovanju.



Slika 25. Časovna odvisnost ravnotežne enakovredne koncentracije vezanih RnDP (EE_{Catt}) in nevezanih RnDP (EE_{Cun}) merjenih v kuhinji od 8. do 14. novembra 2007 ter izvajane aktivnosti (puščice).

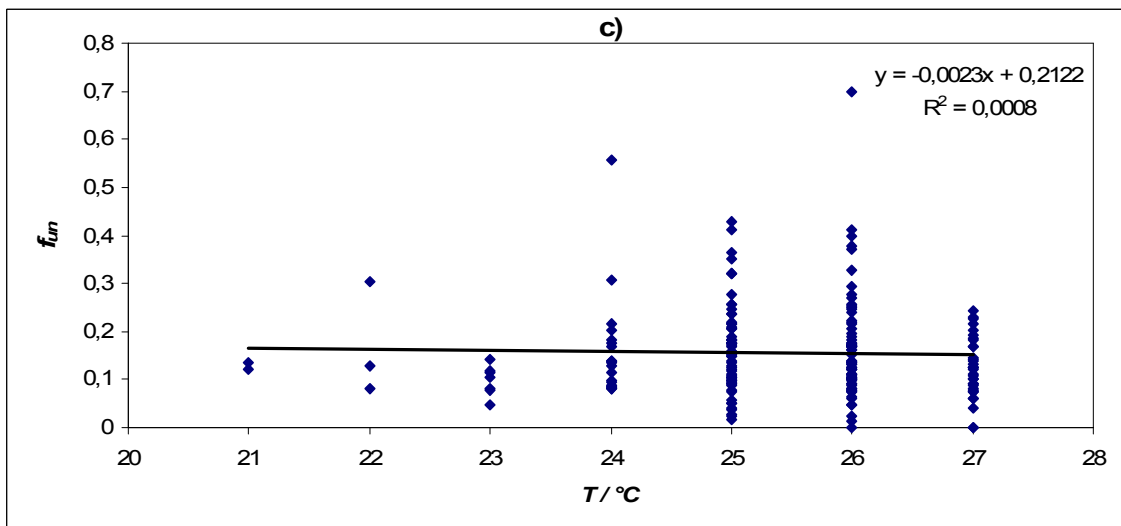
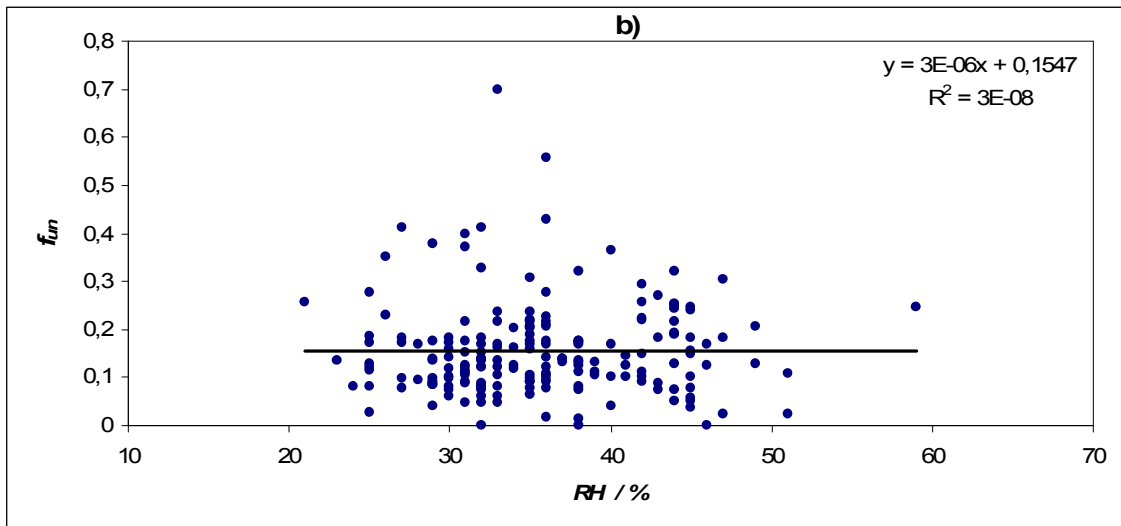
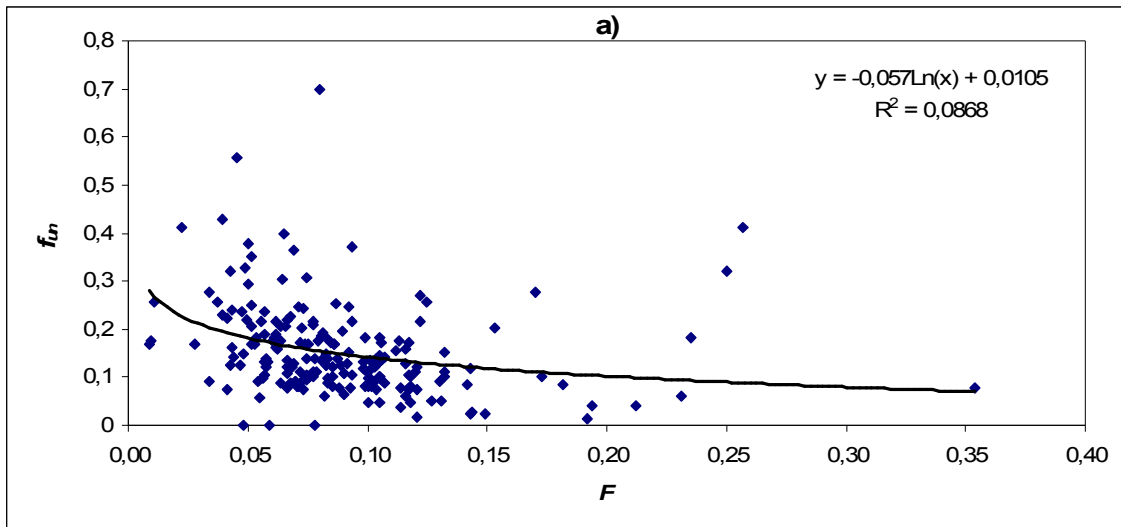
V tabeli 6 so zbrane vrednosti merjenih parametrov pred izvajano aktivnostjo in po izvajani aktivnosti. Vidimo, da se koncentracija Rn med izvajanjem aktivnosti spremeni (faktor po/pred je od 0,71 do 1,33), vendar vzroke pripisujemo drugim aktivnostim (prezračevanje, odpiranje vrat), saj aktivnosti kot kajenje in kuhanje ne vplivajo bistveno na koncentracijo Rn. RnDP znatno narastejo po izvajani aktivnosti, kar se odraža tudi v narastu F od 1,18 vse do 2,71. Pri deležu f_{att} smo zaznali povišanje v vseh primerih izvajanih aktivnostih, razen pri uporabi pečice. Najbolj je zaznaven porast f_{att} po kajenju in kuhanju, njen delež naraste iz 0,82 na 0,96 (faktor po/pred 1,17) in po cvrtju, kjer delež f_{att} naraste iz 0,80 na 0,92 (faktor po/pred je 1,15). Porast f_{att} je zaznaven tudi po kajenju, kjer njen delež naraste iz 0,88 na 0,94 (faktor po/pred je 1,07), po kuhanju njen delež naraste iz 0,89 na 0,92 (faktor po/pred je 1,03) in po sesanju (faktor po/pred je 1,04). Pri uporabi pečice narasta v deležu f_{att} nismo zaznali (faktor po/pred je 0,99).

Seveda se ustrezno zniža delež f_{un} , po kajenju in kuhanju pade iz 0,17 na 0,04 (faktor po/pred je 0,24), po cvrtju iz 0,20 na 0,08 (faktor po/pred je 0,4), po kajenju iz 0,12 na 0,06 (faktor po/pred je 0,5) in po kuhanju iz 0,11 na 0,08 (faktor po/pred je 0,73). Po sesanju padec deleža f_{un} ni tako izrazit, kjer pade iz 0,27 na 0,24 (faktor po/pred je 0,89). Po uporabi pečice pa se pojavi narast v f_{un} , njen delež naraste iz 0,14 na 0,15 (faktor po/pred je 1,07). Opazna je pričakovana negativna korelacija med F in f_{un} (slika 26a).

Tabela 6. Merjeni parametri a) pred in b) po določeni aktivnosti ter c) delež merjenega parametra po/pred v kuhinji.

$C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$	$C_{RnDP} / \text{Bq m}^{-3}$	F	f_{att}	f_{un}	$RH / \%$	$T / ^\circ\text{C}$
9.11.2007 6:00 (kuhanje)						
a) 155	20,30	0,11	0,89	0,11	44,0	25,2
b) 206	23,60	0,13	0,92	0,08	45,1	25,8
c) 1,33	1,16	1,18	1,03	0,73	1,03	1,02
9.11.2007 18:00 (uporaba pečice)						
a) 126	6,81	0,05	0,86	0,14	47,0	25,0
b) 117	7,73	0,07	0,85	0,15	49,2	26,1
c) 0,93	1,14	1,40	0,99	1,07	1,05	1,04
10.11.2007 10:00 (cvrtje)						
a) 126	8,84	0,07	0,80	0,20	35,7	26,1
b) 122	17,60	0,14	0,92	0,08	25,0	25,0
c) 0,97	2,08	2,00	1,15	0,40	0,70	0,96
10.11.2007 16:00 (sesanje)						
a) 122	6,11	0,05	0,73	0,27	29,2	26,0
b) 122	8,26	0,07	0,76	0,24	35,9	27,0
c) 1,00	1,35	1,40	1,04	0,89	1,23	1,04
11.11.2007 6:00 (kajenje)						
a) 150	9,29	0,16	0,88	0,12	33,2	26,0
b) 106	21,90	0,21	0,94	0,06	29,1	25,0
c) 0,71	2,36	1,31	1,07	0,50	0,88	0,96
11.11.2007 14:00 (kuhanje in kajenje)						
a) 159	11,40	0,07	0,82	0,17	38,0	26,0
b) 169	32,9	0,19	0,96	0,04	40,1	27,2
c) 1,06	2,89	2,71	1,17	0,24	1,05	1,05

Relativna vlažnost v kuhinji med izvajanimi aktivnostmi ponekod narašča, ponekod pada (faktor po/pred je od 0,70 do 1,23), prav tako temperatura (faktor po/pred je od 0,96 do 1,05). Dvig temperature in relativne vlažnosti je zaradi kuhanja in uporabe pečice večji. Ker pa so spremembe RH in T relativno majhne, menimo, da ima najbolj izrazit vpliv na spremembe F in f_{un} porast koncentracije aerosolov zaradi izvajanih aktivnosti. Opazna je šibka negativna korelacija med T in f_{un} (slika 26c), medtem, ko negativne korelacije med RH in f_{un} ni opaziti (slika 26b).



Slika 26. Odvisnost f_{un} - deleža nevezanih RnDP od a) F - ravnotežnega faktorja, b) RH - relativne vlažnosti, c) T - temperature v kuhinji.

4.2.2 Kopalnica

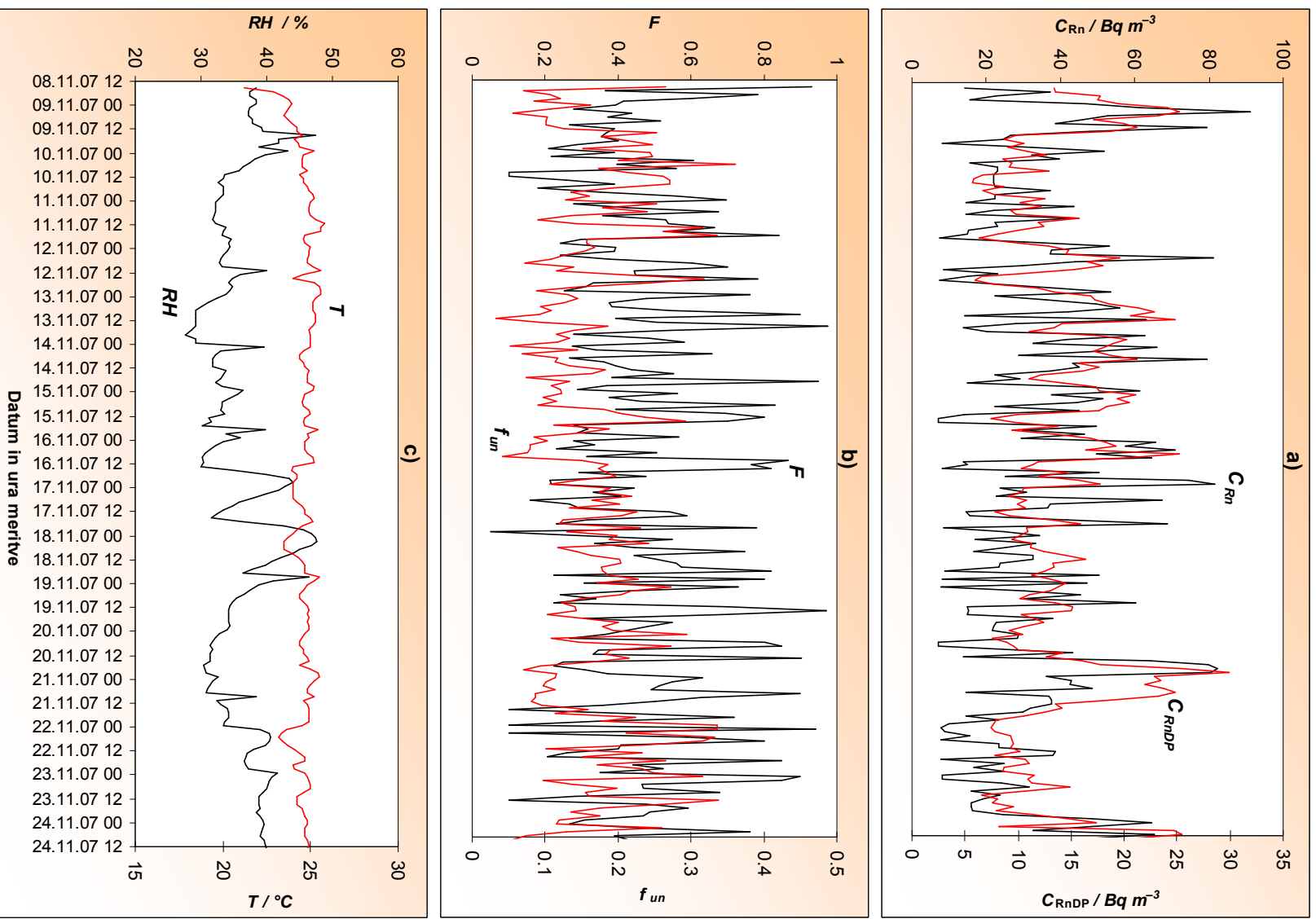
Koncentracija radona v kopalnici se giblje od 10 do 95 Bq m⁻³ (slika 27a) s povprečno koncentracijo 35 Bq m⁻³. Povprečna koncentracija radonovih razpadnih produktov je 15 Bq m⁻³. Povprečna vrednost ravnotežnega faktorja v kopalnici je 0,50 in večkrat dosega vrednosti okoli 0,80. Visoke vrednosti F spremljajo nizke vrednosti f_{un} s povprečno vrednostjo 0,15 (slika 27b). T v prostoru je od 22,5 °C do 25,5 °C. RH se je giblje od 28 % do 51 % (slika 27c).

Z meritvami v kopalnici sem želela ugotoviti kako večja uporaba vode (prhanje) in posledično zvišanje vlage v prostoru, vpliva na merjene parametre (C_{Rn} , C_{RnDP} , F , delež f_{att} in f_{un}). V tabeli 7 so zbrane vrednosti merjenih parametrov neposredno pred prhanjem in 2 uri po prhanju. Čeprav bi pričakovali, da se bo koncentracija radona po vsakem prhanju nekoliko zvišala, saj radon prehaja iz vode v zrak, pa se to ni vedno zgodilo (faktor koncentracije po in pred je od 0,13 do 1,63). Od 9 primerov prhanja se koncentracija Rn zviša le trikrat (faktor po/pred je od 1,04 do 1,63), zniža pa se šestkrat, (faktor po/pred je od 0,13 do 0,78). Ravno tako vrednost F v nekaj primerih naraste, medtem ko v drugih pade (faktor po/pred je od 0,48 do 3,43). V deležu f_{att} se povišanje pojavi v 4 od 9 primerov večje uporabe vode, in sicer je faktor po/pred od 0,80 do 1,12, medtem, ko delež f_{un} naraste v 5 od 9 primerov, faktor po/pred je od 0,64 do 2,00. T se ne spreminja veliko (za faktor 0,01), RH pa se pričakovano zviša v vseh primerih. Jasno izražene korelacije tako med RH in C_{Rn} ni opaziti (slika 28). Pojavi pa se rahla pozitivna korelacija med RH in f_{un} (slika 29).

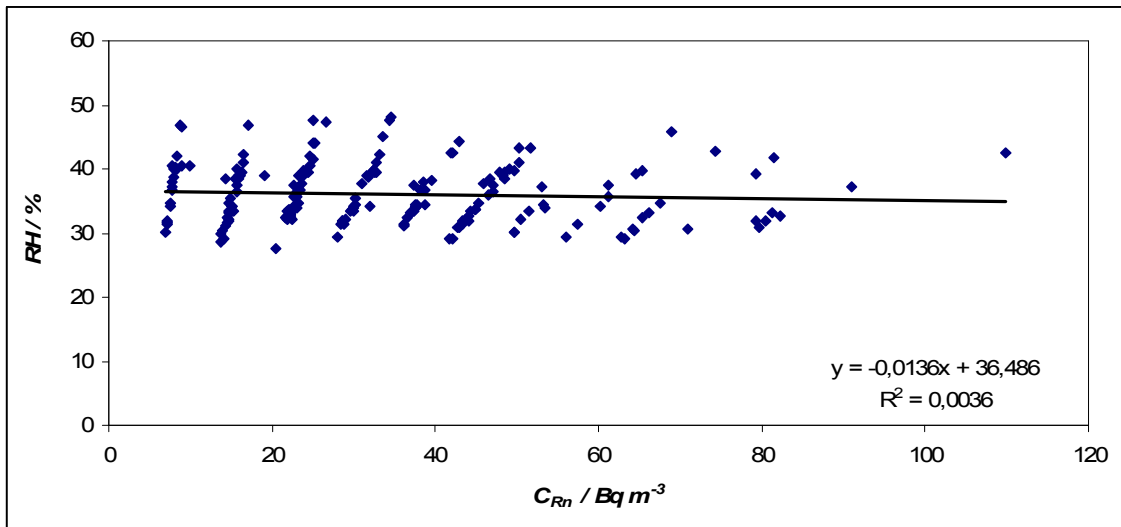
Ker koncentracija radona v vodovodni vodi pri nas le redko preseže 10 kBq m⁻³, je ta dodatni vir radona pri prhanju zelo majhen, če ne celo zanemarljiv, kar kažejo tudi moji podatki. Žal trajanja rabe vode med posameznim prhanjem nisem beležila, predvidevam pa, da bi bilo razmerje koncentracije po in pred večje od 1 v primerih daljšega prhanja. Po pričakovanju je povprečni F v kopalnici precej višji kot v kuhinji, kar je verjetno posledica manj intenzivnega in manj pogostega prezračevanja.

Tabela 7. Merjeni parametri a) pred in b) po prhanju ter c) delež merjenega parametra po/pred v kopalnici.

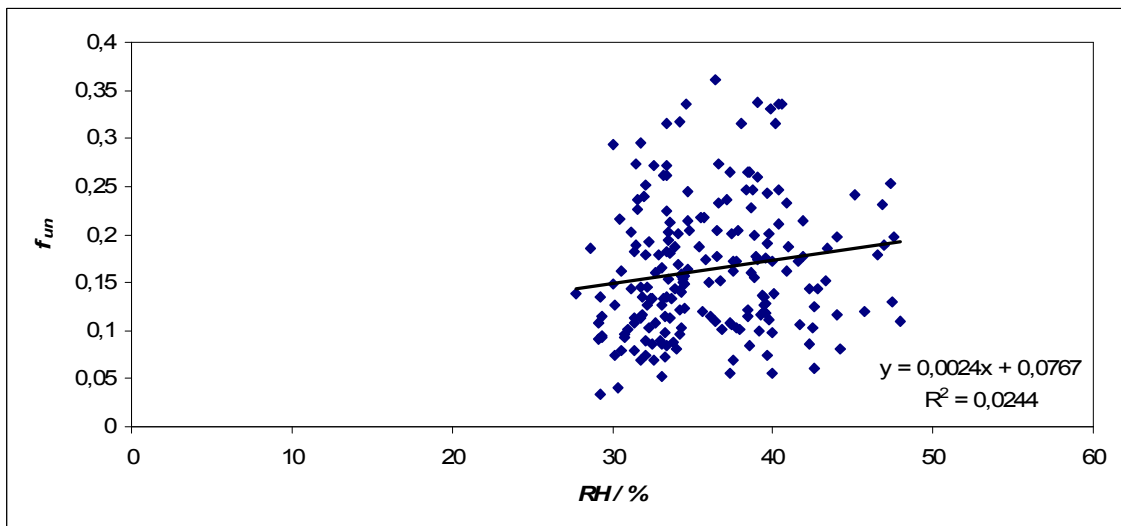
$C_{Rn} / \text{Bq m}^{-3}$	$C_{RnDP} / \text{Bq m}^{-3}$	F	f_{att}	f_{un}	$RH / \%$	$T / ^\circ\text{C}$
9.11.2007 12:35						
a) 48	18,7	0,39	0,87	0,13	39,5	24,2
b) 27	9,8	0,36	0,79	0,26	47,4	24,6
c) 0,56	0,52	0,92	0,91	2,00	1,20	1,02
9.11.2007 20:40						
a) 32	9,1	0,28	0,75	0,25	48,0	24,5
b) 52	10,9	0,21	0,84	0,16	50,3	25,2
c) 1,63	1,20	0,75	1,12	0,64	1,05	1,03
11.11.2007 16:40						
a) 15	8,1	0,55	0,73	0,27	33,2	24,7
b) 8	6,3	0,84	0,66	0,34	34,6	24,7
c) 0,53	0,78	1,53	0,90	1,26	1,04	1,00
13.11.2007 20:45						
a) 42	20,3	0,48	0,86	0,14	29,2	25,0
b) 33	19,0	0,58	0,88	0,12	39,6	25,2
c) 0,78	0,94	1,21	1,02	0,86	1,36	1,01
17.11.2007 20:40						
a) 69	15,9	0,23	0,88	0,12	45,6	24,8
b) 9	10,8	0,79	0,76	0,24	47,3	25,2
c) 0,13	0,68	3,43	0,86	2,00	1,04	1,02
18.11.2007 18:40						
a) 23	13,3	0,31	0,82	0,18	36,5	24,4
b) 9	12,5	0,17	0,81	0,19	46,5	24,6
c) 0,39	0,94	0,55	0,99	1,06	1,27	1,01
21.11.2007 20:30						
a) 15	10,5	0,71	0,77	0,23	33,4	24,5
b) 23	8,0	0,34	0,82	0,18	39,0	24,8
c) 1,53	0,76	0,48	1,06	0,78	1,17	1,01
22.11.2007 22:40						
a) 23	8,0	0,33	0,82	0,17	48,0	24,5
b) 5	7,7	0,21	0,66	0,34	50,3	25,2
c) 0,22	0,96	0,64	0,80	2,00	1,05	1,03
24.11.2007 20:45						
a) 35	20,4	0,59	0,89	0,11	48,1	23,5
b) 36	23,5	0,65	0,93	0,07	50,3	23,9
c) 1,03	1,15	1,10	1,04	0,64	1,05	1,02



Slika 27. Časovna odvisnost merjenih parametrov v kopalnici v obdobju od 8. do 24. novembra 2007: a) koncentracija radona (C_{Rn}) in koncentracija radonovih razpadnih produktov (C_{RnDP}), b) ravnotežni faktor (F) in delež nevezanih RnDP (f_{un}), c) temperatura (T) in relativna vlažnost zraka (RH).



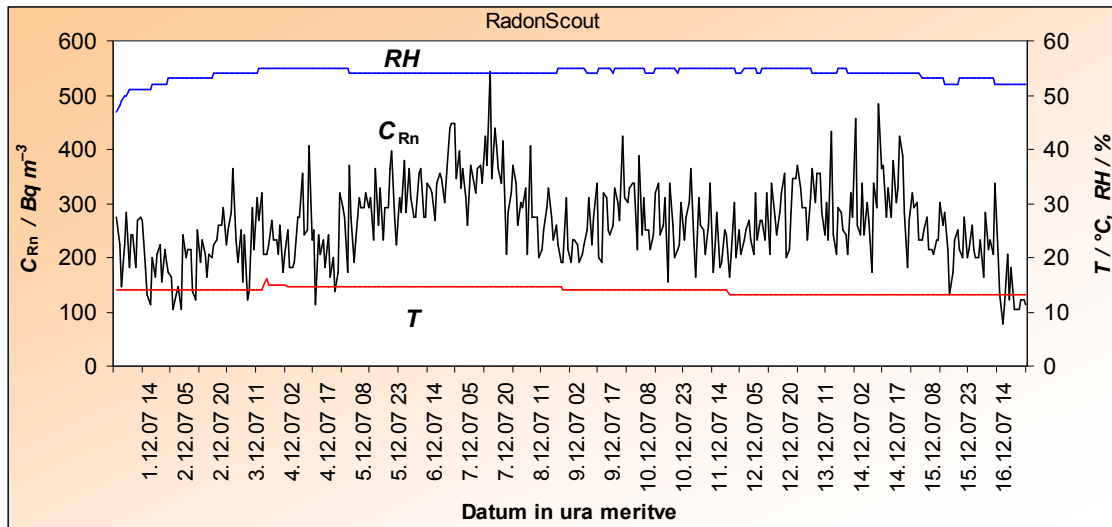
Slika 28. Odvisnost C_{Rn} - koncentracije radona od RH – relativne zračne vlažnosti v kopalnici.



Slika 29. Odvisnost deleža nevezanih RnDP (f_{un}) od RH – relativne zračne vlažnosti v kopalnici.

4.2.3 Kletni prostor

Po pričakovanjih je koncentracija radona v kleti višja kot v stanovanju. Na sliki 30 so prikazani rezultati meritev koncentracije radona, temperature in relativne vlažnosti v kleti zgradbe, v kateri je stanovanje.



Slika 30. Časovna odvisnost koncentracije radona (C_{Rn}), relativne vlage (RH) in temperature (T) merjenih v kleti zgradbe v časovnem obdobju od 1. do 16. decembra 2007.

Povprečna koncentracija radona v stanovanju je 145 Bq m^{-3} medtem ko je povprečna koncentracija radona v kleti 250 Bq m^{-3} . V kleti se pojavljajo občasna zvišanja koncentracije radona, z najvišjimi vrednostmi od 400 do 500 Bq m^{-3} . Temperatura in relativna vlažnost sta več ali manj konstantni. Temperatura ni presegala 14°C in je redko nihala več kot $\pm 1^\circ\text{C}$. Relativna zračna vlažnost v kleti se giblje od 48 % do 54 %.

V kletnem prostoru je koncentracija radona tako za okoli 40 % do 250 % višja kot v stanovanju. Iz tega lahko sklepamo, da je največji vir radona v stanovanju prav klet, od koder radon preko stopnišča, napeljave ter razpok prihaja v stanovanje.

5 ZAKLJUČKI

V okviru svoje diplomske naloge sem raziskovala kako na koncentracijo radona in radonovih razpadnih produktov v prostoru, še posebej pa na ravnotežni faktor in delež nevezanih radonovih razpadnih produktov, vplivata delovni režim in bivanjske navade. V ta namen sem v dveh različnih okoljih (i) radonski komori s povišano koncentracijo Rn in sočasno v radonskem laboratoriju Odseka za znanosti o okolju na Institutu "Jožef Stefan" (delovno okolje) ter v (ii) svojem stanovanju (bivanjsko okolje), merila koncentracije Rn in RnDP ter F in f_{un} . V dobro zatesnjeni komori volumna 75 dm^3 smo izvedli dva poskusa pri katerih smo simulirali bivanjsko okolje tako, da smo spreminjali pogoje in študirali vpliv prezračevanja (odpiranje pokrova) ter spremenjenega deleža aerosolov, relativne vlažnosti zraka in temperature (prepihovanje) na koncentracijo Rn in RnDP ter F in f_{un} . Vpliv istih parametrov na koncentracijo Rn in RnDP ter F in f_{un} smo študirali tudi pri realnih pogojih v laboratoriju in v stanovanju. Vse aktivnosti v komori, laboratoriju in stanovanju v času trajanja eksperimenta smo beležili.

Zaključki raziskave so naslednji:

- V radonski komori smo kot izvor radona uporabili ročno uro. Potrebovali smo približno štiri dni, da je koncentracija Rn dosegla maksimalno vrednost, $11,4 \text{ kBq m}^{-3}$. Ker smo kot izvor uporabili čisti radon, ne pa tudi aerosolov, smo imeli v komori pred začetkom izvajanja poskusov po pričakovanju nizko koncentracijo RnDP, 55 Bq m^{-3} . Seveda je bil zato nizek tudi F , le 0,005, f_{un} pa je bila 0,44, kar je povišana vrednost. Pred začetkom izvajanja poskusov je bila v komori RH 46,2 % in T 25,9 °C.
- Pri poskusih odpiranja pokrova komore za različno dolge čase se je predvsem znižala koncentracija Rn, nekoliko tudi koncentracija RnDP. Delež Rn je pri različno dolgo odprti komori padel od 0,89 do 0,23, delež RnDP pa je padel do 0,45 ali narasel do 1,07. Najbolj izrazita je rast F , od 1,10 vse do 2,58. Pri deležu f_{att} smo razen v četrtem poskusu zaznali povišanje, od 1,14 do 1,87, pri f_{un} pa pri istih poskusih ustrezno znižanje, od 0,22 do 0,86. Negativne korelacije med F in f_{un} ni bilo opaziti, pojavi se celo rahla pozitivna korelacija. Meritve RH in T so pokazale odstopanja za faktor manj kot 0,01 od vrednosti pred odpiranjem pokrova komore. Pojavi se rahla negativna korelacija med f_{un} in RH . Najbolj izrazita sprememba večine merjenih parametrov je pri poskusu, ko smo pokrov komore odprli za 5 minut in se je zrak v komori dodobra zmešal z zrakom iz laboratorija.
- Kot pričakovano, prepihovanje s fenom ni bistveno vplivalo na koncentracijo Rn, medtem, ko se koncentracija RnDP v določenem časovnem intervalu izrazito zviša, vendar šele po 5 in 10 min prepihovanju, kar se odraža tudi v vrednosti F , ki se iz povprečne vrednosti 0,02 zviša na 0,075, obenem pa f_{un} pade iz povprečne vrednosti 0,5 na 0,03. Domnevamo, da smo s prepihovanjem povzročili dvig posedlih razpadnih produktov in aerosolov. Po pričakovanju je najbolj zaznaven porast f_{att} in padec f_{un} po daljšem prepihovanju komore. Tako se po 35 min prepihovanju delež f_{att} poviša za faktor 1,89, f_{un} pa pade za faktor 0,21. Relativna vlažnost v komori med poskusi prepihovanja rahlo narašča, od 45,0 % do 48,2 %, prav tako temperatura, od 26,1 do 31,8 °C. Ker pa so spremembe RH in T relativno majhne, menimo, da ima najbolj izrazit vpliv na spremembe F in deleža f_{un} porast števila aerosolov, ki se med prepihovanjem dvigajo z odloženih površin v zrak. V zelo kratkem času (nekaj ur) pa se vezani RnDP ponovno posedejo, kar povzroči padec v vrednosti F in ponovno zvišanje f_{un} .

- V laboratoriju smo imeli zaradi intenzivnega prezračevanja nizke vrednosti merjenih parametrov. Tako je bila povprečna koncentracija Rn v zraku 140 Bq m^{-3} , povprečna koncentracija RnDP pa 18 Bq m^{-3} . Povprečna vrednost F je bila 0,13, medtem, ko je povprečni delež f_{un} 0,13. Povišanje F spremlja padec deleža f_{un} , vendar pa ta trend ni zelo jasno izražen. Zaradi nizkih koncentracij merjenih parametrov v laboratoriju je tudi vpliv zraka iz laboratorija na poskus odpiranja komore relativno majhen.
- Povprečna koncentracija radona v bivanjskem prostoru, kuhinji, je bila 128 Bq m^{-3} , povprečna koncentracija RnDP pa je bila 12 Bq m^{-3} . Domnevamo, da je vzrok v razmeroma nizkem F , ki je bil od 0,01 do 0,26, s povprečno vrednostjo 0,10, majhnost prostora, v katerem je razmeroma veliko površin na katere so se RnDP posedli. Delež f_{un} je bil v določenih primerih ustrezno zvišan in je bil od 0,01 do 0,70, s povprečno vrednostjo 0,15. Opazna je pričakovana negativna korelacija med F in f_{un} . T v prostoru je bila od 21 do 27°C , RH pa od 20% do 60% , s povprečno vrednostjo 36% .
- Prezračevanja (odpiranje oken) v kuhinji je znižalo koncentracijo Rn v prostoru. Koncentracija radona pri 5 min prezračevanju pade za 5 do 15 %, pri 10 min za 5 do 20 %, pri 20 min za 10 do 40 % in pri 30 min tudi za 50 %. V določenih primerih znižanja niso tolikšna, vendar lahko zaključimo, da je prezračevanje prostora kljub vsemu učinkovit ukrep za znižanje koncentracije radona.
- Koncentracija RnDP znatno naraste po izvajani aktivnosti, kar se odraža tudi v povečani vrednosti F po opravljeni aktivnosti glede na vrednost pred aktivnostjo, od 1,18 do 2,71. Delež f_{att} se zviša za faktor 1,17 pri kuhanju in kajenju, delež f_{un} se ustrezno zniža za faktor 0,24. Porast deleža f_{att} je zaznaven tudi pri ostalih izvajanih aktivnostih, in sicer od 0,80 do 0,94, oziroma za faktor 1,03 do 1,15. f_{un} se pri tem zniža za faktor od 0,40 do 0,89. Izjema je uporaba pečice, ko je delež f_{att} po uporabi v primerjavi pred 0,99, delež f_{un} pa se zviša na 1,07. Ker pa so spremembe RH in T relativno majhne, menimo, da ima najbolj izrazit vpliv na spremembe F in deleža f_{un} porast števila aerosolov, ki jih ustvarjamo z določenimi aktivnostmi.
- Koncentracija Rn v kopalnici je bila od 10 do 95 Bq m^{-3} , s povprečno koncentracijo 35 Bq m^{-3} . Povprečna koncentracija RnDP je bila 15 Bq m^{-3} . Povprečna vrednost F v kopalnici je bila 0,5 in je večkrat dosegla vrednosti okoli 0,8. Visoke vrednosti F spremljajo nizke vrednosti f_{un} s povprečno vrednostjo 0,15. RH v prostoru se je gibala od 28% do 51% , T pa od $22,5^\circ\text{C}$ do $25,5^\circ\text{C}$. Koncentracija Rn se je v določenih primerih večje uporabe vode (prhanja) zvišala, v določenih pa znižala (faktor po/pred je od 0,13 do 1,63), pri čemer se večkrat zniža (v šestih od devetih primerov). Ker koncentracija radona v vodovodni vodi pri nas le redko preseže 10 k Bq m^{-3} , je ta dodatni vir radona pri prhanju zelo majhen, če ne celo zanemarljiv, kar kažejo tudi moji podatki. Ravno tako vrednost F v nekaj primerih naraste, v drugih pa pade (faktor po/pred je od 0,48 do 3,43). V deležu f_{att} se porast pojavi v 4 od 9 primerov prhanja, in sicer je faktor po/pred od 0,80 do 1,12, medtem, ko delež f_{un} naraste v 5 od 9 primerov, faktor po/pred je od 0,64 do 2,00. T je narasla ali padla največ za faktor 0,01, RH pa se je pričakovano zvišala v vseh primerih. Jasno izražene korelacije tako med RH in C_{Rn} ni opaziti. Pojavi pa se rahla pozitivna korelacija med RH in f_{un} .
- Koncentracija radona v kleti je v povprečju za 40% višja kot v stanovanju, včasih tudi do 250% . Iz tega sklepamo, da je klet glavni vir radona v zgradbi, od koder preko stopnišča, napeljave in razpok pride v stanovanje.

- S poskusom v komori smo želeli simulirati bivanjsko okolje. Predvidevamo, da je bila v komori koncentracija aerosolov precej nizka, zato so se vezani radonovi razpadni produkti hitro posedli na površine v komori, ki jih je bilo glede na volumen komore veliko. Posledično smo dobili zelo nizek F , zaradi česar komora ni predstavljala najboljše simulacije bivanjskega okolja in je razprava o obnašanju vezane in nevezane frakcije toliko bolj otežena. Pa vendar smo s poskusom v komori uspeli pokazati, kako spremembe pogojev vplivajo na obnašanje radona in radonovih razpadnih produktov.
- Iz naših podatkov lahko zaključimo, da se F in f_{un} zelo spreminjata med izvajanjem različnih poskusov tako v komori kot v bivanjskem okolju. Na spremembe v največji meri vplivajo meteorološki parametri, bivanjske navade oziroma dejavnosti v prostoru ter velikost prostora in število površin v njem.
- Kot pomemben sklep naj še poudarimo, da bi bilo podobne meritve v prihodnje potrebno izvajati v večjem številu različnih bivanjskih okolij in skozi daljše časovno obdobje, saj je tako lažje analizirati vplive bivanjskih navad in mikroklimatskih dejavnikov na koncentracijo radona in razpadnih produktov. Izkazalo se je, da bi kljub zmogljivim kontinuirnim merilnim instrumentom EQF 3020-2 potrebovali merilne sisteme, ki bi omogočali pogostejši merilni cikel črpanja zraka (npr. vsake pol ure), saj bi bilo tako omogočeno boljše proučevanje parametrov, ki vplivajo na obnašanje in koncentracijo radona in njegovih razpadnih produktov. Smotrne bi bile tudi meritve koncentracije aerosolnih delcev v prostoru, ki bi omogočale natančnejši pogled na obnašanje vezanih in nevezanih radonovih razpadnih produktov.

6 VIRI

Birchall A., James AC., 1994. Uncertainty analysis of the effective dose per unit exposure from radon progeny and implications for ICRP risk-weighting factors. *Radiat Prot Dosim*, 53: 133–40.

Butterweck, G., Porstendörfer, J., Reineking, A., Kesten, J., 1992. Unattached fraction and the aerosol size distribution of the radon progeny in a natural cave and mine atmosphere. *Radiat Prot Dosim*, 45: 167–170.

Chen C-J, Liu Y-M., 1998. Measurement of equilibrium factor and unattached fraction of radon progeny in Kaohsiung, Taiwan. *Appl Radiat Isot*, 49: 1613-18.

Čakš T., Eržen I., Juričič M., Hlastan-Ribič C., Vaupotič J., 2002. Navodila in priročnik za vaje iz higijene. Ljubljana, Medicinska fakulteta, Inštitut za higieno, 2002. 209 str.

El-Hussein A., 1996. Unattached fraction, attachment and deposition of radon progeny in indoor air. *Appl Radiat Isot*, 47: 515–23.

EPA slide show. 2006. Doug Kladder. Radon information center. <http://www.radon.com/index.html> (21. sept. 2007)

Genitron Instrumente GmbH. Germany, 1998. User Manual. Portable Radon Monitor "AlphaGUARD". 38 str.

Grabec I. 2003. Predavanja iz fizike. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 525 str.

Gundersen L.C.S., Shumman R.R., Otton J.K., Dubiel R.F., Owen D.E., Dickinson K.A. Geology of radon in the United States. 1992. V: *Geologic Controls of Radon*. Gates A.E., Gundersen L.C.S. (ur.). Geological Society of America, Inc. Special paper 271:1–16.

http://www.sarad.de/ENG/EN_Radon_Aerosols/EN_Eqf3020/eneqf3020.htm
(15. okt. 2007)

http://www.sarad.de/ENG/EN_Radon_Aerosols/RadonScout/enradonscout.html
(15. okt. 2007)

ICRP (International Commission on Radiological Protection). *Protection Against Radon-222 at Home and at Work*. ICRP 1994, Publication 65, Pergamon Press: Oxford, str. 1–262.

Kemija. Zbirka: Tematski leksikon. 2004. 3. izdaja. Tržič, Učila International: 442.

Nazaroff W.W., Moed B.A., Sextro R.G., 1988. Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry. V: *Radon and its decay products in indoor air*. Nazaroff W.W., Nero A.V. (ur.). John Wiley and Sons, str. 57 – 112.

Nero, Jr, A.V., 1988. Radon and its decay products in indoor air: an overview. V: Nazaroff, W.W., Nero, Jr, A.V. (ur.). Radon and its Decay Products in Indoor Air. John Wiley & Sons, New York, str. 1–53.

Popit A., Vaupotič J., 2002. Indoor radon concentrations in relation to geology in Slovenia. *Environ Geol* 42: 330–337.

Porstendorfer J., Reineking A., 1992. Behaviour and characteristics of radon progeny, *Rad Prot Dosim*, 45, 303–311.

Sarad Instrumensts. Dresden, Germany. Technical informations. Portable Radon Monitor "RadonScout".

Streil T., Holfeld G., Oeser V., Feddersen C., Schonefeld K., 1996. SARAD EQF3020; a new microsystem for the continuous measurement of radon and the attached and unattached fraction of the radon progeny.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Publication, E. 88.IX.7, United Nations, New York, 1988.

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, Vol. 1, 2000.

Uradni list Republike Slovenije (ULRS), 2002. Zakon o varstvu pred ionizirajočimi sevanji in jedrski varnosti. Ur. l. RS, št. 67/2002.

Uradni list Republike Slovenije (ULRS), 2003. Pravilnik o pogojih in metodologiji za ocenjevanje doz pri varstvu delavcev in prebivalstva pred ionizirajočimi sevanji Ur. l. RS, št. 115/2003.

Uradni list Republike Slovenije (ULRS), 2004. Uredba o mejnih dozah, radioaktivni kontaminaciji in intervencijskih nivojih. Ur. l. RS, št. 49/2004.

Vaupotič J., Kobal I., 1995. Radon v naravi – vstop v naše okolje. V: Kemizacija okolja in življenja - do katere meje? - Projekt Evropskega leta varstva narave. Lah A. (ur.), Ljubljana, Slovensko ekološko gibanje, str. 124–134.

Vaupotič J., 1992. Radon v vrtcih v Sloveniji. Magistersko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za kemijo in kemijsko tehnologijo, str. 1-27.

Vaupotič J., 1995. Koncentracija radona in njegovih razpadnih produktov v bivalnem okolju ter modelni izračuni doz. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, Oddelek za kemijo kemijsko tehnologijo. 123 str.

Vaupotič J., Šikovec M., Kobal I., 2000. Systematic indoor radon and gamma-ray measurements in Slovenian schools. *Health Phys*, 78: 559–562.

Vaupotič J., 2007. Nano-size radon short-lived progeny aerosols in Slovenian kindergartens in wintertime. *Chemosphere*, 69: 856–863.

Vaupotič J., Kobal I., 2006. Effective doses in schools based on nanosize radon progeny aerosols. *Atoms Environ*, 40: 7494–507.

Vaupotič J., Kobal I., 2007. The role of nanosized aerosols of radon decay products in radon dosimetry = Vloga nano aerosolov radonovih razpadnih produktov v dozimetriji radona. *Zdrav vars*, 46: 128–143.

Vaupotič J., Križman M., Planinić J., Pezdič J., Adamič K., Stegnar P., Kobal I., 1994. Systematic indoor radon and gamma measurements in kindergartens and play schools in Slovenia. *Health Phys*, 66: 550–556.

Wilkening M. Radon in the environment, 1990. *Studies in Environmental Science* 40. Department of Physics, New Mexico Institute of Mining and Technology, Elsevier, NM 87801, str. 1–129.

Zmazek, B., 2004. Vpliv seizmične aktivnosti na vsebnost radona v termalnih vodah in talnem zraku na izbranih lokacijah v Sloveniji. Doktorska disertacija. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, 190 str.