Záření, jeho druhy a využití.

1. Úvod.

Člověk jako biologický druh od samého počátku své existence žije v neustálé interakci se zářením různého druhu. Některé záření můžeme detekovat svými smysly (např. světlo, teplo) a jiné více nebo méně složitými přístroji (fotoaparát, spektroskop, radiopřijímač, Wilsonova mlžná komora, atd.). Proto je přirozené, že nás napadne otázka, týkající se škodlivosti nebo prospěšnosti záření pro naše zdraví. Cílem příspěvku je pokus o stručnou, kvalitativní odpověď na tuto otázku.

2. Druhy záření.

Pojem záření lze definovat jako *šíření energie prostorem, které je možné i bez přítomnosti hmotného prostředí.* Jako nejpřirozenější se jeví rozdělení záření na *vlnové* a *částicové*. Ovšem již studenti na střední škole ví, že každé záření má *dualistický* charakter, tj. projevuje se zároveň jako vlna i jako částice (má vlnový i korpuskulární charakter). Dělení podle toho, zda částice nesou či nenesou elektrický náboj by bylo ještě méně přesné, stejně jako dělení podle místa vzniku (jádro, nebo elektronový obal atomu). Proto pouze pro potřeby této publikace rozdělíme záření na záření *elektromagnetické* a záření ostatní (které nazveme *čističové, korpuskulární*).

Elektromagnetické záření,

V celém prostoru kolem nás i v celém Vesmíru se vyskytuje elektromagnetické záření,které má obrovský rozsah vlnových délek λ od řádu velikosti atomů (10^{-10} m) až po hodnoty řádu 10^5 m. Poznamenejme, že mezi vlnovou délkou záření λ, frekvencí f a rychlostí šíření elektromagnetických vln c (~ 3.10^8 m.s^{-1}) platí známý vztah

$$c = \lambda . f \qquad (1)$$

Na Obr.1 je znázorněno tzv. spektrum elektromagnetického záření, tj. jsou zde vyneseny a pojmenovány jednotlivé části spektra v závislosti na frekvenci záření (nebo na jeho vlnové délce). Z obrázku vidíme, jak úzký je interval oblasti viditelného světla ve srovnání s celým dalším spektrem. Oblast viditelného světla byla (a stále ještě je) zkoumána celými generacemi fyziků, chemiků, inženýrů, lékařů, biologů, atd., takže o ní bylo nashromážděno velké množství poznatků (optika).

Záření korpuskulární.

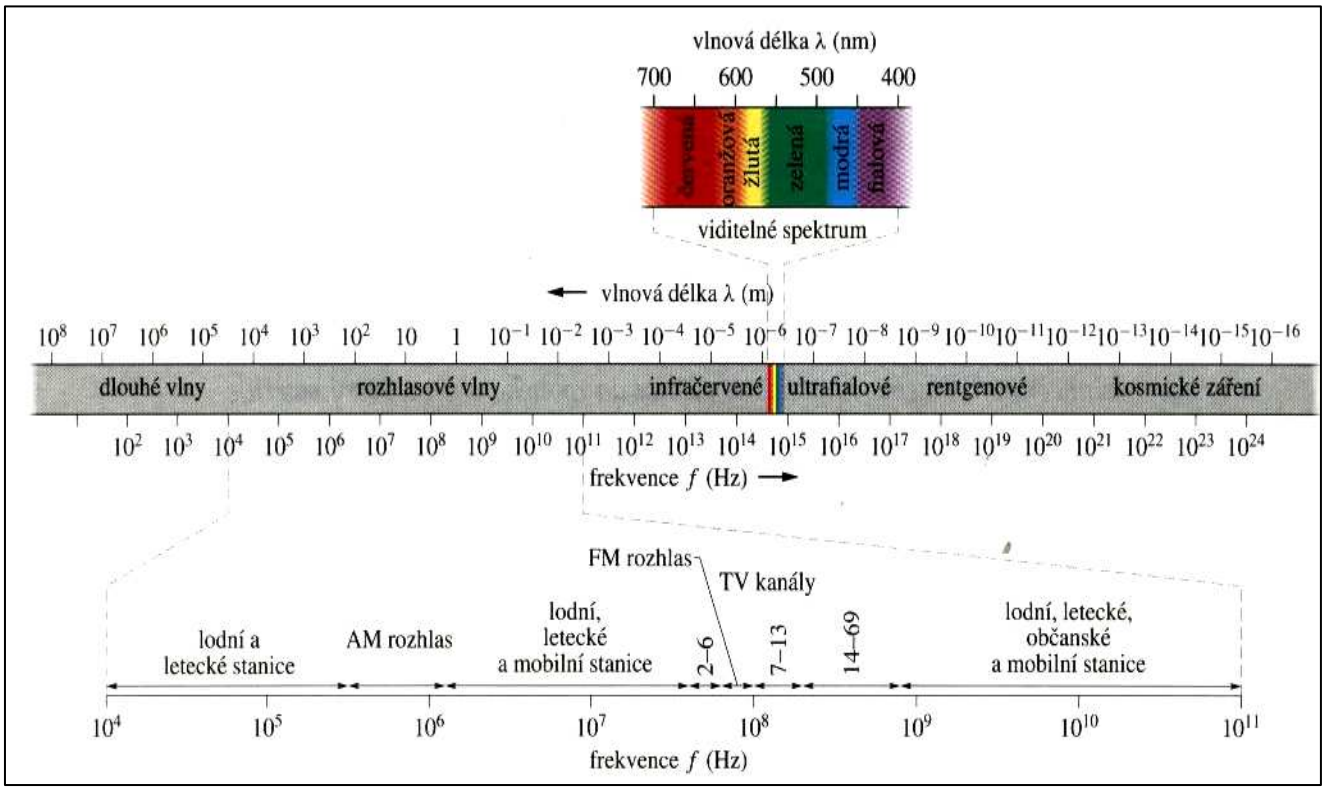
Koncem 19. století došlo k několika významným objevům, které mají úzký vztah k pojmu záření:

V roce 1895 objevil W.C. Röntgen tzv. paprsky X (nyní na jeho počest nazvané rentgenovými paprsky).

V roce 1896 objevil H. Becquerell přirozenou radioaktivitu uranové rudy.

V roce 1897 rozlišil E. Rutherford radioaktivní záření na paprsky α a β. V témže roce objevil J.J. Thomson elektrony a zjistil, že jsou částí atomu.

V roce 1898 objevila M. Curieová – Sklodowská a její manžel Pierre Curie radioaktivní prvky polonium a radium.



Obr.1. Elektromagnetické spektrum

.

Uvedené práce (a samozřejmě i mnohé další) iniciovaly bouřlivý rozvoj jaderné fyziky, jejíž součástí je i nauka o ionizujícím (podle našeho dělení korpuskulárním) záření.

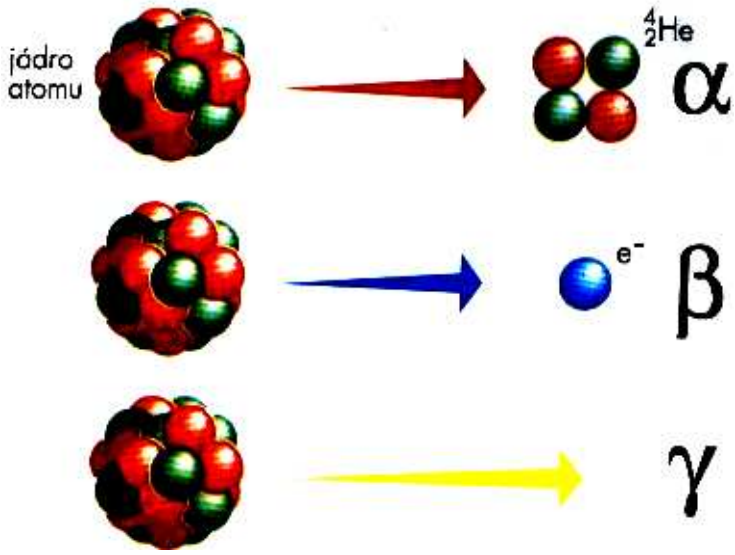
Základními druhy ionizujícího záření je záření α, β, γ a neutrony (Obr.2.).

Záření alfa je tvořeno jádry helia a je vyzařováno jádry takových prvků, jako je např. uran, thorium, radium, atd. Ochranou proti záření alfa může být například papír, nebo látka oděvu. Pokud se však prvky, vyzařující záření alfa dostanou např. do plic, mohou poškodit jejich citlivou sliznici, neboť mají poměrně velkou hmotnost a tedy i kinetickou energii. Poškození sliznice může mít za následek zhoubné bujení tkáně (o tomto problému se zmíníme později).

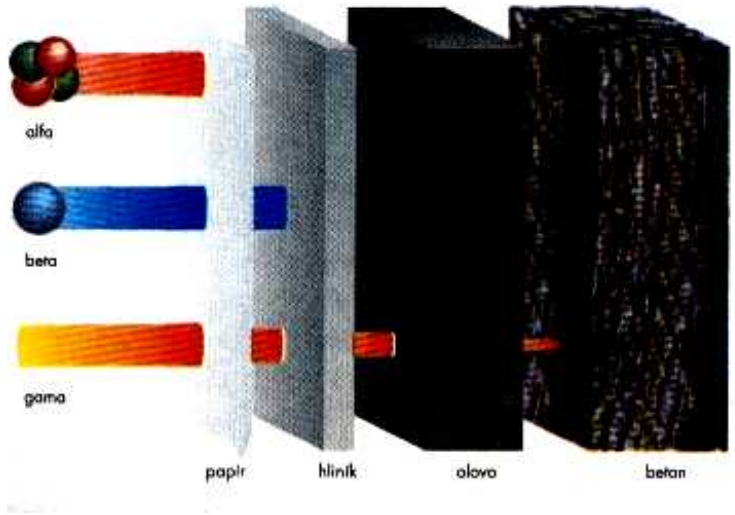
Záření beta je tvořeno elektrony, nebo pozitrony a rovněž vzniká při rozpadu jader některých radioaktivních prvků. Je pronikavější, než záření alfa, může být pohlceno např. 1 – 2 cm tlustou vrstvou vody, nebo hliníku.

Záření gama je elektromagnetické záření, jeho částicemi jsou fotony. Vzniká rovněž při radioaktivních přeměnách. Je ještě pronikavější, než záření beta, nejlépe se dá pohltit ve vrstvě olova (Obr.3).

Neutrony jsou neutrální elementární částice, vznikající např. při štěpení jader uranu. Protože jsou elektricky neutrální, mají vysokou pronikavost. Nejlépe je lze pohltit ve vrstvě vody, nebo parafinu (zpomalují se srážkami s jádry vodíku)



Obr.2. Záření alfa, beta a gama.



Obr.3. Pronikavost jednotlivých typů ionizujícího záření.

3. Důležité pojmy a jednotky.

Atomová a jaderná fyzika tvoří velmi rozsáhlou oblast fyziky s vlastním názvoslovím. Proto objasníme stručně některé základní pojmy, potřebné v dalším výkladu:

Jádro atomu je velmi malá centrální část atomu o rozměrech řádu 10^{-15} m (rozměr celého atomu je řádu 10^{-10} m). Jádro je tvořeno *protony* a *neutrony* (společný název *nukleony*) a je vázáno dohromady silnými jadernými silami.

Radioaktivita je vlastnost některých atomů samovolně se rozpadat na atomy jednodušší. Produktem rozpadu je elektromagnetické záření a částice. Příčinou rozpadu je nestabilita jader, způsobená nadbytkem protonů nebo neutronů v jádře, nebo tím, že jádra jsou příliš těžká, složitá a tím nestabilní.

Radionuklid je neklid, jehož atomy podléhají radioaktivní přeměně za současné emise ionizujícího záření.
Poločas přeměny $T_{1/2}$ představuje dobu, ze kterou se samovolně přemění polovina z počátečního počtu atomů radionuklidu v daném souboru (Obr.4).
Přeměnová konstanta udává poměr počtu atomů, přeměněných za sekundu k celkovému počtu atomů radionuklidu v daném vzorku. Jednotkou je s^{-1}.
Aktivita udává pravděpodobný počet atomů radionuklidu v zářiči, u nichž během jedné sekundy nastane samovolná radioaktivní přeměna. Je tedy definována vztahem

$$A = \frac{dN}{dt} \ , \tag{2}$$

kde *dN* je střední počet atomů, přeměněných v časovém intervalu *dt*. Jednotkou aktivity je *becquerel* (*Bq*, rozměr s^{-1}), který představuje jeden rozpad za sekundu. *Plošná aktivita* je potom definována jako podíl aktivity plošně rozložené homogenní látky a její plochy S. Měříme ji v $Bq.m^{-2}$., *Měrná aktivita* je podíl aktivity látky a její hmotnosti. Jednotkou je $Bq.kg^{-1}$. *Objemová aktivita* je podíl aktivity určitého množství radioaktivní látky a jejího objemu. Měříme ji v $Bq.m^{-3}$.
Dávka (absorbovaná) je mírou ozáření látky. Je definována jako podíl energie *dW*, předané ionizujícím zářením objemovému elementu o hmotnosti *dm*:

$$D = \frac{dW}{dm} \tag{3}$$

Jednotkou dávky je *gray* (*Gy,* rozměr $J.kg^{-1}$).
Dávkový příkon vyjadřuje rychlost růstu absorbované dávky. Je určen vztahem

$$D^{+} = \frac{dD}{dt} \tag{4}$$

kde *dD* je přírůstek dávky za dobu *dt*.Jednotkou je $Gy.s^{-1}$
Dávkový ekvivalent je mírou biologické škodlivosti různých druhů ionizujícího záření na lidský organismus. Je to součin dávky D, bezrozměrného jakostního faktoru Q a případně i dalších bezrozměrných modifikujících faktorů N, takže

$$H = D.Q.N \tag{5}$$

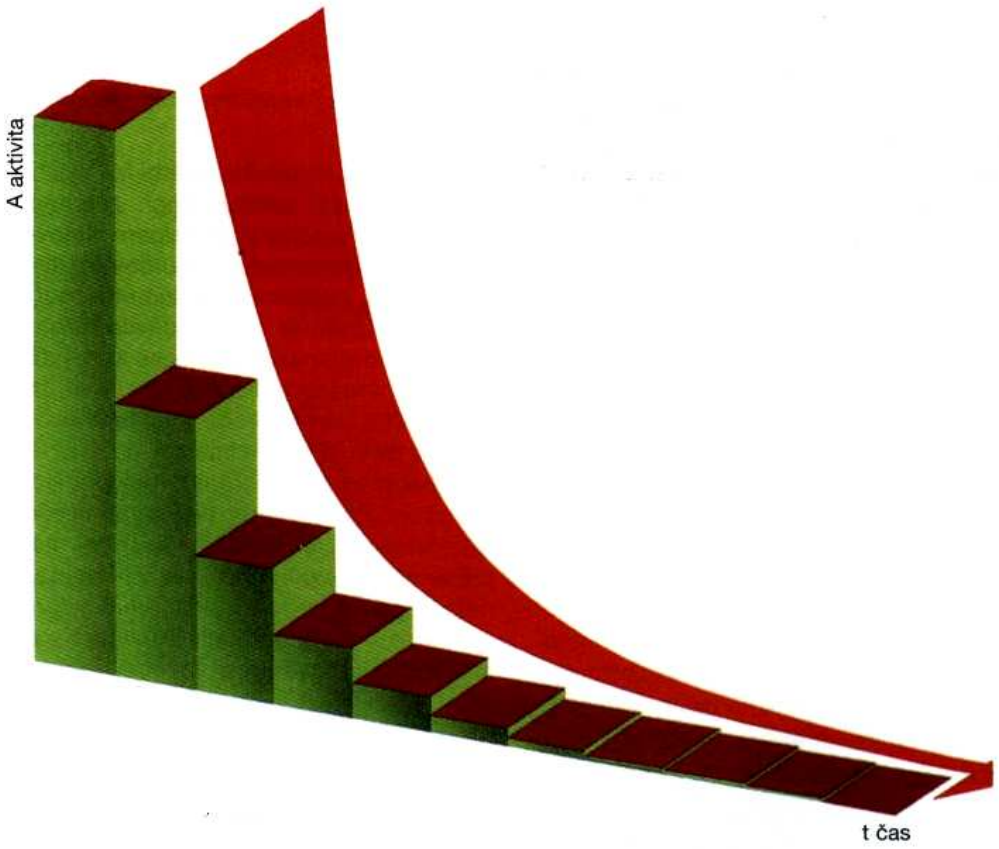
Jednotkou dávkového ekvivalentu je *sievert* (*Sv*).
Příkon dávkového ekvivalentu vyjadřuje rychlost růstu dávkového ekvivalentu a je dán vztahem

$$H^{+} = \frac{dH}{dt} \tag{6}$$

kde *dH* je přírůstek dávkového ekvivalentu za dobu *dt*. Jednotkou je $Sv.s^{-1}$
Efektivní dávkový ekvivalent je vážený průměr středních hodnot dávkového ekvivalentu H_T v tkáních a orgánech lidského těla, přičemž váhové faktory w_T jsou stanoveny normou:

$$H_E = \Sigma(w_T.H_T) \qquad (7)$$

Jednotkou efektivního dávkového ekvivalentu je *sievert*.

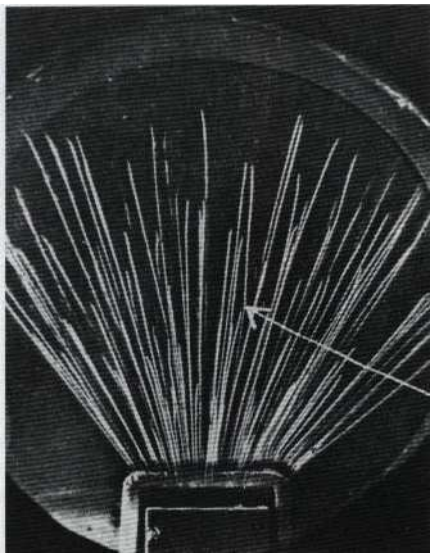


Obr.4. K objasnění pojmu „Poločas přeměny“

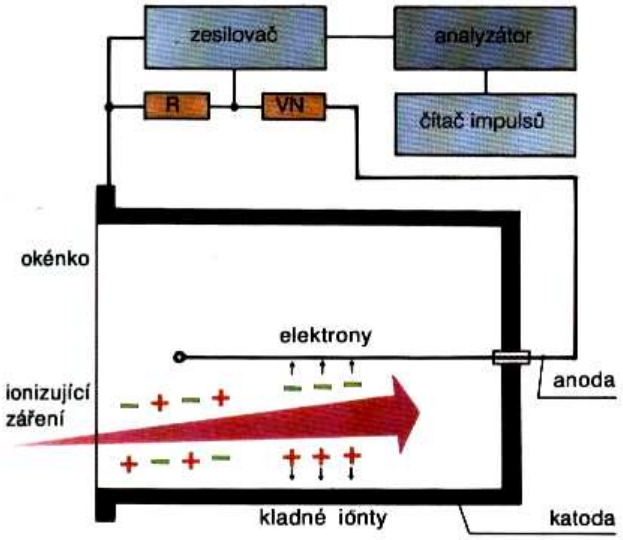
4. Měření radioaktivního záření.

Radioaktivní záření je lidskými smysly nepostižitelné a proto k jeho měření musíme využívat přístrojů, založených na různých účincích ionizujícího záření. Tak například můžeme měřit elektrický náboj iontů, vzniklých průchodem záření látkou. Protože množství vytvořeného náboje je zpravidla malé, je třeba ho různými metodami zesílit. Postupně uvedeme ty nejpoužívanější z nich:

Wilsonova mlžná komora. Ionizující záření vytvoří.na své cestě srážkami s atomy vzduchu řadu iontů, které se stanou tzv. *kondenzačními centry*, na nichž se vytvoří velmi malé kapičky vodní páry (obdoba stopy za tryskovým letadlem). Musíme proto experiment zařídit tak, aby právě v okamžiku, kdy chceme měřit, došlo k přesycení vodní páry v komoře (např. adiabatickým ochlazením). Pomocí vnějšího magnetického pole, které zakřiví dráhu nabité částice lze určit náboje i hmotnosti pohybujících se částic (a zjistit, které z nich jsou neutrální). Výsledkem je pak zpravidla fotografie jejich drah. (Obr.5.). Podobný je i princip **bublinkové komory** s kapalným vodíkem jako náplní (podél dráhy částice vznikají drobné kapičky plynného vodíku), nebo **silná vrstva fotografické emulze.**



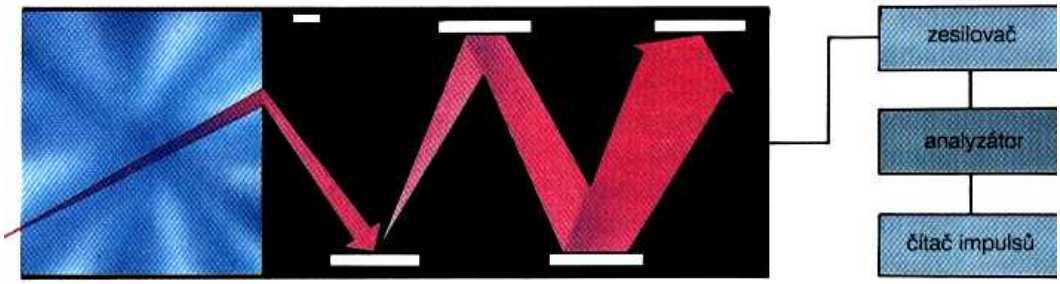
Obr.5. Wilsonova mlžná komora (částice alfa)



Obr.6. Princip Geigerova – Műllerova počítače.

Plynové detektory jsou rovněž založeny na principu ionizace a excitace atomů plynu. Plyn je uzavřený v kovovém obalu s elektrodou uprostřed a mezi tuto elektrodu a kovový obal je vloženo napětí. Jakmile do detektoru vnikne záření, způsobí ionizaci, která se projeví jako ionizační proud mezi elektrodou a obalem. Podle závislosti proudu na napětí se rozlišují různé typy detektorů (ionizační komora, proporcionální počítač, Geigerův – Műllerův počítač (Obr.6)).

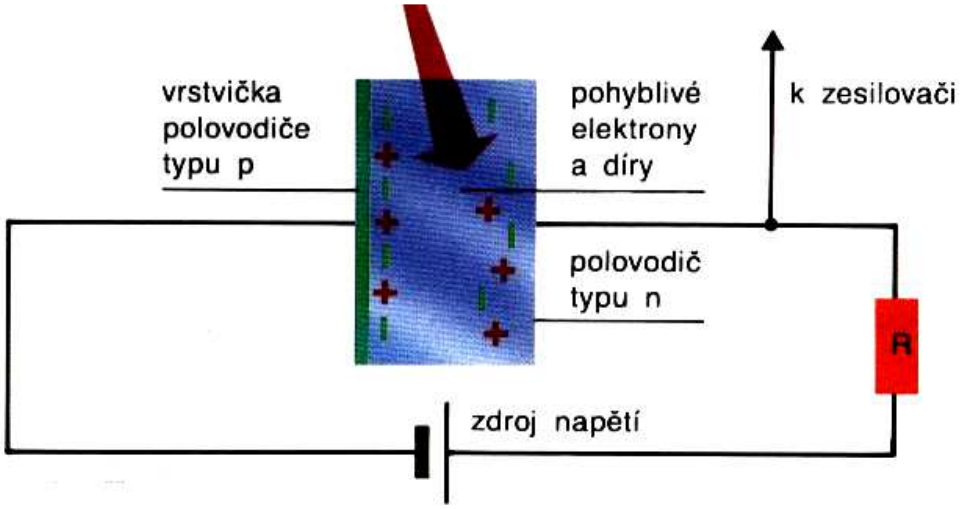
Termoluminiscenční dozimetr. Termoluminiscenční látka má tu vlastnost, že záření v ní vybudí elektrony do vyššího energetického stavu. Když se pak ozářená látka zahřeje (asi na 200 ^{0}C), elektrony se vracejí do základního stavu a přebytek své energie vyzáří ve formě světelných záblesků. Ty se pomocí fotonásobiče (Obr.7) převádějí na napěťové impulzy a měří.



Obr.7. Princip fotonásobiče**.**

Scintilační detektory jsou založeny na podobném principu, jako dozimetry termoluminiscenční. Záření vybudí ve scintilátoru elektrony do vyššího energetického stavu a návrat elektronů do základního stavu se projeví jako světelné záblesky, které se opět měří fotonásobičem. Scintilátory mohou být konstruovány jako pevné krystaly anorganických resp. organických sloučenin (např. jodid sodný, resp. antracen), nebo roztoky či suspenze organických scintilátorů v organickém rozpouštědle, např. toluenu. Vzorky se pak měří přímo rozpuštěné ve scintilátoru.

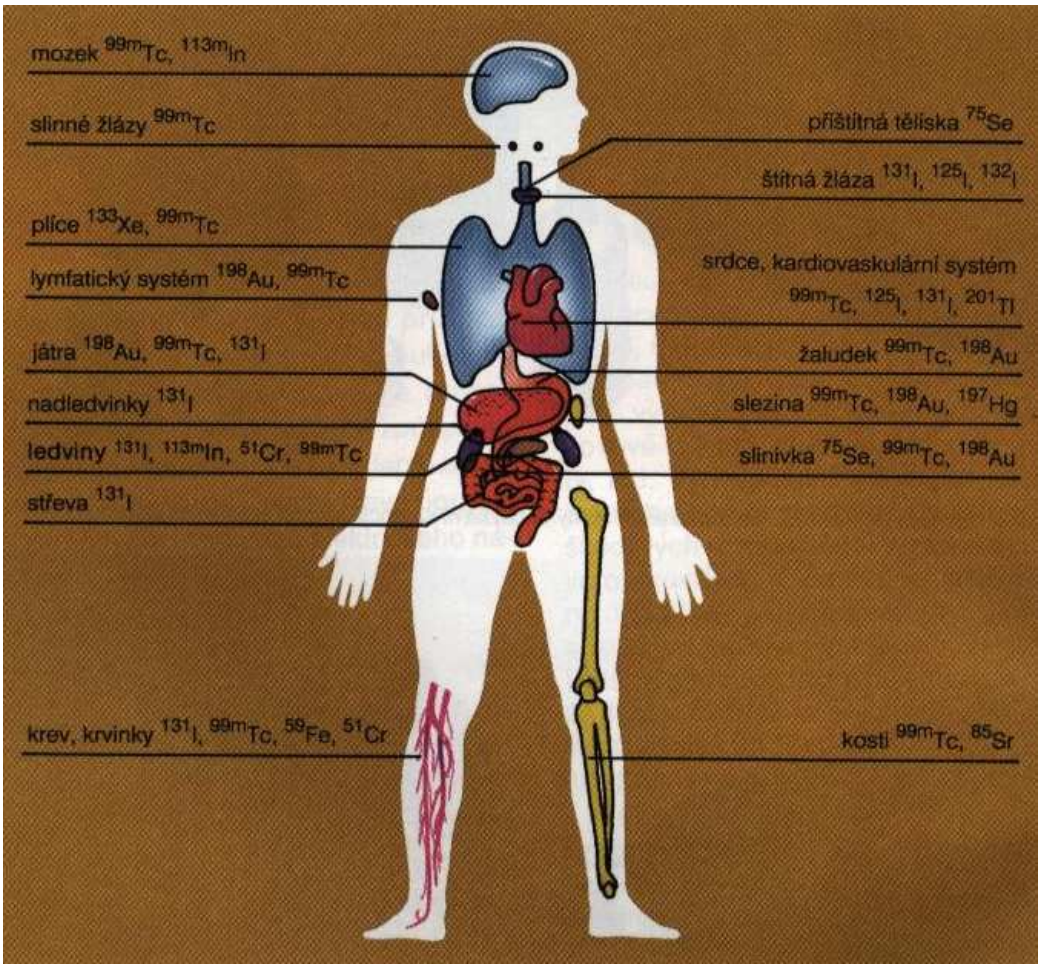
Polovodičové detektory pracují na následujícím principu: záření způsobí v polovodiči přeskok elektronu do vodivostního pásu polovodiče. Působí – li na polovodič elektrické pole, projeví se tento přeskok jako náhlé zvýšení vodivosti a vhodné elektrické zařízení zaznamená elektrický impulz (Obr.8.). Polovodičové detektory jsou vyráběny obvykle z monokrystalu křemíku nebo germania. K uspokojivé činnosti potřebují chlazení na teplotu kapalného dusíku.



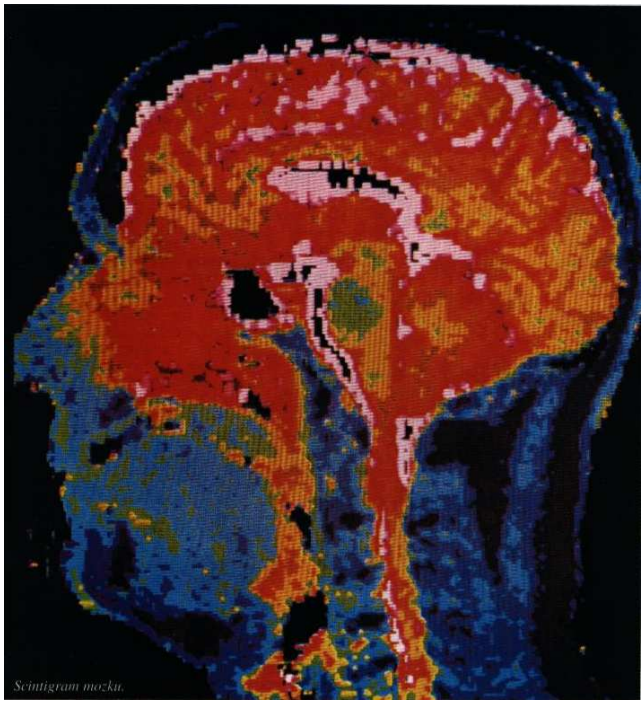
Obr.8. Schéma polovodičového detektoru.

5. Využití ionizujícího záření ve zdravotnictví a v biologii.

Ionizující záření má široké využití prakticky ve všech oblastech lidské činnosti, od průmyslu, přes zemědělství, až po zdravotnictví . Protože téma příspěvku je zaměřeno na idské zdraví, všimneme si využití záření zejména ve zdravotnictví a v biologii. Ve zdravotnictví jsou radionuklidy využívány jak k léčebným, tak k diagnostickým účelům – tzv. **nukleární medicína**. Používané radioaktivní prvky se po chemické stránce nijak neliší od prvků neradioaktivních. Proto v praxi používáme takové sloučeniny, které se selektivně zachytávají a koncentrují ve vyšetřovaném orgánu nebo tkáni a které zase místo zachycení po jisté době opouštějí podle funkce orgánu nebo metabolických pochodů Jako příklad může sloužit použití radioaktivního jódu při vyšetřování správné funkce štítné žlázy, ve které se právě jód selektivně shromažďuje. Na Obr.9 jsou uvedeny orgány lidského těla spolu s prvky, které se v nich ukládají a na Obr.10 je uveden tzv. scintigram mozku, který vznikl tak, že pacientovi byl podáván radioaktivní prvek Tc, nebo In (Obr.9).

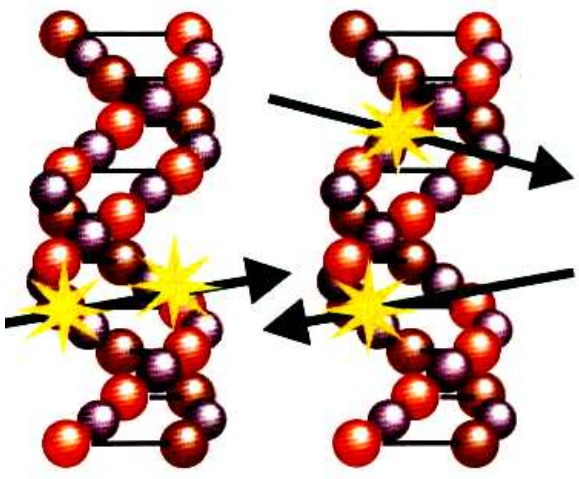


Obr.9. Jednotlivé orgány lidského těla a radionuklidy, používané k jejich vyšetření.

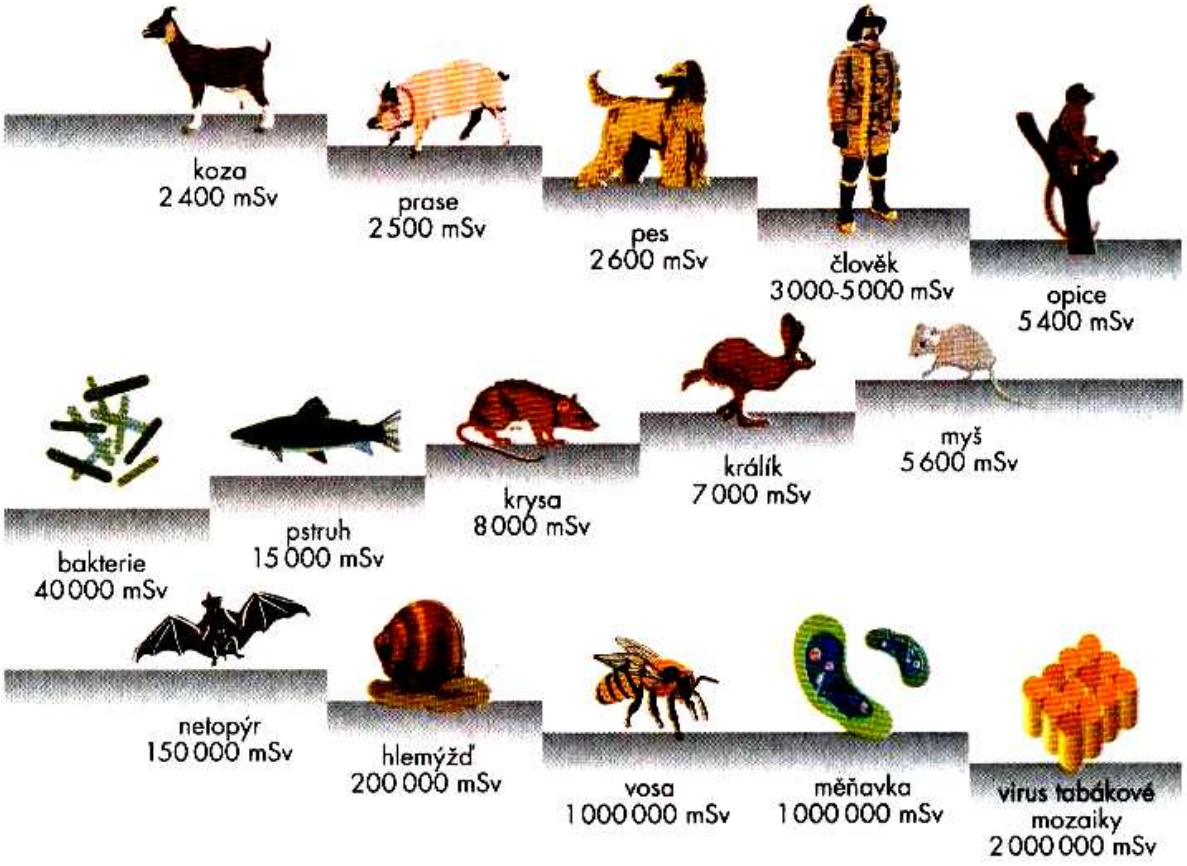


Obr.10. Scintigram mozku.

Balneologie používá radioaktivní materiály již velmi dlouho. Příkladem mohou být světoznámé lázně v Jáchymově, kde se vodou, obsahující radioaktivní radon léčí nemoci pohybového ústrojí, artróza, revmatismus apod.
Radioterapie využívá účinků záření k léčení zhoubných nádorů. Nádory jsou tvořeny mladými buňkami, které se velmi rychle dělí a jsou mnohem citlivější vůči záření, než zdravá tkáň. K ničení zhoubných nádorů se nejčastěji používá rentgenové záření, nebo záření gama radionuklidů ^{60}Co, ^{137}Cs a ^{226}Ra. Lze použít i urychlených elektronů apod.
Leksellův gama nůž se používá při velmi obtížných operacích mozkových nádorů. Gama nůž obsahuje 201 kobaltových zářičů ve formě proutků. Systém clon zajistí namíření jednotlivých paprsků záření do operovaného místa s přesností 0,1 mm. Vysoká dávka záření gama zničí v krátkém okamžiku a zcela bezbolestně přesně vymezený a ostře ohraničený kousek tkáně. Terapie trvá 5 až 30 minut, protože je vše řízeno počítačem . Většinou může jít pacient druhý den domů.
Šlechtitelství využívá působení záření na dědičnou informaci v buňkách. Tento proces je hybnou silou evolučního vývoje všech živých organismů. Zářením narušená dědičná informace v DNK (Obr.11) způsobí vznik tzv. *mutace*, která může být pozitivní, tj. směřující ke vzniku lepšího jedince, nebo opačná (ta je zpravidla potlačena pro ni nepříznivými podmínkami). Jestli do tohoto procesu zasáhne navíc člověk výběrem lepších jedinců, dochází například ke vzniku nových odrůd ovoce, zeleniny apod. Vznik nových odrůd lze urychlit tak, že např. rostliny ozáříme pronikavým zářením poměrně vysoké intenzity a tak lze získat rychle značný počet nových odrůd (v ovocnářství to jsou tzv. spur-typy jabloní, nové odrůdy jahod, obilí, atd.).
Poměrně dosti známé je i určování stáří odumřelých organismů pomocí tzv. **radiokarbonové metody**. Ta spočívá v měření aktivity zbytku izotopu uhlíku ^{14}C, který se do živých organismů dostával z oxidu uhličitého, obsahujícího i tento radionuklid, vzniklý reakcí kosmického záření s dusíkem. Zatímco v živém organismu se udržuje množství ^{14}C v rovnovážném stavu, po jeho úmrtí se již tento izotop prostřednictvím látkové výměny pochopitelně nedoplňuje a jeho zbytek se rozpadá. Protože poločas rozpadu tohoto izotopu je 5730 let, dává uvedená metoda spolehlivé výsledky pro období 5000 až 20 000 let. Lze ji tedy s výhodou používat v archeologii, antropologii i geologii.
Zajímavá je i **citlivost** různých organismů na ozáření. Na Obr.12 je tato citlivost znázorněna, je zde vynesen dávkový ekvivalent v mSv, který přežije polovina ozářených jedinců.



Obr.11. Interakce záření s molekulou DNK



Obr.12. Citlivost různých organismů na záření.

6. Radon a jeho vliv na lidské zdraví.

6.1.Historie objevu radonu..

Brzy po objevu rádia bylo zjištěno, že předměty i vzduch v okolí otevřených rádiových preparátů mají rovněž radioaktivní vlastnosti. Tento jev byl nejdříve vysvětlován tzv. indukovanou radioaktivitou. Roku 1900 dospěl německý fyzik Dorn k názoru, že příčinou indukované radioaktivity je radioaktivní plyn, který se uvolňuje z rádia, podobně jako tomu je u thoria a aktinia (některé prameny uvádějí jako objevitele tohoto plynu francouzského vědce A.Deberna). Další práce (Rutherford, Ramsay, Soddy) prokázaly, že nový plyn má atomové číslo 86 a je tedy prvkem ze skupiny vzácných plynů. Jeho izotop s hmotovým číslem 222, vzniklý transmutací z ^{126}Ra je radioaktivní a Rutherford jej navrhl nazvat „emanace“ (Em). Později byl tento plyn podle Ramsaye po krátkou dobu nazýván „niton“ (Nt) a nakonec nahrazen oficiálně přijatým názvem „radon“ (1923).

Radon má tři izotopy, náležející k radioaktivním řadám uranu, thoria a aktinia: radon ^{222}Rn (emanace radia), thoron Tn, čili ^{220}Rn (emanace thoria) a aktion An, čili ^{219}Rn (emanace aktinia). Svůj název má radon podle izotopu ^{222}Rn s nejdelším poločasem rozpadu – ten vzniká jako produkt rozpadu ^{226}Ra (1 g rádia emanuje asi 1 mm^3 radonu za 24 hodin). Izotop

^{222}Rn má poločas rozpadu 3,825 dne a vyzařuje α - částice, jejichž dolet ve vzduchu je při atmosférickém tlaku asi 4 cm.

Koncentrace radonu v atmosféře je odhadována na 6.10^{-18} % objemových. Při pokojové teplotě je radon plynem, jehož bod varu je t_{varu} = - 62 ^{0}C a bod tání $t_{tání}$ = - 71 ^{0}C. Stejně jako ostatní inertní plyny se neúčastní na vzniku chemických sloučenin, může tvořit pouze molekulární (komplexní) sloučeniny, např. Rn.6 H_2O (hexahydrát radonu). Radon navzdory své chemické netečnosti je považován za jedovatý, což souvisí s jeho radioaktivitou.

6.2.Člověk a radioaktivita.

Radioaktivita nás doprovází odedávna, doslova od kolébky až do hrobu a stala se součástí životního prostředí kolem nás, kterou si přímo neuvědomujeme, neboť je našimi smysly nepostižitelná. Uvědomovat si ji začneme a více o ní hovořit teprve tehdy, až se nějakým způsobem projeví její záporné účinky (zpravidla na našem zdraví), nebo ji potřebujeme využít k nějakému účelu.

Jako typický příklad z minulosti můžeme uvést téměř tajemné a v tehdejší době nevysvětlitelné jevy, ke kterým docházelo v Jáchymově. Tam se totiž již ve středověku dolovalo stříbro a město v té době značně vzkvétalo. Stříbrné žíly však byly často doprovázeny zvláštní černou a těžkou horninou, která byla horníky nazývána „Černou smrtí“, zřejmě podle svých účinků - rakoviny plic. Její druhý název, méně hrozivý, byl „Smolinec“, neboť přinášela smůlu (její nalezení signalizovalo obvykle konec stříbrné žíly). Ženy horníků z Jáchymovska byly zaměstnány v místních sklárnách a malovaly sklo barvou, získanou z rozdrceného smolince. Protože štětec mezi rty upravovaly do špičky, trpěly často rakovinou rtů a ústní dutiny. Tajemství černé horniny rozřešili až v roce 1926 manželé Curieovi, když objevili její radioaktivitu a izolovali z ní prvek rádium.

Neblahé účinky radioaktivních látek na živé organismy si lidstvo začalo od té doby uvědomovat stále více (od výbuchů atomových bomb v Japonsku na konci II. světové války, přes následky zkušebních atomových výbuchů v době studené války, až po Černobylskou havárii v rove 1986). Protože se jedná často o účinky skutečně katastrofální, mohlo se snadno stát a stále se stává, že strachu z radioaktivity lze využít (zejména když se zpolitizuje), ke zpomalení, nebo i k znemožnění mírového využití jaderné energie. Příkladem mohou být akce, zaměřené proti výstavbě a činnosti jaderných elektráren (u nás zejména proti dostavbě jaderné elektrárny Temelín), přestože víme, že náš další vývoj si bez nich umíme těžko představit.

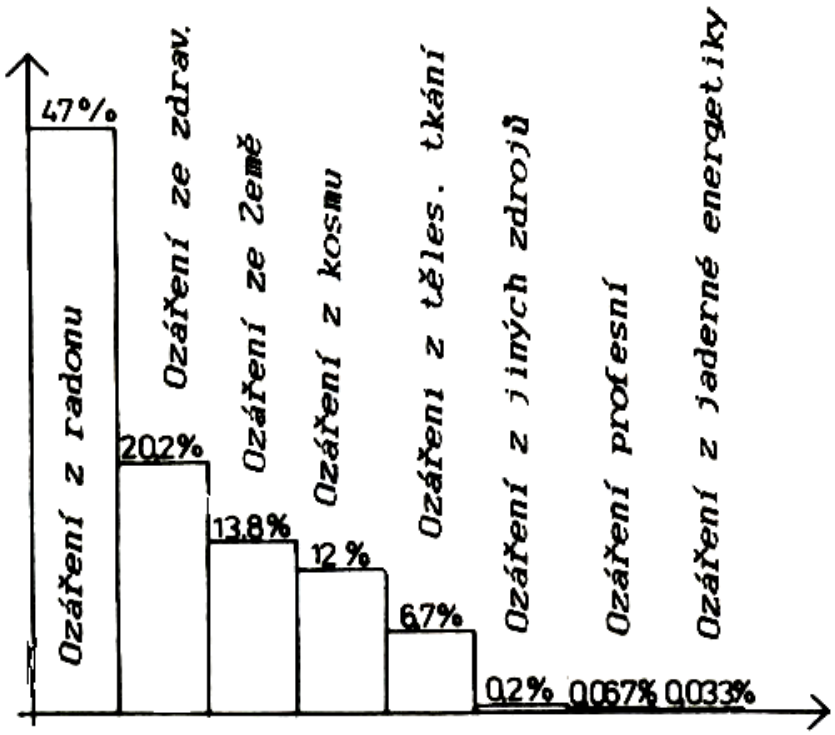
V posledních desetiletích se k těmto obavám přidal i strach ze škodlivých účinků radonu a jeho dceřinných produktů. Jak již bylo uvedeno, vzniká radon jako produkt rozpadu uranu 238 a v další kapitole si tohoto rozpadu všimneme podrobněji. Radon proniká z půdy nejen do ovzduší, ale i do našich obydlí, kde se koncentruje, rozpadá a vytváří část vnitřního mikroklimatu, negativně působícího na zdraví člověka. Samotný radon, je-li vdechnut do plic, je z nich opět z velké části vydechnut ven. V plících však zůstávají produkty jeho rozpadu (těžké kovy). Tyto tzv. dceřinné produkty, ať už volné, nebo usazené na aerosolech a prachových částicích, zůstávají v dýchacích cestách a plícních sklípcích, kde se dále rozpadají a „bombardují“ s vysokou rozpadovou energií citlivou tkáň, takže ji mohou nevratně poškodit.

Proč nás radon zajímá až nyní, vždyť s ním lidstvo žije již po dlouhá desetiletí ? Důvodů může být několik:

- Radon sice v dřívějších dobách vnikal velice snadno do lidských obydlí přes udusanou hlínu, prkennou či kamennou podlahu, ale stejně snadno z nich unikal komínem, spárami a jinými netěsnostmi v oknech, dveřích či střeše, jinými slovy, snadno se odvětrával. V současné době, kdy se snažíme uspořit co nejvíce energie, je přirozené

odvětrávání omezováno a radon spolu se svými dceřinnými produkty se v místnostech koncentrují.

- V posledních desetiletích vzrostlo silně znečištění životního prostředí. Účinky jednotlivých toxických látek se sčítají a výsledkem je narušení zdravotního stavu lidské populace. V takovém případě mohou v porovnání s minulostí stačit nižší dávky ozáření ke vzniku některých nemocí.
- Třetí důvod plyne z Obr.13, kde je uvedeno složení průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu ozáření obyvatelstva v závislosti na původu záření. Z obrázku je vidět kromě jiných překvapivých zajímavostí, že radon a jeho dceřinné produkty se podílejí na ozáření obyvatelstva téměř z 50% a je třeba poznamenat, že v eliminaci tohoto zdroje záření jsme zatím příliš nepokročili.



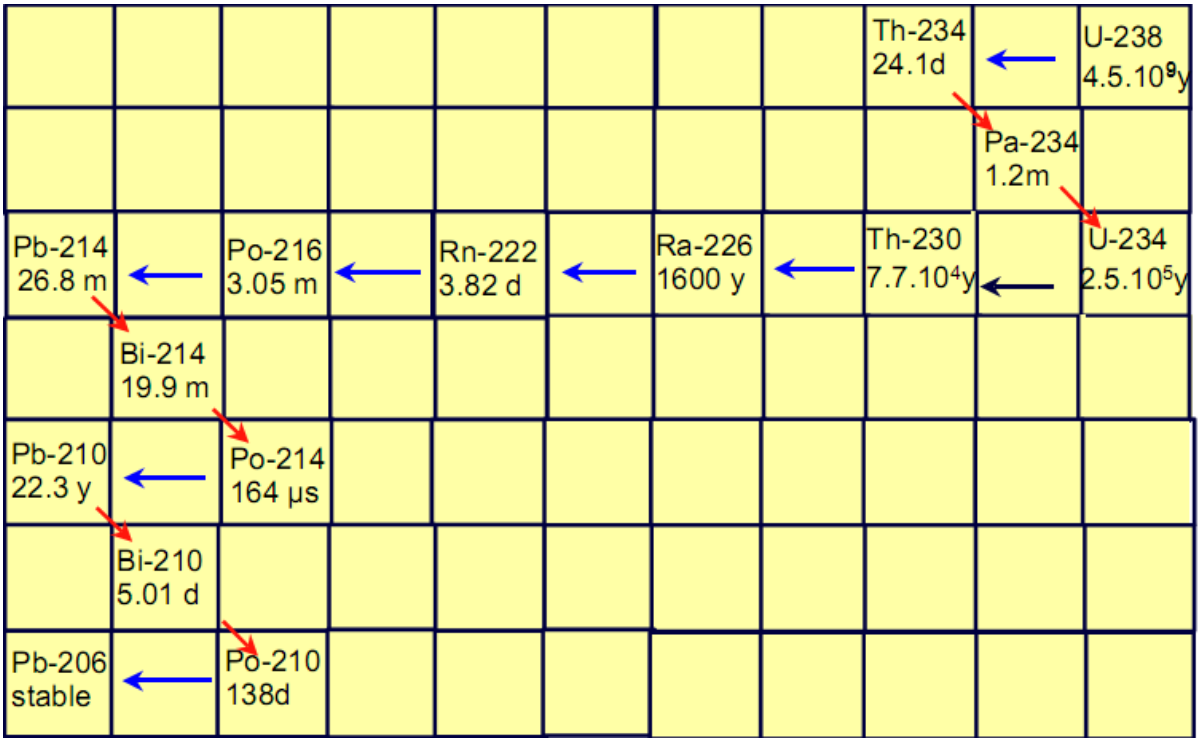
Obr.13. Skladba průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu ozáření (3mSv = 100%). Zpracováno podle zprávy vědeckého výboru OSN pro účinky atomového ozáření.

6.3. Radon a jeho dceřinné produkty.

Radon patří mezi inertní plyny a každý z nás s ním přichází do styku denně a prakticky kdekoliv. Vzniká zcela samovolně jako jeden z produktů uran – rádiové rozpadové řady. Jeho poločas rozpadu je 3,825 dne a rozpadá se na své dceřinné produkty ^{218}Po (Ra A), ^{214}Pb (Ra B), ^{214}Bi (Ra C) a ^{214}Po (Ra C´) (obr.14). Jsou to kovy, které se ve vzduchu mohou pohybovat volně v atomárním stavu, nebo se mohou vázat na aerosoly či prachové částice a tak mohou být vdechnuty do plic a tam zachyceny.

Radioaktivitu radonu a jeho dceřinných produktů měříme v jednotkách Bq.m^{-3} (becquerel) – tzv. *objemová aktivita.* Objemová aktivita radonu ve vzduchu, rovná 50 kBq.m^{-3} znamená, že v 1 m^3 vzduchu dojde za 1 sekundu k 50 .10^3 radioaktivním přeměnám. Objemová aktivita radonu v kapalinách je udávána v Bq.l^{-1} , aktivita pevných látek v Bq.kg^{-1} .

Primárním zdrojem radonu v geologickém prostředí je ^{238}U, přítomný v horninách. Uran tvoří samostatné minerály (např. uraninit, nebo uranové slídy), nebo je přítomen v horninotvorných materiálech (např. biotit a apatit). Obecně lze říci, že nejvyšší obsah uranu je ve vyvřelých horninách (durbachit, žula), střední v horninách metamorfovaných (pararuly) a nejnižší v sedimentech (pískovce, jílovce). Dalším zdrojem uranu jsou podzemní vody a stavební materiál. Ty jsou však méně podstatné.



Obr.14. Rozpadová řada ^{238}U a dceřinné produkty radonu.

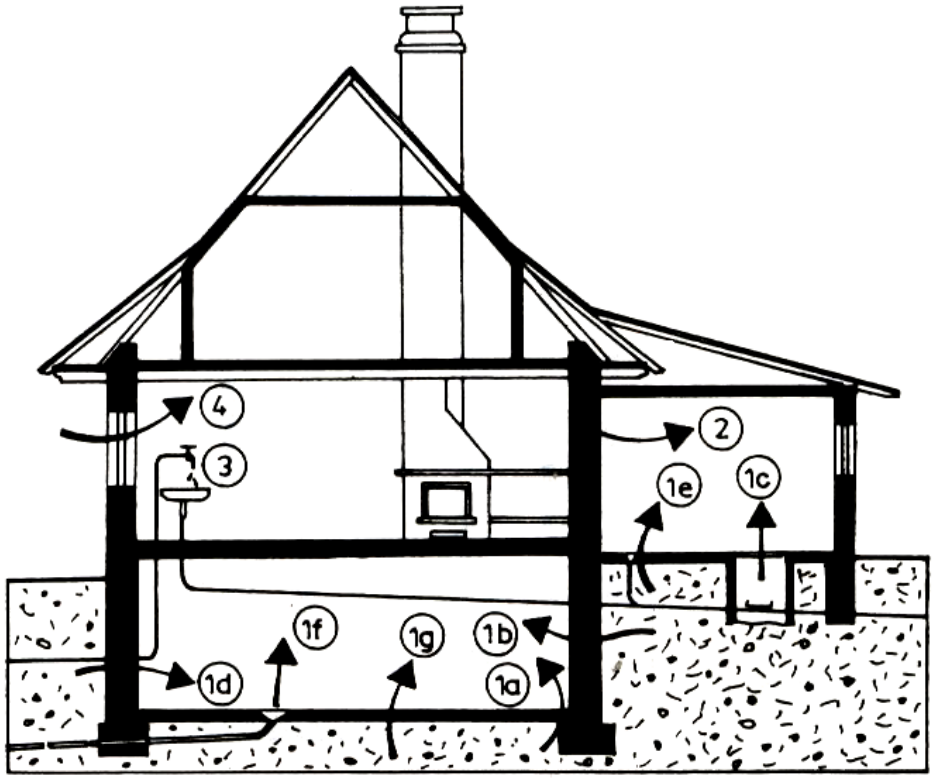
Způsoby pronikání radonu do lidských obydlí jsou schematicky uvedeny na Obr.15. Z něho plyne, že jsou to zejména trhliny a netěsnosti v podlaze sklepa, nebo nejnižšího podlaží, drenážní potrubí, případně studny a studánky. Rovněž to může být stavební materiál (např. pórobetonové tvárnice, vyráběné dříve z některých druhů popílku) a též venkovní vzduch.

V důsledku proudění vzduchu v místnostech se radon rozptýlí prakticky rovnoměrně po celém jejich objemu. Jeho koncentrace se však mění v závislosti na denní či noční době (závislost je i na rozdílu venkovní a vnitřní teploty, větru apod.) a rovněž je pozorována závislost na ročním období. Nejvyšší koncentrace radonu bývá zaznamenávána v nevětraných sklepních a přízemních místnostech.

Dceřinné produkty radonu, které vznikly α nebo β rozpadem, mohou po určitou dobu existovat v atomárním stavu. Převážná část z nich se však rychle naváže na aerosoly a prachové částice, nebo na povrchy stěn a nábytku (Obr.16).

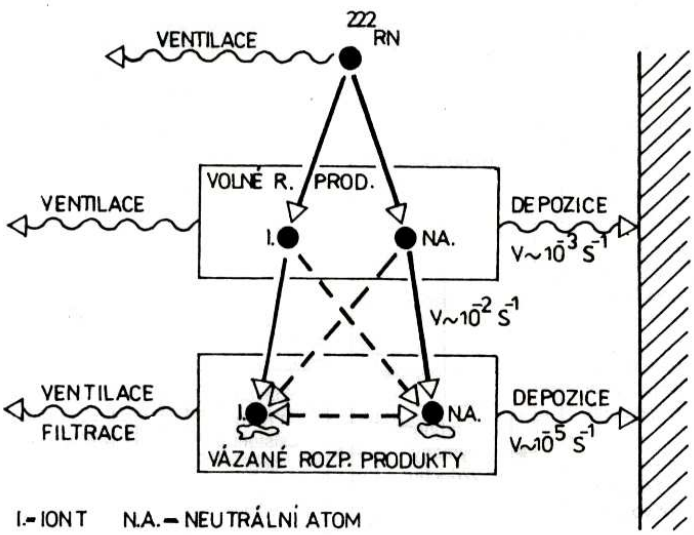
Z tohoto kvalitativního rozboru plyne, že koncentrace aerosolů a prachových částic v určitém objektu je důležitým faktorem, který musíme vzít v úvahu nejen při měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů samotném, ale i při odhadu poškození zdraví člověka. Budeme-li totiž měřit koncentraci dceřinných produktů radonu v místnosti se stálou objemovou aktivitou radonu, potom při vysoké koncentraci prachových částic naměříme z výše uvedených důvodů vyšší hodnotu aktivity, než při koncentraci nízké. Proto je třeba znát koncentraci aerosolových a prachových částic, přítomných v interiéru. Další možností je

přímé (absolutní) měření koncentrace radonu, které není ovlivněno výskytem aerosolů a prachových částic.



Obr.15. Cesty vnikání radonu do lidských obydlí.

.



Obr.16. Volné a vázané produkty rozpadu v interiéru budov.

6.4.Vliv radonu na zdraví člověka.

Jak jsme již uvedli, není pro člověka samotný radon nebezpečný, jeho zdraví však mohou ohrozit dceřinné produkty radonu. Radon je vdechován a vydechován prakticky bez ozáření tkání. Zato dceřinné produkty, ať již volné, nebo usazené na aerosolech a prachových

částicích, se usazují v průduškách a plícních sklípcích člověka a ozařují je. Nebezpečné jsou zejména částice α o doletu několika desítek μm, neboť jejich veškerá energie je soustředěna do malé oblasti živé tkáně plic – nejcitlivější je tzv. tracheobronchiální oblast plic. Lékařský výzkum dospěl k závěru, že toto ozařování je jedním z faktorů, podílejících se na vzniku rakoviny plic. Žádné jiné zdravotní účinky radonu ani jeho rozpadových produktů na zdraví člověka nebyly pozorovány (ani střídmé pití vody s radonem neškodí – žaludek je zřejmě v tomto směru evolucí prověřený a dosti otrlý)..

Co se týká škodlivosti volných a vázaných rozpadových produktů, shodli se vědci na závěru, že volné rozpadové produkty jsou asi 30x škodlivější, než produkty vázané. Pravděpodobně je to tím, že mnohem lehčí volné částice (atomární) nemají díky malé setrvačnosti tak velkou kinetickou energii a usadí se při vdechnutí již na začátku plic (tracheobronchiální oblast). Těžké útvary – prach a aerosoly, dolétnou až do plícních sklípků, které však nejsou tak silně ozářeny, jako by tomu bylo v případě volných částic, neboť vzdálenost mezi vyzařující částicí a sliznicí je mnohem větší. Navíc jsou naše plíce vybaveny dokonalým, evolucí prověřeným mechanismem, dovolujícím odstranit (vykašlat) usazené prachové částice.

Ozáření plícní sliznice je dále závislé na věku, rychlosti dýchání, samočistící schopnosti plic a vůbec na celkovém zdravotním stavu jedince. Výsledky měření průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu se z uvedených důvodů značně od sebe liší. Můžeme však říci, že pravděpodobnost vzniku rakoviny plic je úměrná celkové vdechnuté aktivitě dceřinných produktů radonu, tj. závisí na koncentraci radonu a délce pobytu v místnosti s určitou jeho koncentrací.Abychom si co nejvíce přiblížili riziko ozáření plic produkty radonu, používáme srovnání jeho účinků s neblahými účinky kouření cigaret. Z měření, uskutečněných u nás i v zahraničí plyne, že dceřinné produkty radonu mají na svědomí 10 – 30% onemocnění rakovinou plic (zřejmě jde převážně o nevysvětlitelná onemocnění zdravě žijících nekuřáků).

Na základě doporučení Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu byly v naší republice stanoveny tyto mezní hodnoty rovnovážné objemové aktivity dceřinných produktů radonu C_{ekv}:

- stávající zástavba …… 200 $Bq.m^{-3}$
- nová zástavba ……. 100 $Bq.m^{-3}$.

Jsou-li tato meze překročeny, má majitel domu nárok na státní finanční podporu na učinění ozdravných antiradonových opatření (u nové zástavby jsou povinná). Abychom mohli posoudit nutnost realizace ozdravných opatření, jsou objekty rozděleny do několika kategorií podle stupně překročení základní zásahové úrovně 200 $Bq.m^{-3}$.

1. $C_{ekv} = 200 – 600$ $Bq.m^{-3}$ ($C_{Rn} <$ cca 1200 $Bq.m^{-3}$).
   Opatření by měla být provedena nejpozději do 10 let od zjištění stavu. Většinou postačí jednodušší, méně náročné zásahy.
2. $C_{ekv} = 600 – 2000$ $Bq.m^{-3}$ ($C_{Rn} <$ cca 4000 $Bq.m^{-3}$).
   Stavebně technické úpravy je nutno provést do 3 let. Riziko rakoviny plic je srovnatelné s lehkým kuřáctvím.
3. $C_{ekv} = 2000 – 6000$ $Bq.m^{-3}$ ($C_{Rn} <$ cca 12 000 $Bq.m^{-3}$)
   Vysoká naléhavost řešení situace, opatření je nutné realizovat do 1 roku. Lze očekávat poměrně vysoké finanční náklady a proto je třeba zvážit účelnost investice z hlediska stáří a hodnoty budovy. Riziko rakoviny plic je srovnatelné s kouřením asi dvou balíčků cigaret denně.
4. $C_{ekv} >$ 6000 $Bq.m^{-3}$ ($C_{Rn} >$ cca 12 000 $Bq.m^{-3}$).

Mimořádně vysoká naléhavost řešení, zahájení ozdravných opatření by mělo být provedeno okamžitě. Představuje značné zásahy do konstrukce obydlí a vyžaduje vystěhování uživatelů. Riziko rakoviny je srovnatelné s rizikem těžkého kuřáka.

6.5.Zdroje radonu, ozdravná opatření.

Již v úvodní části bylo řečeno, jakým způsobem proniká radon nejčastěji do našich obydlí (obr.15). Nyní provedeme podrobnější diskusi těchto možností spolu s ukázkou některých základních typů ozdravných opatření.

Radon je do místností uvnitř objektu nasáván spolu s půdním vzduchem v důsledku podtlaku v interiéru vzhledem k vnějšímu prostředí. Hlavním transportním mechanismem plynu v moderních obydlích se základovou betonovou deskou je proudění půdního vzduchu trhlinami v této desce a v suterénních stěnách. Uvedeme nejdůležitější faktory, které ovlivňují tento transport:

a) velikost podtlaku v budově. Nasávání radonu s půdním vzduchem je závislé na tlakovém rozdílu mezi základovou půdou a spodní částí budovy. Tato tlaková diference je způsobena odlišností hustot venkovního a vnitřního vzduchu. U nižší zástavby je to v zimním období 2 – 10 Pa, u desetipodlažních budov to bývá až 30 Pa. Účinek rozdílu tlaku je podporován vertikálními komunikacemi – šachtami, komíny, schodišti.

Snahou projektantů by mělo být rozdělení schodišťového prostoru do několik částí,oddělených dobře utěsněnými dveřmi. Ventilační zařízení by měla svými účinky eliminovat podtlak.

b) Koncentrace radonu v půdním vzduchu. Koncentrace radonu v půdním vzduchu se mění s místem i časem a je ovlivňována zejména měrnou aktivitou ^{226}Ra v mateřské hornině a propustností půdních vrstev. Největší aktivitu vykazují vyvřelé horniny a nejnižší naopak různé sedimenty. To je názorně vidět z údajů, uvedených v Tab.1.

Hornina	**A_{Rn} / Bq.m^{-3} /**	**Hornina**	**A_{Rn} / Bq.m^{-3} /**
Žula	75 – 150	Spraš	30 - 50
Znělec	65 – 135	Vápenec	30 - 35
Granodiorit	50 – 140	Čedič	15 - 40
Křemenec	5 – 180	Písek	5 - 30
Břidlice	35 - 130	Sádrovec	15
Rula	30 – 80	Dolomit	15
Porfyr	30 – 70	Opuka	10

Tab.1.

Geologickou stavbu ČR tvoří ze dvou třetin metamorfované horniny krystalinika (porfyr, ortoruly, metabazity atd. – Obr.17). Velké plošné zastoupení mají i vyvřelé horniny (granity, granodiority, diority, syenity, pegmatity, durbachity). Dalším typem hornin s velkým plošným rozsahem jsou pískovce, které protože jsou dobrým transportním prostředím pro vodu a plyny, mohou sloužit jako přirozené zásobárny radonu. Všechny tyto horniny obsahují stopová množství radioaktivních prvků, z nichž nejdůležitějšími jsou ^{238}U a ^{226}Ra.

Radon je z míst jeho vzniku transportován přes následné vrstvy a jeho transport je ovlivňován zejména složením zeminy (pískem se šíří nejsnadněji) a její vlhkostí (radon je ve vodě dobře rozpustný). Rovněž spodní voda dobře transportuje radon – studánky a studny bývají jeho vydatnými zdroji.

c) Propustnost půdních vrstev pod základy. Odvětrávání radonu, neboli výměna vzduchu mezi povrchovými vrstvami a atmosférou, je závislé na plynopropustnosti těchto povrchových vrstev. Budou-li propustné, může se radon odvětrávat a lze v nich očekávat jeho nižší

koncentraci. Naopak pod nepropustnou (např. jílovou) vrstvou se bude radon hromadit. Přitom může mít nepropustnost pouze sezónní charakter (zaplnění pórů vodou, zmrznutí mokré půdy). Podobně působí rozsáhlé betonové a asfaltové plochy kolem obydlí a dokonce obydlí samo – čím lépe je dům utěsněn vůči zemině pod ním, tím vyšší je koncentrace radonu pod ním. Lze tedy závěrem říci, že pro významné zvýšení přítomnosti radonu v interiéru musí být splněny tyto podmínky:

1. pod základy budovy musí být dostatečné množství půdního vzduchu,
2. půdní vzduch musí být radonem dostatečně nasycen,
3. geologická vrstva pod základy musí být propustná.

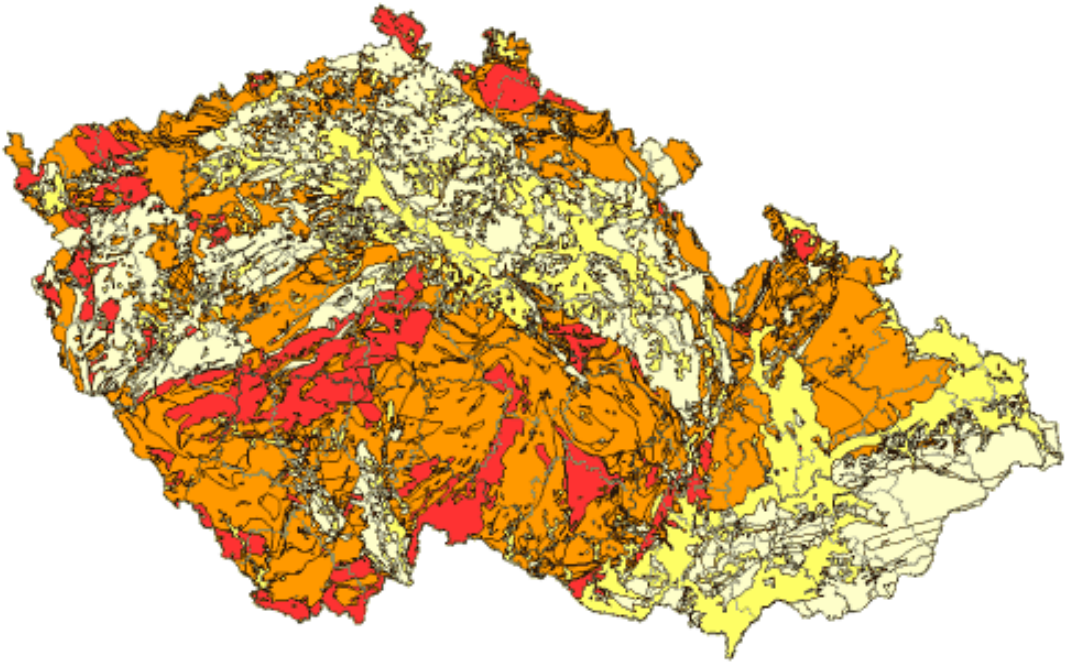
d) Těsnost základových a suterénních konstrukcí. Těsnost a neporušenost základových a suterénních konstrukcí má rozhodující podíl na koncentraci radonu v interiéru. Všechny dříve uvedené předpoklady pro vstup radonu do budovy mohou být splněny, ale budou-li základové konstrukce bez trhlin, radon se do budovy nedostane. Protože koncentrace radonu v půdním vzduchu bývá zpravidla asi 1000 x vyšší, než jaká je potom ve vnitřních prostorách budov, stačí k dosažení přípustných hodnot jenom velmi malá plocha netěsností. Kromě toho může být i samotný stavební materiál radioaktivní. V ČR byla v roce 1991 omezena vyhláškou MZd 76/91 aktivita stavebního materiálu maximální hodnotou 120 $Bq.kg^{-1}$. Je však třeba upřesnit, že toto omezení se vztahuje pouze na stavební materiály, které jsou určeny k výstavbě budov pro bydlení, individuální rekreaci a k výstavbě objektů, v jejichž místnostech se osoby zdržují více jak 1000 hodin ročně (kanceláře, učebny ve školách, prodejny, sály kin apod.). V místnostech takových objektů pak v kterémkoliv místě ve výšce 1 m od podlahy a ve vzdálenosti alespoň 0,5 m od stěn nesmí příkon dávkového ekvivalentu překročit hodnotu 2.10^{-6} $Gy.h^{-1}$. Dále se požaduje, aby součet podílů ekvivalentu objemové aktivity radonu v průměru za rok k hodnotě 200 $Bq.m^{-3}$ a podílu fotonového dávkového ekvivalentu k hodnotě 2.10^{-6} $Gy.h^{-1}$ nebyl větší, než jedna.

Z předcházejících úvah plynou následující *ozdravná opatření*, vedoucí ke snížení koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů v obytných budovách:

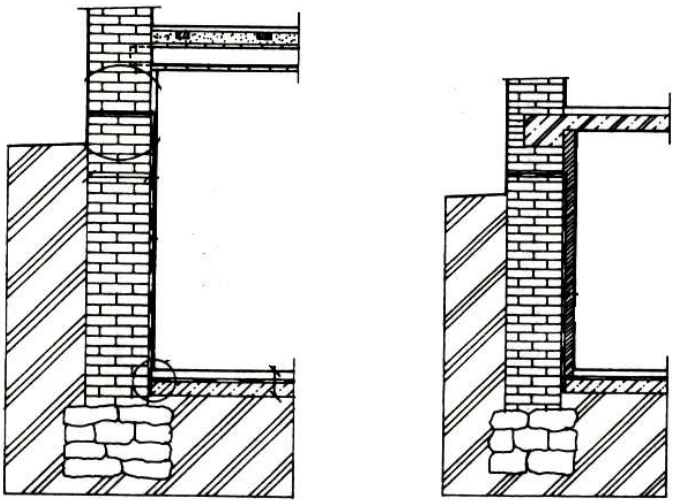
a) Odstranění, nebo snížení podtlaku v objektech.
b) Zvýšení těsností konstrukcí, které jsou ve styku se zeminou.
c) Snížení propustnosti půdních vrstev.
d) Snížení koncentrace radonu v půdním vzduchu.

Z těchto opatření plynou pro projektanty budov některé jednoduché i složitější zásady, po jejichž splnění lze podstatně zmenšit difůzi radonu do budov. Dále se pokusíme vyjmenovat alespoň ty nejpodstatnější a cenově nejdostupnější :

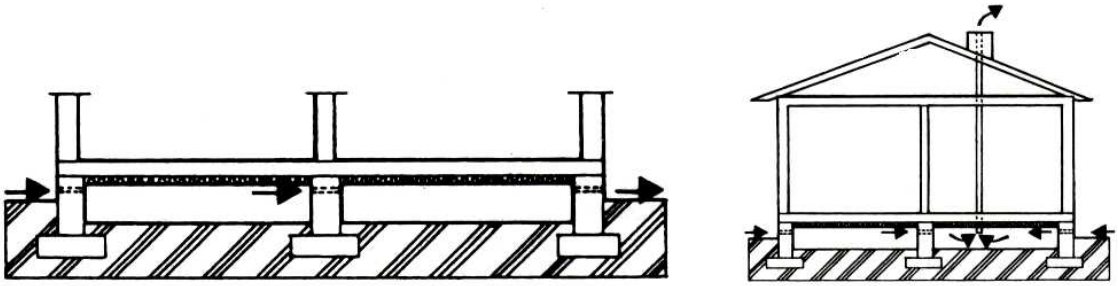
- *Betonová deska,* dobře armovaná ocelovými pruty a vyrobená z kvalitního zhutněného betonu, čímž se zamezí vzniku trhlin.
- *Protiradonové nátěry a tapety* , například asfaltované pásy s hliníkovou, měděnou, nebo olověnou vložkou, známé pod různými obchodními názvy, jako FOALBIT. BITALBIT, ALFOBIT, BITAL, CUFOLBIT, modifikované PE nebo etylén-propylénové fólie apod. (Obr.18).
- *Konstrukční prvky, omezující vnikání radonu do budov* , některé z nich jsou uvedeny schematicky na Obr.19 (výstavba na pilířích), Obr.20 (izolace vzduchovou mezerou). Obr.21 (radonové studně a vytváření přetlaku pod budovou), atd.



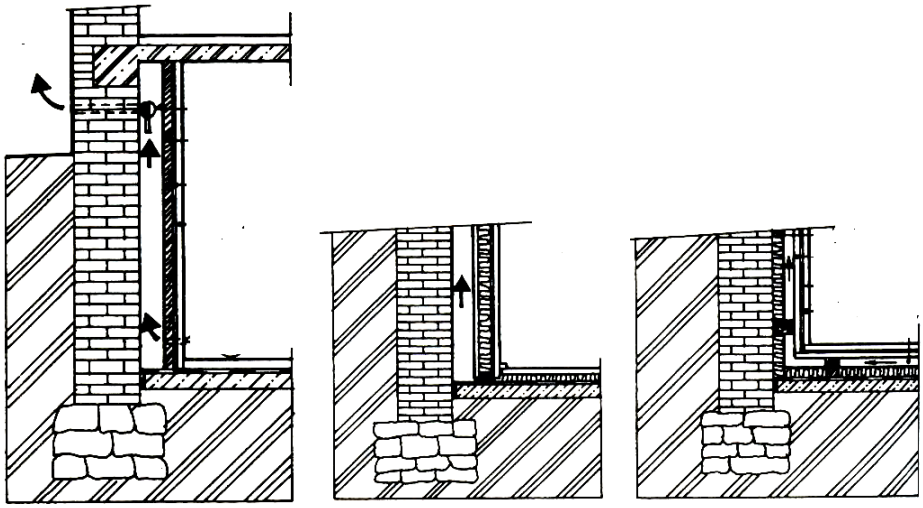
Obr.17. Radonové riziko v ČR. Červené oblasti vyznačují žulové podloží s vyšším radonovým rizikem



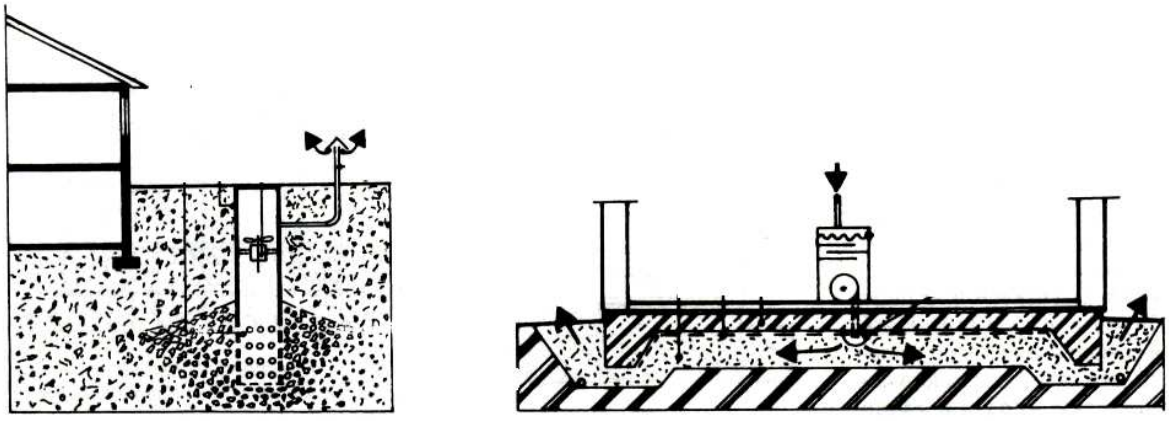
Obr.18. Antiradonové pasivní opatření pomocí vnitřní izolace.



Obr.19. Aktivní antiradonové opatření – výstavba na pilířích.



Obr.20. Aktivní antiradonové opatření – vnitřní odvětrávací mezera.



Obr.21. Aktivní antiradonová opatření – radonová studna a nucené odvětrávání základů.

6.6. Měření koncentrace radonu v interiérech budov.

První měření koncentrace radonu provedl v roce 1910 F.Schiffner v uranových dolech v Německu. Ze tří odběrů zjistil průměrnou koncentraci radonu ve vzduchu 142,4 $Bq.m^{-3}$. V České republice byla provedena obdobná měření v roce 1924 v Jáchymově, kde F.Běhounek zjistil ze šesti odběrů průměrnou hodnotu 159,1 $Bq.m^{-3}$.

Měření radonu a jeho dceřinných produktů je na rozdíl od měření přírodní radioaktivity velmi problematické, neboť jeho koncentrace ve vzduchu je ovlivněna mnoha činiteli. Stačí např. obytnou místnost vyvětrat a jejich koncentrace klesne na zlomek původní hodnoty. Již dříve jsme uvedli, že koncentrace radonu kolísá během dne i během roku, závisí na tom, zda je budova vytápěna, na meteorologických podmínkách, atd. Z toho plyne, že okamžité naměřené hodnoty koncentrace radonu jsou zatíženy velkou chybou a je tedy nutno ji měřit dlouhodobě. Podle způsobu měření rozdělujeme taková měření na *integrální a kontinuální.*

Integrální měření zachycuje velikost průměrné koncentrace radonu v měřícím místě za sledované období, které nesmí být kratší, než sedm dní a nemá být delší, než jeden rok. Taková měření jsou realizována zpravidla pomocí *stopových detektorů* (citlivé filmy, umístěné v plastové kazetě na daném místě. Stopy částic alfa jsou vyhodnocovány leptáním), nebo pomocí *detektorů elektretových* (jejich princip spočívá ve vybíjení speciálního, kladně nabitého materiálu, umístěného v měřící komůrce).

Kontinuální měření koncentrace radonu stanoví časový průběh koncentrace v daném časovém intervalu. Předností těchto měření je možnost zaznamenání dynamiky změn koncentrace radonu v závislosti na různých, dříve uvedených činitelích. Tyto přístroje jsou většinou založeny na principu prosávání vzduchu, který obsahuje dceřinné produkty radonu, vázané na prachových a aerosolových částicích, přes filtr z mikrovláken. Rozpadové produkty, usazené na filtru vyzařují α - záření, které je detekováno nejčastěji křemíkovými detektory, umístěnými v těsné blízkosti filtru.

Poznámka: **Ekvivalentní objemová aktivita radonu (EOAR) a latentní energie.**

Každá prachová částice, na níž je vázán některý dceřinný produkt radonu, sebou nese určité nebezpečí, že při vdechnutí se zachytí v plících, rozpadne se a následně ozáří tkáň. Toto riziko se tedy skládá z pravděpodobnosti záchytu prachové částečky s navázaným dceřinným produktem v plicích a z množství energie záření alfa, které je schopno uvolnit. Toto množství energie je označováno jako *latentní energie* záření alfa. Uvedená energie je definována jako celková energie záření alfa, vyzářená tímto dceřinným produktem až do přeměny na ^{210} Pb – viz Tab.2.

Dceřinný produkt radonu	Latentní energie [MeV]
Ra A	**13,690**
Ra B	**7,687**
RaC	**7,687**
RaC´	**7,687**

Tab.2.

Záření, které vzniká při rozpadu dceřinných produktů radonu měříme pomocí přístrojů, které potom udávají *ekvivalentní objemovou aktivitu radonu* (EOAR). Jednotkou EOAR je $Bq.m^{-3}$. Jedná se o takovou objemovou aktivitu radonu, která je v radioaktivní rovnováze s dceřinnými produkty. Jejich latentní energie je rovna latentní energii dané nerovnovážné směsi dceřinných produktů radonu. Rovnovážný stav je definován tak, že v jednotce objemu vzduchu mají dceřinné produkty stejnou aktivitu, jako radon. Kritériem pro přiřazení „rovnovážného" stavu je požadavek, aby koncentrace latentní energie směsi dceřinných produktů byla v obou případech, tj. v rovnovážném i nerovnovážném stavu stejná. Koncentrací latentní energie směsi dceřinných produktů ve vzduchu rozumíme maximální množství energie záření alfa, které by se vyskytlo při vdechnutí jednotky objemu vzduchu za předpokladu stoprocentního záchytu všech aerosolů a prachových částic v dýchacím traktu. Protože v interiéru budov je v důsledku ventilace a depozice na stěnách, podlaze, aerosolech a prachových částicích koncentrace dceřinných produktů vždy nižší, než koncentrace samotného radonu (neexistuje tedy výše zmíněná radioaktivní rovnováha), zavádí se tzv. rovnovážný faktor *F*. Ten je vyjádřen podílem

$$F = EOAR / OAR_n ,$$

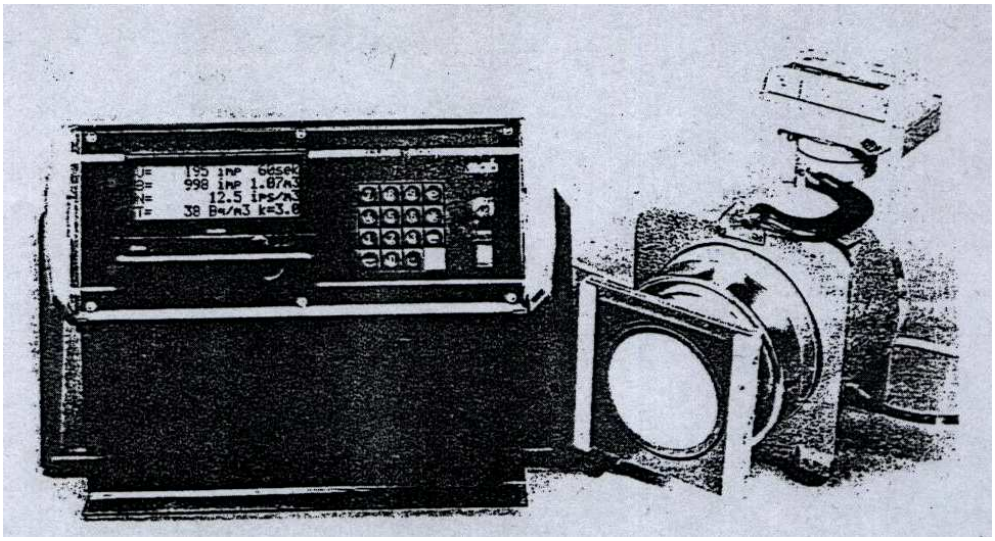
kde EOAR je ekvivalentní objemová aktivita radonu a OAR_n je skutečná koncentrace (objemová aktivita) radonu. Hodnota tohoto rovnovážného faktoru *F* se pohybuje v mezích 0,2 – 0,6.

6.7. Měření okamžité koncentrace dceřinných produktů radonu pomocí přístroje LLM 500 (Living Level Monitor 500).

Přístroj LLM 500 je zařízení, které měří okamžitou hodnotu EOAR .Byl vyvinut nejen pro měření EOAR v terénu a v budovách, ale je vhodný i jako demonstrační pomůcka zejména pro školy, neboť jeho velkou předností je velmi snadná obsluha. Vyvinul jej Prof. Henning von Philipsborn na Universitě v Regensburgu a je vyráběn firmou Münchener Apparatebau Gmbh .

Celé zařízení (Obr.21) se skládá z nasávacího agregátu a z počítače, který celé měření vyhodnocuje. Výsledky lze rovněž registrovat pomocí tiskárny, nebo PC.

Postup měření EOAR je následující: do nasávacího agregátu, v jehož vstupní části je umístěn filtr ze skelných vláken a filtrační „disketa",je nasáván vzduch, jehož množství je měřeno průtokoměrem. Aerosoly a prachové částice se zachytí na vláknech diskety, kterou poté zasuneme do přístroje a ten ji během velmi krátké doby vyhodnotí (i s uvážením okamžité hodnoty pozadí). Velkou předností LLM 500 je možnost okamžitého převodu EOAR na skutečnou koncentraci radonu, která je ve skutečnosti vyšší a to za pomoci rovnovážného faktoru (0,4). Tímto přístrojem lze měřit EOAR nejen ve vzduchu, ale i ve vodě a v pevných látkách. Mezi nevýhody LLM 500 lze počítat poměrně vysokou hmotnost (obě jeho části váží dohromady 16 kg) a závislost na síťovém napětí 220 V.



Obr.22. Přístroj LLM 500

Na katedře fyziky PdF MU bylo dosud provedeno asi 300 různých měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů. Výsledky asi poloviny z nich jsou uvedeny v práci [4]. Týkají se oblasti kolem Dolní Rožínky, známé těžbou uranové rudy a byla prováděna ve školách (viz Tab.3). Jak plyne z této tabulky, byla maximální hodnota EOAR naměřena v ZŠ ve Žďárci (578 $Bq.m^{-3}$). Po naměření této aktivity jsme vyvětrali celou místnost po dobu 10 min a hodnota EOAR klesla na 87 $Bq.m^{-3}$, což potvrzuje známý fakt, že jedním ze způsobů snížení škodlivých účinků radonu a jeho dceřinných produktů je větrání. Vysokou hodnotu EOAR ve třídě lze vysvětlit tím, že celý objekt se nachází na podloží se zvýšenou radioaktivitou a dá se tedy předpokládat, že půdní vzduch je nasycen radonem. Navíc se jedná o nepodsklepený objekt, který není nijak speciálně zabezpečen proti vnikání radonu.

Dalších přibližně 50 měření bylo prováděno v jihozápadní části Českomoravské vysočiny, která se rovněž nachází na podloží se zvýšeným výskytem radioaktivních hornin – okolí Dačic . Všechna měření byla prováděna v nevětraných sklepních místnostech domů v 6 vesnicích. Průměrná hodnota naměřené EOAR závisela dosti ostře na kvalitě podloží. Bylo-li podloží žulové, naměřili jsme hodnoty EOAR v mezích 800 – 1500 $Bq.m^{-3}$. Pro rulové podloží to bylo 500 – 950 $Bq.m^{-3}$ a největší hodnoty byly naměřeny ve vesničce Šach, nacházející se na rozhraní (geologickém zlomu) mezi rulou a žulou (cca 3000 $Bq.m^{-3}$).

Naše měření je třeba chápat jako měření předběžná a kvalitativní. Možnosti měření pomocí LLM 500 jsou však mnohem širší, od měření koncentrace radonu a jeho dceřinných produktů ve vodě a pevných látkách, ve srážkové vodě a půdním vzduchu, až po proměřování poločasu rozpadu čistých radioaktivních látek. To vše je námětem k jeho dalšímu využití.

Literatura:

[1] MAJER V.: Základy jaderné chemie, SNTL Praha 1961.

[2] HODGSON,P.E., GADIOLI E.: Introduction Nuclear Physics, Clarendon Press, Oxford, 1997.

[3] von PHILIPSBORN H.: Radioaktivitat und Strahlungsmessung. Universitat Regensburg, 1994.

[4] KOMPRS M.: Diplomová práce, Ped. Fak. MU Brno, 1999.

Obr.1. Skladba průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu ozáření (Podle zprávy vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření. New York, 1988).

Obr.2. Uran – radiová rozpadová řada.

Obr.3. Zdroje radonu v budovách.

Obr.4. Mechanismus ozářená sliznice plic dceřinným produktem (DP), usazeným na prachové, nebo aerosolové částici.

Obr.5. Mapa přírodní radioaktivity hornin v České republice. (Matolín M, PřFUK Praha).

Obr.6. Budova, založená na pilířích.

Obr.7. Objekt na vzduchovém polštáři.

Obr.8. Radonová studně.

Obr.9. Vytvoření přetlaku v budově

Obr.10. Level Living Monitor 500

Obr.11. Mapka radonového rizika v okolí Dolní Rožínky.

Obr.12. Výsledky měření koncentrace radonu a jeho DP v okolí Dačic.