

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH**

**Zdravotně sociální fakulta**

# **Diplomová práce**

**2007**

**Bc. Michal Valášek**

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Zdravotně sociální fakulta**



**Stanovování uhlíku-14 v plynných výpustech z jaderné elektrárny Temelín a jeho distribuce v životním prostředí**

**Diplomová práce**

**Autor: Bc. Michal Valášek  
Vedoucí práce: ing. Josef Koc, CSc.  
Datum odevzdání práce: 28. 5. 2007**

## **Monitoring of the carbon-14 in the gaseous releases from the Temelín NPP and its environmental distribution**

This work deals with monitoring of the radiocarbon in the gaseous effluents from the Temelín nuclear power plant and its distribution in the environment. The reader should gain a comprehensive image about level of radiocarbon monitoring in ventilation systems in the Temelín nuclear power plant and in the surrounding environment.

Some basic information of physics, chemistry and radiobiology relating to radiocarbon are given in the first part. The origin of radiocarbon in VVER reactor, its pathway to gaseous releases and then to carbon cycle in the environment are described there too. This introductory part continues with description of monitoring methods used in ventilation systems of the Temelín nuclear power plant and in the surrounding environment. Summary of Czech Republic legislation related to radiation protection is stated.

The aim of the work and hypothesis are set in the second part. In the third part there are methods used to fulfil the aim of the work.

The results in the form of tables and graphs are in the fourth part. In the following part there is a discussion of summarized data and results. Developed findings are summarized in the last part of this work.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 28. 5. 2007

.....

podpis studenta

## **Poděkování**

Děkuji ing. Josefu Kocovi, CSc., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi v průběhu zpracování tématu poskytl. Dále děkuji ing. Jiřímu Pospíchalovi za vstřícnost, s jakou mi poskytl potřebná data a ing. Ivo Světlíkovi za poskytnutá data a trpělivost, se kterou se mi věnoval. Na závěr děkuji své rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia, i když to někdy nebylo jednoduché.

## OBSAH:

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Některé veličiny a jednotky</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Obecné vlastnosti atomů</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 Atomové jádro .....	12
1.2.2 Elektronový obal .....	13
<b>1.3 Radioaktivita a ionizující záření</b> .....	<b>13</b>
1.3.1 Jaderná přeměna beta .....	15
1.3.2 Neutrony a neutronová aktivace .....	16
<b>1.4 Biologický účinek záření na živou tkáň</b> .....	<b>19</b>
1.4.1 Fyzikální fáze .....	20
1.4.2 Fyzikálně – chemická fáze .....	20
1.4.3 Biologická fáze .....	20
<b>1.5 Stručné fyzikální a chemické charakteristiky uhlíku</b> .....	<b>20</b>
<b>1.6 Koloběh uhlíku v přírodě</b> .....	<b>23</b>
<b>1.7 Toxicita uhlíku a jeho vybraných sloučenin</b> .....	<b>26</b>
1.7.1 Anorganické sloučeniny .....	26
1.7.2 Organické sloučeniny .....	27
<b>1.8 Antropogenní vlivy na aktivitu radiouhlíku v atmosféře</b> .....	<b>28</b>
1.8.1 Atmosférické testy jaderných zbraní .....	28
1.8.2 Jaderně-energetická zařízení .....	29
1.8.3 Suessův efekt .....	29

<b>1.9 Praktické využití uhlíku 14 .....</b>	<b>30</b>
1.9.1 Radiokarbonová datovací metoda .....	30
1.9.1.1 Objev a vývoj u nás a ve světě .....	30
1.9.1.2 Princip radiokarbonové datovací metody.....	31
1.9.2 Lékařské aplikace.....	32
<b>1.10 Základní typy jaderných energetických reaktorů .....</b>	<b>32</b>
<b>1.11 Jaderný reaktor jako zdroj C-14.....</b>	<b>34</b>
1.11.1 Hlavní cesty uvolnění <sup>14</sup> C do ventilačních komínů.....	35
<b>1.12 Plynné výpusti do ovzduší .....</b>	<b>35</b>
<b>1.13 Programy monitorování .....</b>	<b>36</b>
1.13.1 Referenční úrovně .....	36
<b>1.14 Monitorování výpustí.....</b>	<b>37</b>
1.14.1 Metodika programu monitorování plynných výpustí <sup>14</sup> C .....	38
1.14.2 Způsob odběru vzorku vzdušiny ventilačního komína ke stanovení <sup>14</sup> C.....	38
1.14.3 Postup stanovení odebraných vzorků <sup>14</sup> C plynných výpustí.....	40
1.14.4 Výpočet objemové aktivity <sup>14</sup> C ve vzdušnině.....	42
<b>1.15 Monitorování okolí.....</b>	<b>44</b>
1.15.1 Předprovozní monitorování.....	45
1.15.2 Provozní monitorování.....	45
<b>1.16 Způsoby monitorování aktivity atmosférického <sup>14</sup>C v životním prostředí .....</b>	<b>45</b>
1.16.1 Monitorování <sup>14</sup> C z ovzduší .....	46
1.16.2 Monitorování <sup>14</sup> C z bioty .....	46
<b>1.17 Metody stanovení <sup>14</sup>C v životním prostředí .....</b>	<b>47</b>
1.17.1 Metoda GPC (Gas Proporcional Counting) .....	47
1.17.2 Metoda LSC (Liquid Scintillation Counting) .....	47

1.17.3 Metoda AMS (Accelerator Mass Spectrometry).....	49
<b>1.18 Interpretace výsledků .....</b>	<b>51</b>
<b>1.19 Přehled legislativy související s radiační ochranou.....</b>	<b>52</b>
<b>2 CÍLE PRÁCE A HYPOTÉZY .....</b>	<b>54</b>
<b>3 METODIKA .....</b>	<b>55</b>
<b>4 VÝSLEDKY .....</b>	<b>56</b>
4.1 Měření aktivit atmosférického $^{14}\text{C}$ ve světě. ....	56
4.2 Uhlík-14 z jaderně energetických zařízení ve světě. ....	58
4.3 Monitorování $^{14}\text{C}$ z plyných výpustí Jaderné elektrárny Temelín.....	61
4.4 Měření $^{14}\text{C}$ v okolí Jaderné elektrárny Temelín v roce 2003 .....	72
<b>5 DISKUZE.....</b>	<b>74</b>
5.1 Zabezpečení monitorování radiouhlíku na JE Temelín .....	74
5.2 Zhodnocení dosavadních výsledků sledování $^{14}\text{C}$ .....	75
5.3 Porovnání plyných výpustí $^{14}\text{C}$ na JE Temelín s výpustmi na různých JE ve světě .....	77
5.4 Trendy aktivit atmosférického $^{14}\text{C}$ pozorované v evropských monitorovacích stanicích.....	78
5.5 Distribuce chemických forem C-14 do životního prostředí v okolí ETE .....	79
5.6 Zabezpečení odběru vzorků pro stanovování $^{14}\text{C}$ v životním prostředí.....	80



<b>5.7 Posouzení jednotlivých metod stanovování <math>^{14}\text{C}</math> v životním prostředí .....</b>	<b>80</b>
<b>5.8 Distribuce <math>^{14}\text{C}</math> v lidském organismu .....</b>	<b>81</b>
<b>6 ZÁVĚR .....</b>	<b>83</b>
<b>7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>85</b>
<b>8 KLÍČOVÁ SLOVA.....</b>	<b>90</b>
<b>9 PŘÍLOHY .....</b>	<b>91</b>

## ÚVOD

Sledování množství a chování uhlíku – 14 v plynných výpustech jaderných elektráren je závažnou problematikou, která je v běžně dostupné české literatuře zmiňována spíš okrajově. Přitom právě uhlík – 14 se velmi vážnou měrou podílí na čerpání úvazku efektivní dávky z plynných výpustí jaderných elektráren. Celá řada věcí týkajících se radiouhlíku, není dosud v odborné literatuře dostatečně objasněna. Tato práce se snaží analyzovat problematiku monitorování radiouhlíku v plynných výpustech Jaderné elektrárny Temelín, posoudit metody jeho stanovování a následnou distribuci v životním prostředí. Pojednává i o možnostech stanovování uhlíku – 14 ve složkách životního prostředí. Během této práce bylo snahou komplexně zhodnotit stav monitorování radiouhlíku v jaderné elektrárně Temelín a jejím okolí a posoudit jeho množství uváděné do životního prostředí v souvislosti s požadavky platné legislativy České republiky.

## 1 Současný stav

### 1.1 Některé veličiny a jednotky

Ionizující záření může být produkováno různými zdroji, jako jsou např. radionuklidy, rentgenky, urychlovače částic, jaderné reaktory, nebo může přicházet z kosmu. U radionuklidových zdrojů se okamžité množství radioaktivní látky charakterizuje **aktivitou**  $A$ . Je to podíl středního počtu  $dN$  radioaktivních přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radionuklidu za časový interval  $dt$ . Aktivita radionuklidu klesá exponenciálně s časem  $t$  podle vztahu:

$$A=A_0.e^{-\lambda t}.$$

$A_0$  se značí aktivita radionuklidu v čase  $t=0$  a  $\lambda$  přeměnová konstanta. Platí  $\lambda=\ln 2/T_{1/2}$ , kde  $T_{1/2}$  je fyzikální poločas radionuklidu. Jednotkou aktivity je  $1\text{ s}^{-1}$ , pro niž se používá název Becquerel (Bq). Vztáhneme-li aktivitu na jednotkovou hmotnost zářiče, dostaneme **měrnou aktivitu** ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ). U plošných zdrojů se uvažuje **plošná aktivita** ( $\text{Bq.m}^{-2}$ ), u objemových zdrojů **objemová aktivita** ( $\text{Bq.m}^{-3}$ ).

Tyto veličiny nelze použít u jiných než radionuklidových zdrojů. Zde je třeba veličiny **emise** zdroje, definované jako podíl počtu částic  $dN_t$  emitovaných ze zdroje v časovém intervalu  $dt$  a tohoto časového intervalu; jednotkou je  $\text{s}^{-1}$  (reciproká sekunda).

V okolí zdrojů ionizujícího záření existuje určité pole záření, jež je charakterizováno **fluencí** částic, nebo fotonů. Další používanou veličinou je **příkon fluence** částic, nebo fotonů. Jednotkou příkonu fluence je  $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Obdobně se definují veličiny fluence energie, jejíž jednotkou je  $\text{J.m}^{-2}$  a příkon fluence energie, jejíž jednotkou je  $\text{W.m}^{-2}$ .

Zeslabení svazku záření  $\gamma$  nebo rentgenového záření se vyjadřuje pomocí lineárního součinitele zeslabení  $\mu$  vztahem:

$$\varphi=\varphi_0.e^{-\mu d},$$

kde  $\varphi_0$  je příkon fluence fotonů před zeslabením a  $\varphi$  příkon fluence po průchodu vrstvou materiálu o tloušťce  $d$ . Jednotkou lineárního součinitele zeslabení je  $\text{m}^{-1}$ . Častěji se používá  $\text{cm}^{-1}$ . Vedle lineárního součinitele zeslabení se používá též hmotnostní součinitel zeslabení  $\mu_m=\mu/\rho$ , kde  $\rho$  je hustota materiálu. Jelikož jednotkou hmotnostního součini-

tele zeslabení je  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ , do vztahu vyjadřujícího zeslabení svazku dosazujeme tloušťku  $d$  v  $\text{kgm}^{-2}$ .

Další důležitou veličinou je **absorbovaná dávka**  $D$ , jež je definována jako poměr střední sdělené energie  $d\varepsilon$  a hmotnosti elementu  $dm$  v daném bodě, kterému byla energie předána. Jednotkou absorbované dávky je  $\text{J.kg}^{-1}$ , pro který byl zaveden název gray (Gy). Lze říci, že absorbovaná dávka je energie ionizujícího záření absorbovaná v jednotce hmotnosti ozařované látky v určitém místě.

Pro sdělenou energii platí vztah:

$$\varepsilon = \sum \varepsilon_{\text{in}} - \sum \varepsilon_{\text{ex}} + \sum Q,$$

kde první člen na pravé straně rovnice je součet energií všech přímo a nepřímo ionizujících částic, které do daného objemu vstoupily; druhý člen je součet energií všech částic, které objem opustily. Poslední člen představuje součet všech změn (úbytků s kladným a přírůstků se záporným znaménkem) klidových energií jader a elementárních částic při jakýchkoliv jaderných přeměnách, k nimž uvnitř daného objemu došlo.

**Dávkový příkon** je vyjádření absorbované dávky za jednotku času. Jednotkou je  $\text{Gy.s}^{-1}$ .

**Expozice**  $X$ , definovaná výhradně jen pro vzduch, je dána poměrem  $dQ/dm$ , kde  $dQ$  je absolutní hodnota celkového elektrického náboje iontů jednoho znaménka vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti  $dm$ . Jednotkou je  $(\text{C.kg}^{-1})$ . Dřívější jednotkou expozice byl  $1\text{R}=0,258 \text{ mC.kg}^{-1}$ .

**Expoziční příkon**  $X$  je přírůstek expozice  $dX$  za časový interval  $dt$ ; jednotkou expozičního příkonu je  $\text{C.kg}^{-1}\text{s}^{-1}$ .

**Ekvivalentní dávka**  $H_T$  je součin radiačního váhového faktoru  $w_R$  a střední absorbované dávky  $D_{\text{TR}}$  v orgánu nebo tkáni  $T$  pro ionizující záření typu  $R$ .

$$H_T = w_R \cdot D_{\text{TR}}$$

**Dávkový ekvivalent**  $H$  je součin jakostního činitele  $Q$  a absorbované dávky  $D$  v uvažovaném bodě tkáně  $H=Q.D$ . Jakostní faktor vyjadřuje rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Jeho hodnota je 1 pro záření s lineárním přenosem ener-

gie menším než  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ . Jednotkou je opět  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Používá se pro ně název sievert (Sv).

**Osobní dávkový ekvivalent**  $H_p(d)$  je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce  $d$ . Pro nepronikavé záření (např.  $\beta$ ) a ozáření kůže se zpravidla používá hodnota  $d = 0,07 \text{ mm}$ , pro ozáření oka  $3 \text{ mm}$ . Pro pronikavé záření se používá hodnota  $d = 10 \text{ mm}$ .

**Efektivní dávka**  $E$  se stanoví ze vztahu:

$$E = \sum w_T H_T.$$

jako součet součinů ekvivalentních dávek  $H_T$  v jednotlivých orgánech a tkáních a příslušných tkáňových váhových faktorů  $w_T$ .

Jako **příjem radionuklidu** je označována aktivita daného množství radionuklidu, který vstoupil do organismu. **Retence radionuklidu** je dané množství radionuklidu zadržného ve tkáni nebo orgánu.

## ***1.2 Obecné vlastnosti atomů***

Atomy se skládají z atomového jádra a elektronového obalu. Poloměr atomu jako celku je přibližně  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  a poloměr jádra je pouze o něco málo více než  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .

### ***1.2.1 Atomové jádro***

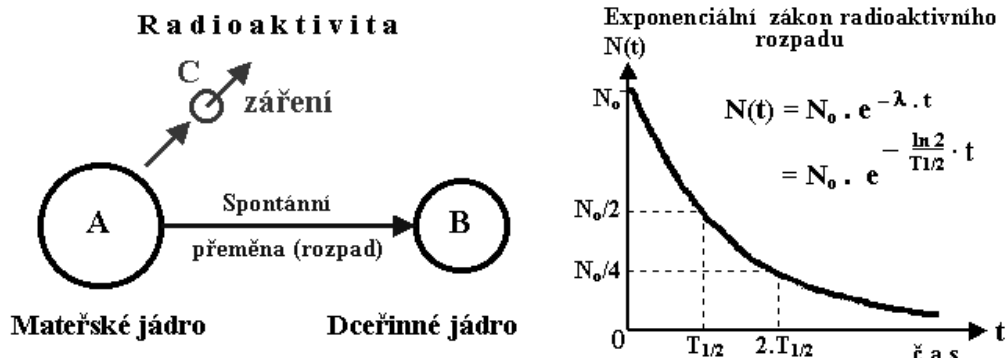
Jádro každého atomu je tvořeno elektricky neutrálními neutrony a kladně elektricky nabitými protony. Protony a neutrony v jádře se nazývají nukleony. Počet všech nukleonů udává hmotnostní (nukleonové) číslo  $A$ , počet protonů (a tím i počet elektronů v obalu) udává atomové (protonové) číslo  $Z$ . Tyto nukleony jsou vzájemně vázány velmi silnými silami interakce krátkého dosahu, které jsou nezávislé na elektrickém náboji nukleonů. Tento dosah je srovnatelný řádově s rozměry atomového jádra. V jádře atomu je soustředěno více než 99,9 % celkové hmotnosti atomu. Atomové jádro je více či méně stabilní útvar. Málo stabilní jádra se mohou samovolně přeměňovat v jiná jádra. Takto nestabilní jádra vysílají záření a nazývají se radioaktivní.

### ***1.2.2 Elektronový obal***

Struktura elektronového obalu je vysvětlována pomocí tzv. orbitalů. Orbitály jsou místa pravděpodobného výskytu elektronů. Hlavní kvantové číslo  $n$  určuje celkovou energii elektronu a podmiňuje, že elektron nemůže mít v daném silovém poli libovolné hodnoty energie. Orbitály o stejné hodnotě hlavního kvantového čísla  $n$  se řadí do jedné slupky a značí se buď čísly 1, 2, 3, ..., nebo písmeny K, L, M, ... Vedlejší kvantové číslo  $l$  kvantuje tzv. orbitální moment hybnosti a lze říci, že toto číslo udává tvar a symetrii orbitalů. Magnetické kvantové číslo  $m$  určuje orientaci orbitalů v prostoru. Spinové kvantové číslo  $s$  vyjadřuje vlastní moment hybnosti elektronu. Stav každého elektronu v atomu je tedy určen čtyřmi kvantovými čísly: hlavním  $n$ , vedlejším  $l$ , magnetickým  $m$  a spinovým  $s$ . Pauliho vylučovací princip říká, že žádné dva elektrony nemohou existovat ve stejném kvantovém stavu. Každý elektron je tedy popsán jiným souborem kvantových čísel. Celkový počet možných stavů elektronů v atomu je dán hodnotou  $2n^2$ . Elektronové uspořádání se řídí zásadou, že systém částic je stabilní, je-li jeho celková energie minimální. Atom je v základním stavu, jsou-li zaplněny hladiny s nejnižší energií. Při absorpci energie může elektron přejít na hladinu s vyšší energií a atom se tak dostane do excitovaného stavu. Ionizace je extrémní případ excitace, kdy elektron zcela opustí oblast elektrostatického pole jádra atomu. Excitace, nebo ionizace trvá jen velmi krátkou dobu ( $10^{-8} - 10^{-5}$  s). Atom v excitovaném, nebo ionizovaném stavu se vrátí do svého základního stavu tak, že některý elektron ve vyšší energetické hladině (příp. volný elektron) obsadí skokem volný energetický stav. Atom při tomto procesu vyzáří kvantum elektromagnetického záření.

### ***1.3 Radioaktivita a ionizující záření***

Radioaktivní atomy nazýváme ty, které nejsou v čase stabilní a jejichž jádra se spontánně mění na jádra jiná za současné emise záření. Radioaktivita má pravděpodobnostní (stochastický) charakter. Nelze tedy předem určit, které atomové jádro se rozpadne a kdy. Rozlišujeme radioaktivitu přirozenou a umělou. Přirozeně se vyskytující radioaktivní prvky vznikají převážně rozpadem těžkých atomových jader. Byla poprvé popsána francouzským fyzikem Antoine Henri Becquerelem v roce 1896.



Obr. 1.1 Základní obecné schéma radioaktivní přeměny a exponenciální zákon radioaktivního rozpadu.

Rozpad přirozeně radioaktivních prvků se řídí stejnými statistickými zákony jako rozpad umělých radioaktivních izotopů. Počet atomových jader, která v daném časovém intervalu transmutují je vždy úměrný celkovému počtu všech dosud nerozpadlých jader na počátku tohoto časového intervalu.

Matematický popis je dán rovnicí:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Kde  $N_t$  je počet nerozpadlých jader v čase  $t$ ,  $N_0$  počet radioaktivních atomů v čase  $t = 0$ ,  $e$  je základem přirozeného logaritmu a  $\lambda$  konstantou fyzikálního rozpadu.

Rychlost radioaktivního rozpadu je obvykle charakterizována fyzikálním poločasem rozpadu  $T_f$ . Je to doba, za kterou se přemění právě polovina z určitého množství radioaktivních atomů. Jde o zcela přesnou hodnotu, která je charakteristická pro každý radioaktivní prvek. Souvisí s rozpadovou konstantou  $\lambda$  a je s ní spojena vztahem:

$$T_f = 0,693 / \lambda$$

Biologický poločas  $T_b$  je časový interval, za který klesne počet inkorporovaných radioaktivních prvků v organismu na polovinu (tzn., vyloučí se polovina přijatého radionuklidu).

Efektivní poločas  $T_{ef}$  je časový interval, za který klesne počet přijatých radionuklidů v těle na polovinu důsledkem jak fyzikálního rozpadu, tak i následkem biologického vylučování.

Umělá radioaktivita je důsledkem navozené interakce stabilních atomových jader s částicemi, které jsou emitovány přirozeně radioaktivními prvky, nebo s částicemi emitovanými nebo urychlovanými pomocí různých technických zařízení, jako jsou jaderné reaktory a urychlovače. Snahou radioaktivní přeměny je dosažení stability atomu. Následkem vysílání ionizujícího záření mění radionuklidy svou chemickou podstatu. Rychlost přeměny jádra nelze ovlivňovat žádným fyzikálním nebo chemickým procesem. Vlastnosti ionizujícího záření jsou určeny radionuklidem, který toto záření vysílá. Ionizující záření je tok hmotných částic nebo fotonů elektromagnetického záření, která v látkovém prostředí vyvolávají tvorbu elektricky nabitých částic (iontů). Jaderné záření vzniká jako průvodní jev jaderných procesů radioaktivních prvků. Nejaderné záření vzniká v elektronovém obalu atomu, nebo v urychlovačích elektricky nabitých částic.

Ionizující záření lze dále rozlišovat na korpuskulární a fotonové (elektromagnetické) záření. Korpuskulární ionizující záření je charakterizováno elektrickým nábojem, klidovou hmotností částic a jejich kinetickou energií.

Tyto částice dělíme na těžké (záření  $\alpha$ , protony, neutrony), středně těžké (mezoony), a lehké (elektrony a pozitrony). Fotonové ionizující záření má duální charakter. Má tedy vlastnosti jak elektromagnetického vlnění, tak i vlastnosti částic o nulové hmotnosti. Rozeznáváme  $\gamma$  záření a RTG záření. Z fyzikálního hlediska se jedná v podstatě o stejný typ záření, liší se pouze ve vlnové délce a místě vzniku. Záření  $\gamma$  vzniká v jádře atomu a RTG záření v atomovém obalu.

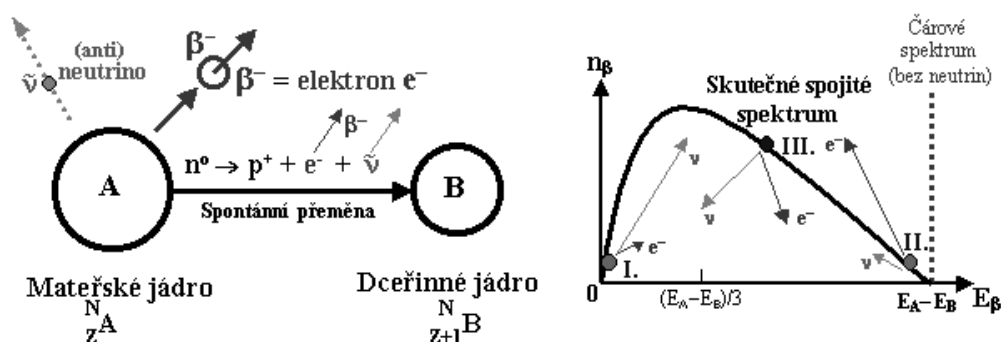
### ***1.3.1 Jaderná přeměna beta***

Přeměna beta je izobarická transformace jádra, při které je zachován počet nukleonů jádra. Zdrojem jsou umělé radionuklidy, nebo lehká jádra přirozených radionuklidů. Izobarická transformace jádra je umožněna vzájemnými přeměnami neutronu a protonu, tedy jakousi vnitřní reorganizací. U přeměny  $\beta$  většinou vzniká dceřiné jádro v excitovaném stavu, které přechází do stavu základního, emisí elektromagnetického záření  $\gamma$ . Proto je většina  $\beta$  zářičů smíšenými zářiči.



Rozlišujeme celkem tři typy beta přeměny. Přeměna  $\beta^+$ , při níž dochází k emisi pozitronu, dále přeměna  $\beta^-$ , kdy dochází k emisi elektronu a záchyt elektronu z elektronového obalu. Pro účely této práce se budu zabývat pouze jadernou přeměnou  $\beta^-$ .

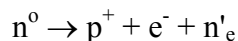
Emisí elektronu ( $\beta^-$  přeměnou) se protonové číslo zvýší o jednotku, neutronové o jednotku sníží a počet nukleonů zůstane nezměněn. Současně je emitováno elektronové antineutrino.



Obr. 1.2 Základní schéma přeměny  $\beta^-$ . V pravé části je znázorněno spojité energetické spektrum záření  $\beta^-$ .

### 1.3.2 Neutrony a neutronová aktivace

Neutron je elementární jadernou částicí. Je to těžká částice, vykazují silnou interakci. Pro svou elektrickou neutralitu se nazývá neutron. Klidová hmotnost neutronu je  $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1838,65 m_e = 939,55 \text{ MeV}$  a je o něco vyšší než u protonu. Neutrony přidávají do jádra hmotnost bez náboje. Ve stabilních atomových jádrech jsou neutrony stabilní. Nachází-li se neutron mimo jádro atomu, je nestabilní se střední dobou života kolem  $10^3 \text{ s}$ . Rozpadá se  $\beta^-$  rozpadem na proton, elektron a antineutrino.



Podle dnešních představ nelze uvnitř jádra rozlišit, který nukleon je právě bez náboje a který je nositelem kladného náboje. Neutron je tedy nukleon, který v okamžiku, kdy opustil jádro, nebyl nositelem elektrického náboje. Přírodním zdrojem neutronového záření je pouze kosmické záření. Uměle lze získat jedině jadernými reakcemi ve zdro-

jích, jako jsou: neutronové generátory (např. cyklotrony), umělé radionuklidové zdroje, jaderné reaktory a jaderné exploze.

Interakce neutronů s hmotou probíhá zcela odlišně od jiných druhů záření. Jelikož neutrony nenesou žádný elektrický náboj, nemohou primárně působit na elektronovou oblast atomů látky. Jejich přímé ionizační účinky jsou zcela zanedbatelné. Ionizaci prostředí způsobují až sekundární částice, které vznikají při interakci neutronů s jádry atomů. Jsou to odražená lehká jádra, záření  $\gamma$ , protony, částice alfa atd. Neutrony po vstupu do látky reagují téměř výhradně s atomovými jádry.

Veškeré stabilní nuklidy, s výjimkou  ${}^4_2\text{He}$ , reagují s neutrony. Neutron díky své elektrické neutralitě nemusí překonávat potenciálovou bariéru terčového jádra. Neutron tak může snadno proniknout do tohoto terčového jádra a vznikne tak složené jádro. Neutronové záření nemůže ionizovat přímo, ale ionizuje nepřímo zejména v prostředí obsahujícím lehké prvky jako je vodík. Pružnými srážkami jsou jádra vodíku uváděna do pohybu a ionizují prostředí. S různou pravděpodobností dochází k několika druhům interakcí neutronového záření s hmotou. Existuje určitá závislost mezi energií neutronů a nejpravděpodobnějším nebo velmi pravděpodobným typem reakce, ke které může dojít. Většinou se v praxi jednotlivé mechanismy interakce kombinují. Například rychlé neutrony snadno vnikají do látky, rychle ztrácejí svou energii při srážkách hlavně s lehkými jádry, které pak ionizují a excitují okolní atomy. Po zpomalení na "tepelnou" energii vnikají neutrony do jader a způsobují tam jaderné reakce za vzniku radioisotopů. Jedná se o neutronovou aktivaci, která se může stát i dlouhodobějším zdrojem ionizujícího záření.

#### a) potenciálový rozptyl

Neutron může být působením jaderných sil vychýlen se své původní dráhy a dále pokračovat v pohybu jiným směrem.

#### b) pružný rozptyl

Tato interakce neutronů s jádry je nejčastějším způsobem interakce rychlých neutronů při jejich průchodu látkovým prostředím, zvláště pak s lehkými jádry. Letící neutron narazí na jádro, předá mu část své kinetické energie, odrazí se od něj a pokračuje v pohybu se změněným směrem a sníženou energií. Odražené jádro díky svému kladnému náboji při svém pohybu vyvolává ionizaci a excitaci okolních atomů, čímž ztrácí svou energii. Předaná energie při pružném rozptylu neutronu je největší pro jádra vodíku (zde je při jedné srážce předána téměř polovina energie) a s rostoucí hmotností (nukleonovým číslem) jader klesá. Proto jsou rychlé neutrony nejvíce zpomalovány látkami obsahujícími lehké prvky (vodík, berylium, uhlík apod.).

#### c) nepružný rozptyl

Při této interakci neutron opět předá část své energie jádru, avšak tato energie se spíše než na mechanický pohyb jádra spotřebuje na zvýšení vnitřní energie jádra a nastane excitace jádra. Při jeho deexcitaci se vyzáří foton záření gama.

Složené jádro může deexcitovat i vyzářením jedné nebo více částic. Při těchto reakcích vznikají nuklidy, které se liší od terčových nuklidů hmotnostním nebo protonovým, nebo oběma čísly. Tato interakce je častější u interakcí neutronů s jádry lehčích prvků. Těžší prvky vyžadují při této interakci větší energii neutronů (až několik desítek MeV).

#### d) radiační záchyt

Radiační záchyt je exoergická reakce při níž je neutron pohlcen terčovým jádrem, které se dostane do excitovaného stavu. Deexcitací je z jádra emitováno kvantum záření  $\gamma$ . Toto záření gama pak dále vyvolává ionizaci. Další ionizace pak může nastat i následně a dlouhodobě. Jádra, která pohltila neutron, jsou často radioaktivní a rozpadají se za vyzáření dalšího ionizujícího záření, především beta. Lze takto připravit většinu radionuklidů. Radiační záchyt neutronů je nejúčinnější pro pomalé neutrony s nízkou energií, zvláště pro "tepelné" neutrony s energií pouze cca 0,025 eV a je velice odlišný pro různá jádra. K látkám, které nejúčinněji zachycují neutrony, patří zvláště bor a

kadmium. Toho se využívá k různým účelům, např. stínící materiál, regulace neutronového toku v jaderných reaktorech, bórové neutronové záchytové terapie, atd.

e) jaderné reakce

Sem de facto patří i předchozí bod. Jadernou reakcí rozumíme jaderné štěpení, tzn. po vniknutí neutronu do terčového jádra je emitována jiná částice (např. proton, nebo částice  $\alpha$ ).

Tab. 1.1 Typické reakce jader s neutrony.

$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZX + n'$	Pružný rozptyl.
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZX^* + n'$	Nepružný rozptyl.
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A+1}_ZX + \gamma$	Radiační záchyt.
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + p$	Reakce (n, p).
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}X + \alpha$	Reakce (n, $\alpha$ ).
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_ZX + 2n$	Reakce (n, 2n).
$n + {}^A_ZX \rightarrow f$	Štěpení jader.
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}X +$	Dvojstupňová reakce (n, $\gamma$ , $\alpha$ )

#### 1.4 Biologický účinek záření na živou tkáň

Mechanismus biologického účinku ionizujícího záření lze podle časového průběhu rozdělit do tří fází, které se vzájemně ovlivňují. Účinek ionizujícího záření můžeme rozlišit na přímý a nepřímý.

U záření s vysokým lineárním přenosem energie dochází k přímému účinku záření. Proběhne absorpce záření uvnitř jádra buňky a změny v chemických vazbách způsobí inaktivaci až rozpad zasažené molekuly. Tento účinek záření převládá v buňkách s nízkým obsahem vody. Nepřímý účinek záření na buňku probíhá pomocí volných radikálů. Na biologické účinnosti záření se podílí celá řada modifikujících fyzikálních, chemických a biologických faktorů.

### ***1.4.1 Fyzikální fáze***

První fáze účinku ionizujícího záření na buňku je fáze fyzikální, kdy je absorbována energie záření v živé hmotě. Tato první fáze probíhá v poměrně krátkém časovém úseku  $10^{-16} - 10^{-3}$  s. Při průchodu ionizujícího záření biologickou hmotou dochází k ionizaci a excitaci atomů a molekul buněk podél jejich dráhy.

### ***1.4.2 Fyzikálně – chemická fáze***

Další fází je fáze fyzikálně chemická (s dobou trvání kolem  $10^{-10}$  s), jejíž primární radiační fyzikálně chemické reakce vyvolají druhotné biochemické změny. Tyto biochemické změny využívají ke svému dění energii převážně z vlastních biochemických endogenních vazeb. Při fyzikálně chemické fázi ionty a excitované atomy dají vznik chemicky reaktivním látkám (zejména volným radikálům), které vyvolávají změny v biologicky důležitých makromolekulách s následnou poruchou jejich základních funkcí. Volné radikály vznikají radiolýzou vody, která tvoří 60 – 90% buňky. Produkty radiolýzy vody jsou volné radikály: superoxidový radikál  $O_2$  a perhydroxylový radikál  $OH_2$ , ionty  $H_3O^+$ ,  $OH^-$ , hydratovaný elektron a molekuly  $H_2O_2$  a  $H_2$  a další. Vzniklé radikály mohou reagovat s molekulami DNA a vytvářet jednoduché, nebo dvojné zlomy a tím i potenciálně letální poškození.

### ***1.4.3 Biologická fáze***

Nastupující biologická fáze zahrnuje reparační pochody nebo procesy, které vedou ke smrti buňky. Reparační procesy radiačního poškození na subcelulární úrovni probíhá řádově ve dnech, na úrovni radiosenzitivních tkání v průběhu několika týdnů a u celého organismu v průběhu několika měsíců až let. Čím je radiobiologická účinnost záření vyšší, tím má organismus nižší schopnost reparace.

## ***1.5 Stručné fyzikální a chemické charakteristiky uhlíku***

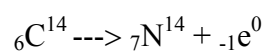
Uhlík (latinsky Carboneum, značka C) je velmi rozšířeným chemickým prvkem na Zemi i ve vesmíru. Uhlík tvoří základní stavební kámen všech organických sloučenin a tím i všech živých organismů. Patří mezi prvky 14. skupiny (IV. A) periodické sou-

stavy prvků neboli  $p^2$ -prvky, které mají 4 valenční elektrony. Jeho elektronová konfigurace je  $1s^2 2s^2 2p^2$ . Má nízkou elektronegativitu (2,55) a netvoří vodíkové můstky. Uhlík je pevný, kyselinotvorný, nezbytný biogenní prvek, výlučně nekovové povahy. Jeho schopnost vytvářet vazbové řetězce umožňuje vznik velkého množství sloučenin. Uhlík je bez chuti a bez zápachu, za obvyčejné teploty je mimořádně chemicky netečný, ale při vysokých teplotách se slučuje s mnoha prvky. Teplota tání je kolem  $3500\text{ }^\circ\text{C}$  a teplota varu okolo  $4827\text{ }^\circ\text{C}$ .<sup>(31)</sup> Přirozeně krystalizuje ve dvou alotropických modifikacích (diamant, grafit).

Tab. 1.2 Periodická tabulka prvků.

Periodická tabulka prvků s podrobnými anotacemi pro prvek Titan (Ti). Tabulka je rozdělena do skupin podle skupenství (pevné, kapalné, plynné) a skupenství prvků (při 20 °C). Anotace pro Titan (Ti) zahrnuje oxidační číslo (II, III, IV), protonové číslo (22), český název prvků (TITAN) a latinský název prvků (Titanium), hmotnostní číslo (47,90) a elektronovou konfiguraci (3d<sup>2</sup> 4s<sup>2</sup>). Tabulka je doplněna legendou pro skupiny prvků: vodík, silicidní kovy, kovy silicidních zemin, kovy, polokovy, nekovy, vzácné plyny, radioaktivní prvky.

Martin David Kamen (1913 – 2002) a Samuel Ruben (1913 – 1943) objevili  $^{14}\text{C}$  27. února 1940 v laboratořích University of Carolina v Berkeley radiouhlík. Atomové jádro uhlíku 14 obsahuje 6 protonů a 8 neutronů. Poločas rozpadu uhlíku 14 je 5730 let. Uhlík 14 je čistým beta zářičem s maximální energií emitovaných elektronů 0,156 MeV a průměrnou energií 0,049 MeV. Rozpadem  $^{14}\text{C}$  vzniká stabilní  $^{14}\text{N}$  podle rovnice:



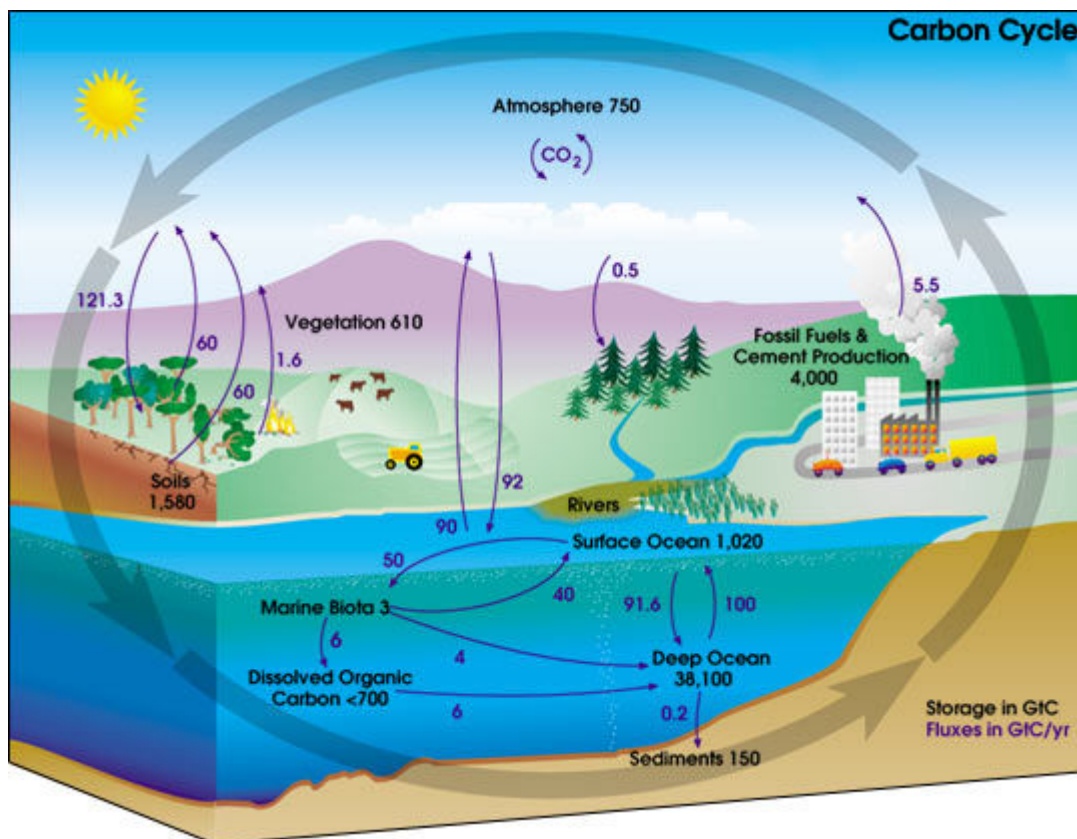
Dnes je známo 15 izotopů uhlíku od  ${}^8\text{C}$  až  ${}^{22}\text{C}$ , které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1.3 Přehled izotopů uhlíku.

Izotop uhlíku	Z (p)	N (n)	$A_r$	Spinové číslo	Druh přeměny	Poločas rozpadu	Energie (MeV)
${}^8\text{C}$	6	2	8,0377	0+	2p	$2 \cdot 10^{-21}$ s	2,142
${}^9\text{C}$	6	3	9,031	3/2-	$\beta^+$	126,59 ms	16,498
					$\beta^+ + \alpha$	126,59 ms	16,775
					$\beta^+ + p$	126,59 ms	16,683
${}^{10}\text{C}$	6	4	10,0169	0+	$\beta^+$	19,290 s	3,648
${}^{11}\text{C}$	6	5	11,0114	3/2-	$\beta^+$	20,334 min	1,982
${}^{12}\text{C}$	6	6	12,0107	0+	Stabilní	Stabilní	-
${}^{13}\text{C}$	6	7	13,0034	1/2-	Stabilní	Stabilní	-
${}^{14}\text{C}$	6	8	14,0032	0+	$\beta^-$	5730 let	0,156
${}^{15}\text{C}$	6	9	15,0106	1/2+	$\beta^-$	2,449 s	9,772
${}^{16}\text{C}$	6	10	16,0147	0+	$\beta^-$	0,747 s	8,012
${}^{17}\text{C}$	6	11	17,0226	3/2+	$\beta^- + n$	193 ms	7,283
					$\beta^-$	193 ms	13,166
${}^{18}\text{C}$	6	12	18,0268	0+	$\beta^- + n$	92 ms	8,980
					$\beta^-$	92 ms	11,810
${}^{19}\text{C}$	6	13	19,0348	1/2+	$\beta^- + n$	46,2 ms	11,640
					$\beta^-$	46,2 ms	16,970
${}^{20}\text{C}$	6	14	20,0403	0+	$\beta^- + n$	16 ms	13,630
					$\beta^-$	16 ms	15,790
${}^{21}\text{C}$	6	15	21,0493	1/2+	$\beta^-$	<30 ns	
${}^{22}\text{C}$	6	16	22,0572	0+	$\beta^-$	6,213 ms	

### 1.6 Koloběh uhlíku v přírodě

Uhlík 14 se vyskytuje ve všech složkách životního prostředí a jeho koloběh v přírodě je shodný se všemi ostatními izotopy uhlíku. Uhlíková izotopická směs obsahuje dva stabilní izotopy  $^{12}\text{C}$  a  $^{13}\text{C}$ , kde je přirozený počet atomů stabilního izotopu  $^{13}\text{C}$  zastoupen asi v 1,10%.<sup>(21)</sup>



Obr. 1.3 Obsah uhlíku v rezervoárech (v Gt) a jeho koloběh v přírodě (v Gt/rok).<sup>(32)</sup>

Legenda k obrázku: Carbon Cycle – koloběh uhlíku

*Atmosphere* – atmosféra

*Vegetation* – rostlinstvo

*Soils* – půda

*Marine Biota* – mořská flóra a fauna

*Dissolved Organic Carbon* – rozpuštěný organický uhlík

*Sediments* – sedimenty



*Deep Ocean – hlubokooceánské vody*

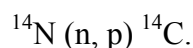
*Surface Ocean - povrchové oceánské vody*

*Rivers – řeky*

*Fossil Fuels – fosilní paliva*

Ve vyšších částech atmosféry je  $^{14}\text{C}$ , vznikající účinky kosmického záření, oxidován na chemickou formu  $^{14}\text{CO}_2$  a přestupuje do troposféry, kde se stává součástí přirozeného koloběhu uhlíku. Většina atmosférického uhlíku 14 je ve formě oxidu uhličitého. Méně než 1% je ve formě oxidu uhelnatého, metanu, formaldehydu a jiných sloučenin. Z atmosféry je část  $^{14}\text{CO}_2$  asimilována zelenými rostlinami a fotosyntetickými pochody zabudována do rostlinných tkání. Tento v rostlinách obsažený  $^{14}\text{C}$  přechází dále do potravního řetězce. Aktivita  $^{14}\text{C}$  v atmosféře a suchozemské biotě je dána dobou prodlení v tomto prostředí. Atmosférický  $^{14}\text{CO}_2$  přechází do dalších složek životního prostředí, jako jsou biota, oceánské vody a sedimenty. Uhlík 14 setrvává mezi atmosférou a povrchovými vodami oceánů po dobu několika let. Tato doba je velmi krátká v porovnání s poločasem přeměny  $^{14}\text{C}$ . Prostupování do hlubokých oceánských vod trvá podstatně déle, od stovek po tisíce let. V troposféře, biotě a povrchových vodách odpovídá přirozená rovnovážná aktivita přibližně 226 mBq radiouhlíku na gram uhlíkové izotopické směsi. Tato specifická aktivita přibližně odpovídá hodnotě 0‰  $\Delta^{14}\text{C}$  dle Stuiver-Polachovy konvence. <sup>(21)</sup>

Aktivita přirozeného  $^{14}\text{C}$  v přírodě je poměrně stabilní následkem dynamické rovnováhy mezi rychlostí jeho tvorby a rychlostí jeho ukládání zejména v oceánských vodách a sedimentech. Nestabilní izotop uhlíku 14 vzniká reakcí atomů  $^{14}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$  a  $^{13}\text{C}$ , přítomných vysoko v atmosféře (9–15 km), s neutrony vzniklými interakcemi kosmického záření s atmosférou. Zejména jde o záchyt neutronů jádry dusíku dle rovnice:



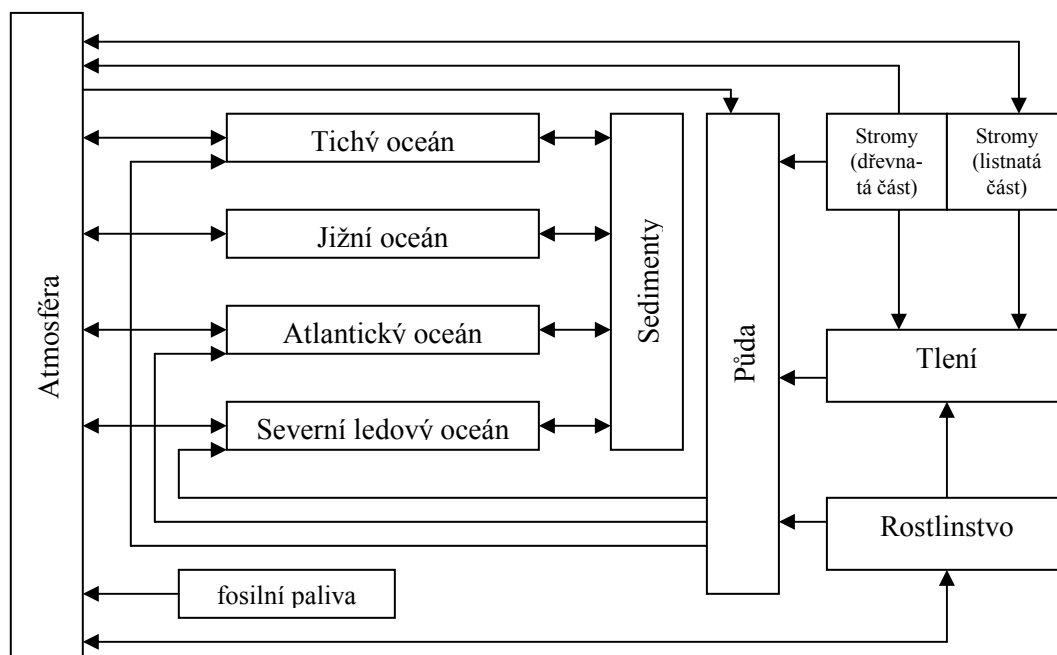
Následující tabulka uvádí přehled kosmogenních radionuklidů z níž je patrné, že  $^{14}\text{C}$  patří mezi prvky s relativně dlouhým poločasem rozpadu a tvoří největší část celkového inventáře kosmogenních radionuklidů.

Tab. 1.4 Přehled kosmogenních radionuklidů.

Izotop	Druh přeměny	Poločas přeměny	Rychlost produkce (PBq/rok)	Inventář (PBq)
<sup>3</sup> H	beta (100%)	12,33 let	72	1275
<sup>7</sup> Be	EC (100%)	53,29 dní	1960	413
<sup>10</sup> Be	beta (100%)	1,51.10 <sup>6</sup> let	0,000064	230
<sup>14</sup> C	beta (100%)	5730 let	1,54	12750
<sup>22</sup> Na	EC (100%)	2,602 let	0,12	0,44
<sup>26</sup> Al	EC (100%)	7,4.10 <sup>5</sup> let	0,000001	0,71
<sup>32</sup> Si	beta (100%)	172 let	0,00087	0,82
<sup>32</sup> P	beta (100%)	14,26 dní	73	4,1
<sup>33</sup> P	beta (100%)	25,34 dní	35	3,5
<sup>35</sup> S	beta (100%)	87,51 dní	21	7,1
<sup>36</sup> Cl	EC (1,9%), beta (98,1%)	3,01.10 <sup>5</sup> let	0,000013	5,6
<sup>37</sup> Ar	EC (100%)	35,04 dní	31	4,2
<sup>39</sup> Ar	beta (100%)	269 let	0,074	28,6
<sup>81</sup> Kr	EC (100%)	2,29.10 <sup>5</sup> let	1,7.10 <sup>-8</sup>	0,005

V přírodě se uhlík běžně vyskytuje v mnoha různých anorganických a organických sloučeninách. Poměr všech tří izotopů uhlíku v atmosférickém oxidu uhličitým se dlouhodobě udržuje na konstantní hodnotě.

Rychlost produkce <sup>14</sup>C závisí na zeměpisné šířce. Rozdíly aktivity <sup>14</sup>C v ovzduší v závislosti na zeměpisné šířce jsou sníženy vlivem atmosférického proudění. Celkové množství <sup>14</sup>C obsaženého v atmosféře, oceánech a biosféře před zkouškami jaderných zbraní se odhaduje na 1,2.10<sup>19</sup> Bq, to odpovídá množství 75 000 kg. <sup>(25)</sup>



Obr. 1.4 Kompartmentový model globální cirkulace  $^{14}\text{C}$ . (25)

## 1.7 Toxicita uhlíku a jeho vybraných sloučenin

Elementární uhlík – grafit ve formě prachu má poměrně nízkou toxicitu. Po chronické dlouholeté expozici však způsobuje pneumokoniózy. Saze a dehtové zplodiny hoření mají karcinogenní účinky (kůže, dýchací ústrojí).

### 1.7.1 Anorganické sloučeniny

Skupina anorganických sloučenin uhlíku obsahuje řadu látek, které vykazují vysokou míru toxicity jako např. oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ), oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), sirouhlík ( $\text{CS}_2$ ), fosgen ( $\text{COCl}_2$ ), kyanovodík ( $\text{HCN}$ ), kyanidy ( $\text{CN}^-$ ) apod. Tyto sloučeniny jsou významnými komoditami pro různé chemické výroby a jsou tedy velmi významné z hlediska průmyslové toxikologie.

Oxid uhličitý vytěsňuje kyslík, je nedýchatelný a mírně dráždí nosní sliznici. Ve větším množství dochází ke stimulaci dýchání a zrychlení srdeční frekvence. Při dosažení 10% obj.  $\text{CO}_2$  ve vzduchu dochází k ochrnutí dýchání. Dochází k porušení uhlíči-

tanové rovnováhy a k acidóze. Oxid uhličitý je těžší než vzduch. Snadno se drží u země a v níže položených prostorách, kde vytváří nedýchatelnou atmosféru.

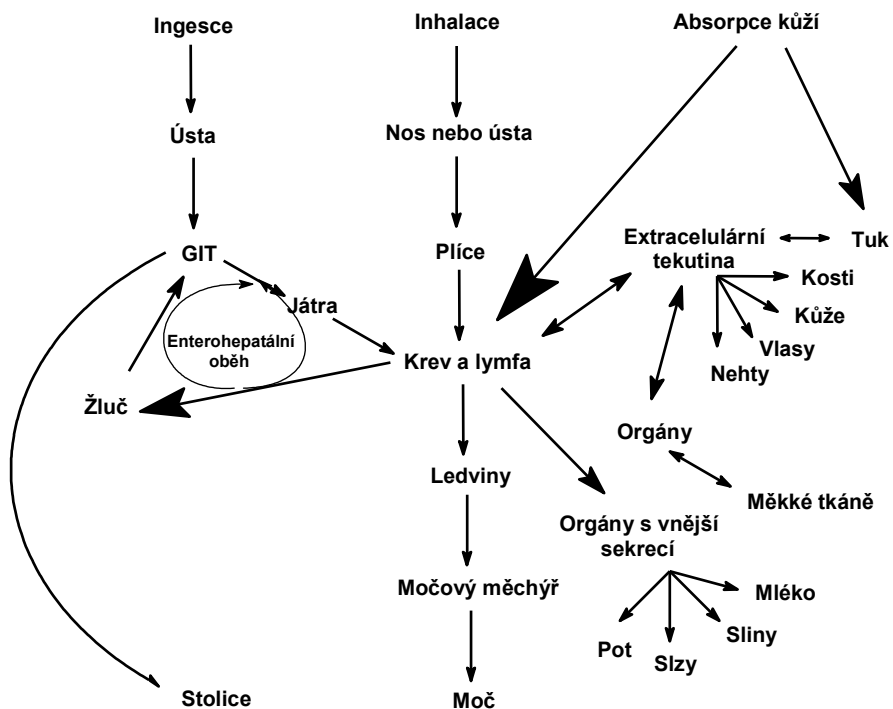
Oxid uhelnatý je velmi zákeřný plyn, protože není detekovatelný smyslovými orgány člověka. Dominantním účinkem oxidu uhelnatého je přeměna hemoglobinu na karboxyhemoglobin. Afinita CO k hemoglobinu je asi 200 – 300x větší než afinita kyslíku k hemoglobinu, se kterým vytváří oxyhemoglobin. Následkem je snížená schopnost přenosu kyslíku a dušení organismu. Větší množství CO může způsobit smrt během několika vteřin. Mezi příznaky intoxikace se řadí bolesti hlavy, spavost, bezvědomí, syčení v uších a růžová barva tkání.

### ***1.7.2 Organické sloučeniny***

Organických sloučenin je obrovské množství, proto jich většina zůstává bez bližších toxikologických znalostí. Organické látky lze lépe schematizovat a odkazovat na společné účinky např. narkotické, dráždivé apod. Nelze usuzovat podobný toxický účinek podle chemické podobnosti. Jsou zaznamenány rovněž velké rozdíly v intenzitě působení. Tyto látky jsou většinou lipofilní, takže pronikají snadno nejen přes zažívací ústrojí a dýchací cesty, ale i přes sliznice a neporaněnou pokožku.

Z hlediska širokého použití a tím exponovanosti širokého okruhu osob si vyžádaly prvořadou pozornost zejména uhlovodíky. Uhlovodíky mají závažný a rozmanitý účinek na lidský organizmus. Obecně lze konstatovat, že dominantním účinkem uhlovodíků je účinek narkotický, který roste s molekulovou hmotností, větším počtem nenasycených vazeb, rozvětvenějším řetězcem a dostatečnou těkavostí. Další toxické účinky jsou dráždivost (oči, dýchací cesty, plíce, kůže), rozpouštění tuků (odtučňování, ztráta přirozené vláčnosti, ochranného povlaku, dermatitidy), a další.

Nižší členové alifatické řady (methan, ethan, propan) mají narkotický účinek jen nepatrný. Spíše působí jako inerty, což se projevuje dušením při vytlačení kyslíku.



Obr. 1.5 Obecné schéma kinetiky chemické látky v organismu.

## 1.8 Antropogenní vlivy na aktivitu radiouhlíku v atmosféře

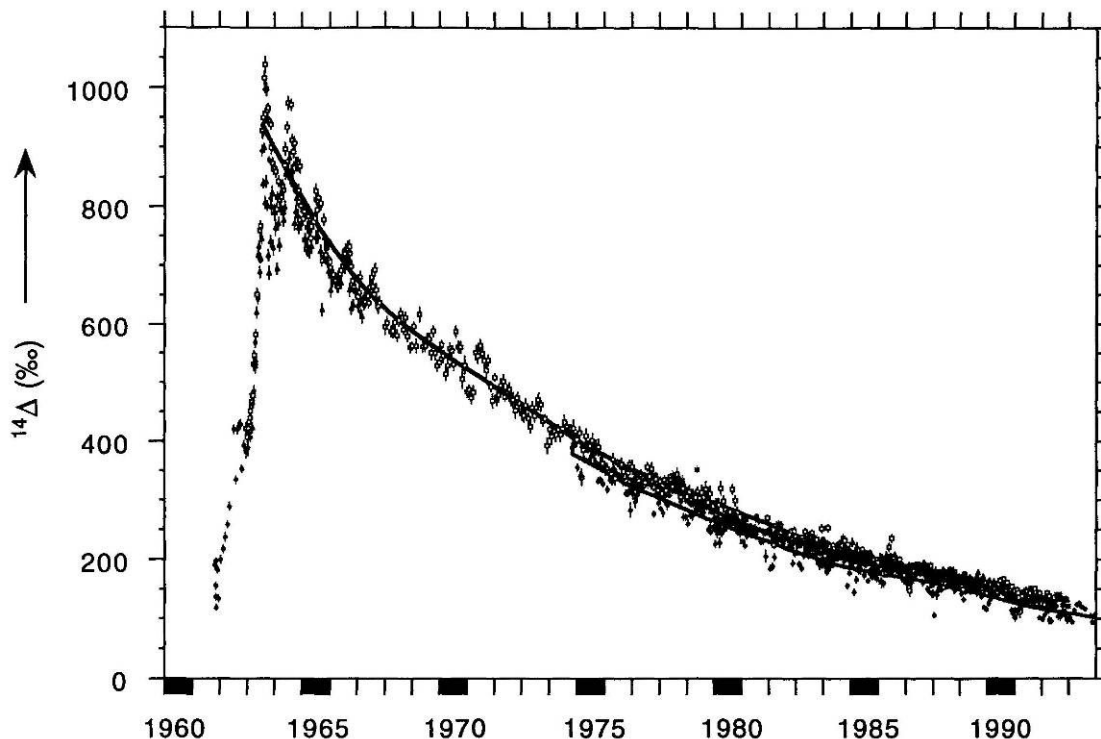
Přirozená koncentrace atmosférického uhlíku  $^{14}\text{C}$  byla značně pozmeněna v důsledku lidské činnosti. Docházelo a stále dochází ke změnám rychlosti transportu a ukládání uhlíku a tím k výkyvům aktivity  $^{14}\text{C}$ .

### 1.8.1 Atmosférické testy jaderných zbraní

Velké množství atmosférických testů jaderných zbraní v 50. a 60. letech minulého století způsobily nárůst atmosférického  $^{14}\text{C}$  v roce 1963 na severní polokouli na téměř dvojnásobek přirozené úrovně. Na jižní polokouli byly hodnoty  $^{14}\text{C}$  v roce 1964 cca 65% nad přirozenou úroveň. Po vyhlášení jaderného moratoria v roce 1963 začalo pozvolna klesat množství  $^{14}\text{C}$  obsaženého v atmosféře s poločasem asi 6 let.

Graf 1.1 Vývoj aktivity atmosférického  $^{14}\text{CO}_2$  v Evropě. <sup>(12)</sup>

Pozn.: 0‰ odpovídá rovnovážné aktivitě dané přirozenou produkcí.



### 1.8.2 Jaderně-energetická zařízení

Druhým, avšak znatelně menším zdrojem antropogenního  $^{14}\text{C}$ , jsou v dnešní době jaderně-energetická zařízení. Uhlík-14 je z jaderných elektráren uváděn do životního prostředí jako plynné výpusti. Radiouhlík je však také uvolňován při přepracování vyhořelého jaderného paliva. Zájem radiační ochrany o tento zdroj  $^{14}\text{C}$  souvisí zejména s masovým využíváním jaderných reaktorů jako zdroje elektrické energie.

### 1.8.3 Suessův efekt

Od roku 1890 dochází k masivnímu spalování fosilních paliv. Ve fosilních palivech již není obsažen radiouhlík. Spalováním dochází k uvolnění velkého množství fosilního  $\text{CO}_2$  a proto dochází ke snížení zastoupení  $^{14}\text{C}$  v uhlíkové izotopické směsi. Míra Suessova efektu v ovzduší na lokální a regionální úrovni je v literatuře uváděna

v hodnotách 5 – 10% <sup>(21)</sup> a je silně závislá na lokalitě měření a atmosférických podmínkách.

### ***1.9 Praktické využití uhlíku 14***

Nepřeberné množství sloučenin uhlíku, které pramení z jeho schopnosti vytvářet vazbové řetězce, vytváří velmi široké možnosti praktického využití, jejichž výčet není cílem této práce. Proto zmíním jen některé hlavní možnosti praktického využití <sup>14</sup>C.

#### ***1.9.1 Radiokarbonová datovací metoda***

Radiouhlíkové datování je univerzálně používáno jako nezbytný datovací nástroj v archeologických disciplínách a vědách o Zemi.

##### ***1.9.1.1 Objev a vývoj u nás a ve světě***

Radiouhlíková datovací metoda se od svého objevu koncem 40. let 20. století stala významným nástrojem moderní vědy. Za její zavedení a další rozvoj obdržel F. W. Libby v roce 1960 Nobelovu cenu.

Do naší archeologické literatury uvedl principy a kritiku radiokarbonové metody E. Neustupný v letech 1968 – 1976, kdy publikoval absolutní chronologie neolitických a eneolitických kultur střední a jihovýchodní Evropy a doby bronzové střední Evropy. Tyto publikace byly založeny na korigovaných (kalibrovaných) radiokarbonových datech. Jako jedni z prvních na světě si totiž E. Neustupný s V. Buchou uvědomili, že aktivita <sup>14</sup>C v atmosféře kolísá a vyplynula tedy nutnost kalibrace naměřených hodnot konvenčního radiouhlíkového stáří. E. Neustupný proto navrhl radiouhlíkovou kalibrační křivku, využívající korekce na základě dlouhodobých změn geomagnetického pole.

První radiokarbonová laboratoř na našem území zpracovávající archeologické vzorky vznikla v roce 1972 ve Výzkumném ústavu hnědého uhlí v Mostě. Jejími zakladateli byli K. Veselý z Výzkumného ústavu hnědého uhlí v Mostě a E. Neustupný z Archeologického ústavu ČSAV. Tato laboratoř později zanikla. Paralelně s mosteckou laboratoří vznikla na přírodovědecké fakultě v Praze na Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užitě geofyziky radiouhlíková laboratoř pod vedením prof. J. Šilara za

spolupráce s Archeologickým ústavem AV ČR v Praze. V roce 2004 byla uvedena do provozu radiouhlíková laboratoř ve spolupráci mezi Ústavem jaderné fyziky AV ČR a Archeologickým ústavem AV ČR.

V průběhu let prodělalo radiouhlíkové datování ve světě bouřlivý rozvoj v oblasti měření i zpracování vzorků a přibyly proto aplikace v geologii, výzkumu vlivu člověka na životní prostředí, paleoklimatologii a dalších disciplínách. Postupně se snižuje nejistota stanovení, zvyšuje se dosah datování a také kalibrační křivky opravující vliv mírného kolísání aktivity  $^{14}\text{C}$  v přírodě jsou stále doplňovány a upřesňovány. V současnosti pracuje ve světě přes 100 konvenčních laboratoří a kolem 30 pracovišť vybavených urychlovačovou hmotnostní spektrometrií. <sup>(21)</sup>

#### ***1.9.1.2 Princip radiokarbonové datovací metody***

Živé organizmy neustále korespondují s atmosférickým oxidem uhličitým ať už formou fotosyntézy nebo příjmem jejich produktů a dýcháním. Lze tedy tvrdit, že poměr  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  je v průběhu života daného organismu konstantní. Po odumření biologické tkáně se výměna uhlíku mezi organismem a prostředím zastaví. Nedochozí ani ke vzniku nového  $^{14}\text{C}$ , protože kosmické záření je pohlceno atmosférou. Obsah  $^{14}\text{C}$  v tkáních tedy klesá podle zákonitostí rozpadu nestabilních atomových jader.

Radiokarbonovou datovací metodou je tedy analyzován poměr  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  z archeologického či jiného pozůstatku živé hmoty (zbytky tkání, kosti, popel,...). Zjištěný poměr pak přibližně ukazuje na dobu zániku dané živé hmoty.

Pro zpřesnění porovnání obsahu  $^{14}\text{C}$  v různých typech vzorků je zapotřebí normalizovat naměřenou aktivitu na izotopickou frakcionaci způsobenou chemickými, fyzikálními a biologickými procesy, jako jsou: příjem atmosférického  $\text{CO}_2$ , srážení karbonátů, difuze  $\text{CO}_2$  atd. Pro tyto korekce vychází přepočít z izotopického zastoupení  $^{13}\text{C}$  ve vzorku. Konvenční radiouhlíkové stáří (doba, která uplynula od přerušení příjmu uhlíku) je speciální způsob vyjádření aktivity  $^{14}\text{C}$  ve vzorku, která je vztažena k primárnímu modernímu referenčnímu standardu. Tento standard konvenčně odpovídá aktivitě  $^{14}\text{C}$  ve hmotě dřeva (v letokruhu) narostlého v roce 1890 na severní polokouli a



s korekcí na pokles aktivity radioaktivní přeměnou  $^{14}\text{C}$  do roku 1950. Tento radionuklidový standard odráží přirozené pozadí bez antropogenních vlivů, jako jsou významné ovlivnění spalováním fosilních paliv, atmosférické testy jaderných zbraní a jaderně – energetická zařízení.

### ***1.9.2 Lékařské aplikace***

Vzhledem k tomu, že uhlík 14 je distribuován v organismu a metabolizován stejně jako kterýkoliv jiný izotop uhlíku, lze jím označit látku, jejíž metabolismus chceme zkoumat a zjistit tak metabolickou cestu např. nově objevených drog. Existuje celá řada aplikací v lékařství, které využívají uhlík 14 ke zjištění metabolických abnormalit, které tvoří základ cukrovky, dny, chudokrevnosti, akromegalie a dalších onemocnění.

### ***1.10 Základní typy jaderných energetických reaktorů***

Jaderný reaktor lze definovat jako seskupení štěpného materiálu, při němž může probíhat řízená štěpná řetězová reakce a odvod tepla uvolněného štěpením, aniž dojde k poškození reaktoru a k úniku radioaktivity do okolí. <sup>(16)</sup>

Existuje celá řada typů jaderných reaktorů, které se liší v celé řadě technických a technologických parametrů, ale také podle svého využití. Výčet všech těchto rozdílů zcela přesahuje rozsah této práce. Proto zde zmíním jen některé základní typy reaktorů a jejich rozlišení.

Důležitým parametrem pro posouzení typu reaktoru z fyzikálního hlediska je spektrum neutronů. Podle velikosti energie neutronů rozlišujeme dva základní typy jaderných reaktorů. V tepelných reaktorech způsobují štěpení tepelné neutrony. Tento typ reaktorů má v aktivní zóně moderátor, který zpomaluje neutrony. Rychlé reaktory moderátor nemají a štěpení vyvolávají rychlé neutrony.

Podle druhu použitého moderátoru jsou reaktory lehkovodní ( $\text{H}_2\text{O}$ ), těžkovodní ( $\text{D}_2\text{O}$ ) a grafitové.

Podle druhu použitého chladiva rozlišujeme reaktory chlazené plynem (CO<sub>2</sub>, He), chlazené vodou (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O), chlazené organickými látkami (polyfenily), chlazené tekutým kovem (tekutý Na).

Podle toho, zda dochází v aktivní zóně vodou chlazeného reaktoru k varu chladiva či nikoliv rozlišujeme na varné a tlakovodní reaktory.

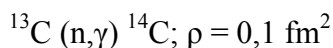
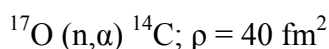
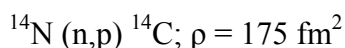
Tab. 1.5 Základní typy jaderných energetických reaktorů. <sup>(16)</sup>

Označení podle energie neutronů	Označení podle moderátoru	Chladivo	Označení podle IAEA
Tepelné reaktory	lehkovodní	H <sub>2</sub> O	PWR tlakovodní reaktor
			BWR varný reaktor
	grafitové	CO <sub>2</sub>	GCR magnoxový reaktor
			AGR zdokonalený plynem chlazený reaktor
		He	HTGR vysokoteplotní reaktor
		H <sub>2</sub> O	LWGR grafitový reaktor chlazený obyčejnou vodou
	BWGR grafitový reaktor chlazený obyčejnou vodou (varný)		
	těžkovodní	D <sub>2</sub> O	PHWR těžkovodní reaktor CANDU
		H <sub>2</sub> O	HWLWR těžkovodní reaktor chlazený obyčejnou vodou
		CO <sub>2</sub>	HWGCR těžkovodní reaktor chlazený plynem
Rychlé reaktory	bez moderátoru	Na	FBR rychlý množivý reaktor

### 1.11 Jaderný reaktor jako zdroj C-14

V jaderné elektrárně probíhají dva procesy, při kterých vznikají radionuklidy. Jsou to štěpný proces a aktivace. Většina štěpných produktů zůstává v palivu, avšak část těchto štěpných produktů prochází mikroskopickými trhlinami nebo netěsnostmi vnějšího obalu proutků jaderného paliva až do chladiva aktivní zóny. Korozní produkty konstrukčních materiálů primárního okruhu a materiály reaktorového chladiva z nečistot a chemických přísad v chladivu jsou při průchodu aktivní zónou reaktoru aktivovány neutrony za vzniku aktivačních korozních produktů. Mezi nejvýznamnější radionuklidy, které vznikají při provozu jaderné elektrárny, patří: štěpné produkty, transurany, aktivační korozní produkty a aktivační produkty nečistot v roztoku chladiva.

Zdrojem C-14 jsou především jaderné reakce probíhající v roztoku chladiva primárního okruhu. Uhlík 14 vzniká reaktoru především podle těchto reakcí, kde  $\rho$  je účinný průřez reakce:



Rychlosti produkce C-14 se liší v závislosti na typu reaktoru. U lehkovodních reaktorů je rychlost produkce tohoto radionuklidu v chladící vodě dána koncentrací dusíku. Rychlost produkce C-14 v chladivu lehkovodních tlakových reaktorů je v literatuře uváděna hodnota přibližně  $1,9 \cdot 10^{11} \text{ Bq.GW}_E^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ , v palivu a konstrukčních materiálech  $5,6 \cdot 10^{11}$  a  $9,3 \cdot 10^{11} \text{ Bq.GW}_E^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ .<sup>(24)</sup> Údaje jsou normalizovány na jednotku produkované elektrické energie. Za běžného provozu přechází radiouhlík z chladiva především do plyných výpustí. Pro lehkovodní tlakové reaktory je to přibližně 95% z celkově uvolněného C-14.<sup>(4)</sup> Radiouhlík vzniklý v palivu může být uvolněn až v průběhu přepracování vyhořelého paliva. Obsah radiouhlíku v primárním okruhu se mění v závislosti na režimu odpouštění části chladiva a parametrech provozu reaktoru.

V roztoku chladiva primárního okruhu lehkovodního reaktoru se radiouhlík vyskytuje zejména ve formě těkavých organických sloučenin a v menší míře se zde vyskytují další převážně lehké uhlovodíky. <sup>(24)</sup>

Tab. 1.6 Zastoupení organických forem <sup>14</sup>C v technologických částech JE s reaktory PWR. <sup>(4)</sup>

	Zastoupení organických forem <sup>14</sup> C (%)
Chladicí voda	58 – 95 ( <i>modifikující faktory: tlak vodíku, přídavek dusíku, režim odplyňování</i> )
Plynné výpusti	80 – 94
Ionexové kolony	72 – 92 ( <i>zde dochází rovněž k sorpčnímu zachytu organických forem, tj. nikoliv cestou iontové výměny</i> )

### 1.11.1 Hlavní cesty uvolnění <sup>14</sup>C do ventilačních komínů

Hlavní cesty uvolnění <sup>14</sup>C do ventilačního komína hlavního výrobního bloku (VK HVB) jsou odplynění primárního okruhu, případné neorganizované úniky chladiva a částečně také aktivace dusíku ve vzdušnině šachty reaktoru.

Největším zdrojem <sup>14</sup>C na budově aktivních a pomocných provozů jsou odparky systému regenerace kyseliny borité, kam se přivádí voda z nádrže nečistého kondenzátu z hlavního výrobního bloku. Páry vznikající při odpařování jsou vedeny do kondenzátoru odplyňovače a nezkondenzované složky pak dále do vzduchotechnického systému, který ústí do ventilačního komína budovy aktivních a pomocných provozů (VK BAPP).

### 1.12 Plynné výpusti do ovzduší

Výpust' je látka vypouštěná z pracoviště se zdroji ionizujícího záření do životního prostředí, obsahující radionuklidy v množství nepřesahujícím podmínky povolení k uvádění radionuklidů do životního prostředí.

Při zpracování plynných radioaktivních odpadů dochází k odloučení radioaktivních látek filtrací, trvalou či dočasnou adsorpcí tak, aby se jejich aktivita snížila na co

možná nejnižší úroveň. Plynné radioaktivní odpady lze vypustit do ovzduší pouze v případě, že úroveň aktivity takto zpracovaných plynných radioaktivních odpadů je nižší než stanovený autorizovaný limit.

Plynné výpusti C-14 se v případě Jaderné elektrárny Temelín vypouští do ovzduší na pěti místech: vnitřní a vnější ventilační komíny na obou hlavních výrobních blocích, do kterých ústí systém ventilace kontejnmentů a systémy odvdoušnění aktivních technologických zařízení a dále ventilačním komínem v budově aktivních a pomocných provozů. Výpusti do ovzduší se kontinuálně monitorují a jsou průběžně hodnoceny s cílem zabránit překročení stanovených autorizovaných limitů.

V plynných výpustech jaderné elektrárny Temelín se nacházejí tyto radionukli-  
dy:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{76}\text{As}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^3\text{H}$  a  $^{14}\text{C}$ . Radionuklidové složení plynných výpustí závisí na typu reaktoru.

### ***1.13 Programy monitorování***

Uskutečňováním radiačního monitorování je zajišťováno splnění požadavků limitování ozáření osob, prokazování optimalizace radiační ochrany, zajištění požadavků na bezpečný provoz pracovišť se zdroji ionizujícího záření a včasného zjištění odchylek od normálního provozu. Program monitorování obsahuje zpravidla monitorování pracoviště, osobní monitorování, monitorování výpustí a monitorování okolí. Monitorování lze dělit dle časového průběhu na soustavné (kontinuální), pravidelné (periodické) a operativní. Pokud je výsledků monitorování využito ke kontrole dodržování orgánem dozoru stanovených limitů a podmínek jde o bilanční monitorování. Pokud je výsledků využito k signalizaci odchylek od těchto podmínek jde o signální monitorování.

V této práci se budu podrobněji zabývat programy monitorování výpustí a okolí pracoviště.

#### ***1.13.1 Referenční úrovně***

Referenční úrovně jsou významnou částí programu monitorování. Jedná se o limitované hodnoty, nebo z nich odvozené přímo měřitelné veličiny radiační ochrany.

Na základě těchto hodnot se posuzuje úroveň zajištění požadavků radiační ochrany. Jde o záznamové, vyšetřovací a zásahové úrovně.

Záznamové úrovně jsou takové referenční úrovně, při jejichž nepřekročení není nutné hodnotu měřené veličiny podrobněji zaznamenávat a evidovat. Tyto úrovně tak oddělují hodnoty zasluhující pozornost od hodnot bezvýznamných.

Překročení vyšetřovací úrovně je podnětem k následnému šetření o příčinách a důsledcích zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany.

Jako zásahové úrovně se označují takové referenční úrovně, jejichž překročení je podnětem k zahájení určité činnosti. Např. zavedení organizačních, technických a ochranných opatření.

#### ***1.14 Monitorování výpustí***

Ze zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů v platném znění vyplývá požadavek na zabezpečení monitorování výpustí. Ve vyhlášce SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně jsou uvedeny podrobné požadavky kladené na program monitorování. Program monitorování platí pro monitorování provozu jaderné elektrárny za normálního provozu a při mimořádných událostech. Monitorování výpustí a okolí pracoviště je nezbytnou součástí programu monitorování všude, kde dochází ke zneškodňování radioaktivních odpadů jejich řízeným vypouštěním, nebo kde existuje možnost úniku závažného množství radioaktivních látek do okolí. Tato monitorování slouží k včasnému zjištění a zhodnocení případných úniků a jejich důsledků na obyvatelstvo v okolí pracoviště a na životní prostředí. Monitorování výpustí zabezpečuje ten, kdo radioaktivní látky vypouští. Výsledná aktivita vypouštěných radionuklidů je porovnávána se stanoveným, autorizovaným limitem. Monitorování výpustí do ovzduší a vodotečí zahrnuje soustavné bilanční měření reprezentativních radionuklidů, které závažně přispívají k ozáření obyvatelstva a nepřetržité měření reprezentativních radionuklidů, které umožňují rychlé signalizování odchylek od normálního provozu. Je zajišťováno také soustavné monitorování všech potenciálních cest nepřípustných úniků radionuklidů do ovzduší.

### ***1.14.1 Metodika programu monitorování plynných výpustí <sup>14</sup>C***

Program monitorování výpustí do ovzduší zahrnuje bilanční měření <sup>14</sup>C ve vnitřním a vnějším ventilačním komíně obou hlavních výrobních bloků a ve ventilačním komíně budovy aktivních a pomocných provozů. Měření ve vnějším ventilačním komíně hlavního výrobního bloku 1 a 2 je prováděno pouze za odstávky reaktoru a při havarijních a pohavarijních stavech. Cílem měření je bilancování výpustí a nepřekročení stanovených limitních hodnot.

Měření probíhá kontinuálním odběrem vzorků vzdušiny z ventilačního komína, zachycením <sup>14</sup>C do roztoku NaOH a následným měřením objemové aktivity <sup>14</sup>C. Dále se stanovuje vypuštěná aktivita (součet organické a anorganické složky) za požadované období a provede se bilanční výpočet. Perioda měření je jeden týden.

Rozsah měření pro ventilační komíny hlavních výrobních bloků je  $7 \cdot 10^6 - 2,8 \cdot 10^{10}$  Bq/týden pro průtok  $1,4 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>/týden. Pro bilanční měření ve ventilačním komíně budovy aktivních a pomocných provozů je rozsah měření  $3,5 \cdot 10^8 - 3,5 \cdot 10^{11}$  Bq/týden pro průtok  $7 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>/týden. <sup>(2)</sup> Průtok při odběru vzorku je úměrný průtoku vzdušiny ve ventilačním komíně. Minimální hodnota průtoku při odběru vzorku je 200 ml/min.

Jako záznamová referenční hodnota je zaznamenávána každá hodnota od minimální detekovatelné aktivity do hodnoty nepřesahující stanovenou hodnotu vyšetřovací referenční úrovně. Hodnota vyšetřovací referenční úrovně byla provozními zkušenostmi ETE stanovena na 10 GBq za týden z jednoho ventilačního komína. Při dosažení hodnoty vyšetřovací referenční úrovně probíhá šetření s cílem zjistit, jaké technologické operace související s plynnými výpustmi byly v posledním období prováděny. Zásahová úroveň nebyla stanovena. <sup>(2)</sup>

### ***1.14.2 Způsob odběru vzorku vzdušiny ventilačního komína ke stanovení <sup>14</sup>C***

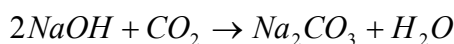
Odebírání vzorku vzdušiny z ventilačního komína pro potřeby stanovení <sup>14</sup>C je zajištěno odběrovým zařízením V3H14C, model K0220-02. Zařízení je určeno pro bilanční odběry <sup>3</sup>H a <sup>14</sup>C.



Obr. 1.6 Zařízení pro odběr  $^3\text{H}$  a  $^{14}\text{C}$ . <sup>(14)</sup>

Jedná se o mikroprocesorem řízené zařízení určené pro vzorkování plynných výpustí. Jako sorpční média jsou použita Silikagel pro záchyt  $^3\text{H}$  a roztok NaOH k zachycení  $^{14}\text{C}$ . Tento model zařízení je dvoucestný, přičemž první odběrová trasa je určena pro odběr  $^3\text{H}$  a  $^{14}\text{C}$  v anorganických formách  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CO}_2$ . Zde je odebraný vzorek vzduchu prosáván přes vzorkovnice s odběrovými lahvemi, které obsahují roztok hydroxidu sodného (NaOH), ve kterém oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) chemicky reaguje na uhličitan sodný ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ) podle rovnice:





Druhá odběrová trasa je vybavena katalytickým spalováním a je určena jak k odběru anorganického CO<sub>2</sub>, tak k odběru organických forem lehkých uhlovodíků C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>. Nastavená teplota katalyzátoru je 460°C. Tato teplota je optimální pro spalování CH<sub>4</sub>.

Odběrové trasy mají společný aerosolový filtr, teploměr, vlhkoměr, průtokoměr a tlakoměr na měření parametrů vstupujícího vzduchu.

Zařízení sleduje skutečný průtok ve ventilačním komíně a udržuje průtoky na obou trasách proporcionální tomuto průtoku. Průtok jednou trasou je softwarově omezen na 0,2 ml/min. Maximální průtok ve společné trase zařízení je 1l/min a v jednotlivých trasách zařízení maximálně 0,5l/min.

První trasa se skládá z čerpadla, dvou Silikagelových lahví, průtokoměru a tří lahví na NaOH. Druhá trasa obsahuje navíc vyhřívaný palladiový katalyzátor, zařazený za čerpadlem. Tento katalyzátor je během provozu neustále vyhříván na danou teplotu. Celkový objem lahví pro Silikagel jednotlivých tras je 3 x 0,25 l a lahví pro NaOH také 3 x 0,25 l. Jednotlivé vzorkovnice jsou plněny následujícím objemem roztoku 3mol/l NaOH: první láhev 210 ml, druhá 170 ml a třetí 130 ml. Celkový objem roztoku NaOH pro zachyt <sup>14</sup>C v jedné odběrové trase je tedy 510 ml. Při normálním provozu jsou lahve vyměňovány jednou týdně a odváženy na vyhodnocení do laboratoře.

### ***1.14.3 Postup stanovení odebraných vzorků <sup>14</sup>C plynných výpustí***

Měření odebraných vzorků plynných výpustí je zajištěno pracovníky Laboratoře radiační kontroly okolí JE Temelín. Je zde stanovována objemová aktivita <sup>14</sup>C v anorganické formě (CO<sub>2</sub>) a celkové formě (anorganická a uhlovodíková forma) ve výpustech do ovzduší metodou kapalinové scintilační spektrometrie záření beta.

Po ukončení odběrového období (1 týden), je <sup>14</sup>C zachycen v roztocích hydroxidu sodného ve formě uhličitanu sodného. Poté jsou vzorkovnice vyměněny za nové a vzorkovnice s exponovaným roztokem NaOH jsou přeneseny ke zpracování, změření a

vyhodnocení. V laboratoři jsou smíchány příslušné 3 vzorkovnice dohromady a dobře promíchány. Poté je 100g exponovaného roztoku NaOH zahřáto na teplotu 60°C. Dále je uhlík separován vysrážením chloridem barnatým ( $\text{BaCl}_2$  250g/l), zahřátým rovněž na teplotu 60°C. Po smísení obou roztoků vznikne bílá sraženina uhličitanu barnatého ( $\text{BaCO}_3$ ). Sraženina se ponechá částečně sedimentovat a přidáním několika ml chloridu barnatého dokonale vysrážet. Poté je suspenze  $\text{BaCO}_3$  promývána demineralizovanou vodou, přefiltrována a sušena při teplotě 100 – 120°C po dobu 10-15 hodin až do konstantní hmotnosti. Přesně odvážený 1,00g suchého prášku  $\text{BaCO}_3$  je smíchán se 7 ml demineralizované vody a homogenizován ultrazvukem. Poté je přidáno 10 ml scintilačního roztoku Instagel Plus a vzniklá směs je opět důkladně promíchána. Scintilační roztok je volen z důvodu malé energie a dosahu emitovaného  $\beta$  záření. V této směsi pak dochází ke konverzi kinetické energie  $\beta$  částic na fotonové záření ve viditelné oblasti. Takto připravený vzorek je předán ke změření. K sérii vzorků se přidává ještě slepý vzorek (z důvodu stanovení pozadí) o stejném složení, ale ve kterém je aktivní složka nahrazena 1g neaktivního  $\text{BaCO}_3$ .

Vzorek je vložen do kapalného scintilačního analyzátoru, kde se ponechá v temnu a při teplotě 10°C po dobu minimálně 3 hodin. Poté se vzorky měří v pořadí: slepý vzorek, kontrolní standard  $^{14}\text{C}$ , aktivní vzorky. Měření trvá asi 1 hodinu.

Jako měřicí přístroj je používán kapalinový scintilační spektrometr typu Tri-Carb 3170 TR/SL. Emitované záblesky fotonů z měřeného aktivního vzorku jsou zde registrovány dvěma fotonásobiči a následná elektronika vyhodnocuje koincidenční impulsy v odpovídajícím energetickém intervalu.



Obr. 1.7 Kapalinový scintilační spektrometr typu Tri-Carb 3170 TR/SL.

#### 1.14.4 Výpočet objemové aktivity $^{14}\text{C}$ ve vzdušnině

Z naměřených četností vzorku a pozadí jsou vypočteny měrné aktivity  $^{14}\text{C}$  ve slepém vzorku, kontrolním standardu a měřeném vzorku podle vzorců:

$$A_p = \frac{n_p}{E_p} \quad A_s = \frac{n_s}{E_s} \quad A_{v+p} = \frac{n_{v+p}}{E_v} \quad [\text{Bq/g}]$$

kde  $A_{v+p}$ ,  $A_s$ ,  $A_v$  jsou měrné aktivity slepého vzorku, kontrolního standardu a vzorku,

$n_p$ ,  $n_s$ ,  $n_{v+p}$  jsou četnosti impulsů [cps],

$E_p$ ,  $E_s$ ,  $E_v$  jsou příslušné kalibrační konstanty [cps / Bq/g].

Provedení korekce na pozadí podle vzorce:

$$A_m = A_{v+p} - A_p \quad [\text{Bq/g}]$$

kde  $A_m$  je měrná aktivita C-14 v měřicí lahvičce [Bq/g],

$A_{v+p}$  je měrná aktivita C-14 včetně pozadí ve sraženině v měřicí lahvičce [Bq/g],

$A_p$  je měrná aktivita C-14 ve slepém vzorku [Bq/g].

Následuje výpočet hmotnosti exponovaného roztoku NaOH podle vzorce:

$$m_{\text{exp}} = m_{\text{s louhem}} - m_{\text{prázdná}} \quad [\text{g}]$$

kde  $m_{\text{exp}}$  je celková hmotnost exponovaného NaOH na konci odběrového období [g],

$m_{\text{s louhem}}$  je hmotnost vzorkovnic s NaOH na konci odběrového období [g],

$m_{\text{prázdná}}$  je hmotnost příslušných prázdných lahví bez NaOH [g].

Výpočet alikvotního objemu prosátého vzduchu v izolované sraženině podle vzorce:

$$V_{\text{alivot}} = \frac{m_{\text{NaOH}}}{m_{\text{exp}}} \cdot \frac{1,00}{m_{\text{celk}}} \cdot V_{\text{celk}} \quad [\text{m}^3]$$

kde  $V_{\text{alivot}}$  je alikvotní objem prosátého vzduchu [ $\text{m}^3$ ],

$m_{\text{NaOH}}$  je hmotnost exponovaného NaOH pro přípravu vzorku [g],

$m_{\text{exp}}$  je celková hmotnost exponovaného NaOH [g],

$m_{\text{celk}}$  je celková hmotnost sraženiny  $\text{BaCO}_3$  [g],

$V_{\text{celk}}$  je celkový objem prosátého vzduchu příslušnou odběrovou trasou [ $\text{m}^3$ ].

Nakonec je vypočtena objemová aktivita C-14 v plynné výpusti příslušného ventilačního komína podle vzorce:

$$A_v = \frac{A}{V_{\text{aliquot}}} \quad [\text{Bq/m}^3]$$

kde  $A_v$  je objemová aktivita C-14 v plynné výpusti [ $\text{Bq/m}^3$ ],

$A$  je aktivita C-14 v 1 g sraženiny v měřicí lahvičce [ $\text{Bq}$ ],

$V_{\text{aliquot}}$  je alikvotní objem prosátého vzduchu [ $\text{m}^3$ ].

Nejistota stanovení objemové aktivity  $^{14}\text{C}$  ve vzorcích plynných výpustí činí 14%. Mezi hlavní nejistoty patří celková nejistota aktivity kalibračního standardu (2%), nejistota daná opravou na ztráty při použití srážecího postupu (1,6%), špatná homogenizace vzorku (4%) a nejistota stanovení objemu prosátého vzduchu přes roztok NaOH přes týden (5% – údaj výrobce). Minimálně detekovatelná objemová aktivita  $^{14}\text{C}$  v měřeném vzorku je  $0,09 \text{ Bq/m}^3$ .

Naměřené výsledky aktivit  $^{14}\text{C}$  jsou evidovány, zaznamenány do databáze, vyhodnoceny a verifikovány pracovníky Laboratoře radiační kontroly okolí JE Temelín.

### ***1.15 Monitorování okolí***

Na jaderných zařízeních se rovněž zpracovává program monitorování okolí. Toto monitorování je zabezpečeno sítí pozorovacích, monitorovacích bodů a tras. K monitorování okolí pracovišť se přistupuje v případě, že je předpoklad ovlivnění životního prostředí soustavně vypouštěnými nebo havarijně uniklými radionuklidy. Kritériem rozhodnutí o takovém monitorování je možnost závažných hodnot kolektivního úvazku ekvivalentní dávky nebo překročení závažného zlomku některého limitu jednotlivci z obyvatelstva. Při běžném provozu je monitorování okolí doplňkem monitorování výpustí a využívá se potvrzení bezpečného vypouštění odpadních radionuklidů do okolí. Na významu nabývá především při haváriích. Zde potom dává podklad pro rozhodnutí o opatřeních na ochranu obyvatelstva. Proto se monitoruje obsah vypouštěných nebo do ovzduší a vodotečí uniklých radionuklidů a jejich obsah v potravinách, vodě a dalších složkách životního prostředí.

Na monitorování složek životního prostředí se podílejí: Centrální laboratoř monitorovací sítě, MMKO, MMKV a laboratorní skupiny. Monitorovány jsou tyto složky životního prostředí: ovzduší (aerosoly, plyny, spady), půdy a porosty, pitné a povrchové vody, vodárenské kaly a říční sedimenty.

#### ***1.15.1 Předprovozní monitorování***

Předprovozní monitorování bývá zahájeno 1 až 2 roky před uvedením zařízení do provozu. Cílem je získání podkladů o původním stavu okolí budoucího zdroje a předprovozní ověření programu monitorování. Toto monitorování slouží k určení radiačního pozadí měřeného životního prostředí a jeho složek. Provádí se výběr a odzkoušení optimálních metodik odběru, zpracování a měření vzorků životního prostředí v okolí. Ověřuje se způsob vyhodnocování a interpretace naměřených hodnot. Hlavní součástí bývají meteorologické studie. Za normálního provozu monitorování okolí slouží k potvrzování bezpečnosti provozu daného zařízení ve vztahu k okolí a přípravě personálu k zásahu v případě vzniku radiační mimořádné události s dopady na okolí.

V rámci předprovozního monitorování byl v okolí Jaderné elektrárny Temelín od roku 1991 do roku 2000 soustavně zjišťován obsah radionuklidů v jednotlivých složkách životního prostředí. Rozsah monitorování byl dán Předprovozním monitorovacím programem schváleným Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a zahrnoval pás okolo elektrárny o poloměru přibližně 20 km.

#### ***1.15.2 Provozní monitorování***

Po spuštění jaderně energetického zařízení musí docházet k pravidelnému odbírání vzorků v rozsahu stanoveném v nařízení vlády České republiky číslo 11/1999 Sb. o zóně havarijního plánování a obsahem schváleného Programu monitorování okolí.

#### ***1.16 Způsoby monitorování aktivity atmosférického $^{14}\text{C}$ v životním prostředí***

V roce 2001 bylo započato sledování  $^{14}\text{C}$  v atmosféře na našem území. Jedná se o měření objemové aktivity  $^{14}\text{C}$  ve formě  $^{14}\text{CO}_2$ . Další možné formy uhlíku v ovzduší sledovány nejsou, protože jejich koncentrace jsou oproti  $\text{CO}_2$  řádově nižší (koncentrace

CH<sub>4</sub> a CO činí obvykle zlomky procenta koncentrace CO<sub>2</sub>, koncentrace ostatních uhlovodíků jsou o několik dalších řádů nižší). Aktivita <sup>14</sup>C ve formě methanu obvykle přibližně sleduje časový průběh jeho aktivity ve formě CO<sub>2</sub>. Uhlík ve formě CO zpravidla pochází ze spalování fosilních paliv a aktivita <sup>14</sup>C je zde proto velmi nízká.

Sledování atmosférického <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> poskytuje základní referenční údaje o aktivitách <sup>14</sup>C ve složkách životního prostředí. Obecně jsou dva přístupy k monitorování atmosférického <sup>14</sup>C v životním prostředí. Je to jednak přímé monitorování <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> v ovzduší a monitorování aktivity <sup>14</sup>C, který se fotosyntézou zabudoval do bioty.

#### ***1.16.1 Monitorování <sup>14</sup>C z ovzduší***

Radiouhlík lze monitorovat přímo v ovzduší. Kontinuální odběr vzorků probíhá záchytem na roztoku NaOH podobně jako ve ventilačních komínkách jaderné elektrárny. Tímto způsobem jsou monitorovány organické i anorganické formy radiouhlíku.

V případě Jaderné elektrárny Temelín je monitorování atmosférického <sup>14</sup>C zajištěno v rámci činnosti Radiační monitorovací sítě České republiky, Oddělením radiochemie Státního úřadu radiační ochrany ve spolupráci s Oddělením dozimetrie záření na Ústavu jaderné fyziky Akademie věd České republiky.

Probíhá sledování aktivity a objemové aktivity atmosférického <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> v Praze na Bulovce a v areálu SZÚ ve Šrobárově ulici s periodou měření 1 měsíc. Obě tyto lokality se nacházejí v blízkosti frekventovaných komunikací zatížených lokálním spalováním fosilních paliv.

Pro nalezení referenční úrovně aktivity <sup>14</sup>C v oblastech částečně zatížených Suessovým efektem je sledována aktivita atmosférického <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> na stanici ČHMÚ Košetice. Tyto oblasti jsou minimálně zatíženy lokálním spalováním fosilních paliv.

#### ***1.16.2 Monitorování <sup>14</sup>C z bioty***

Druhým způsobem monitorování je sledování navýšení aktivity <sup>14</sup>C v biotě. Jako vzorky pro měření jsou odebírány listy opadavých dřevin, jedno a víceleté byliny, zemědělské plodiny, maso, mléčné výrobky, med a jiné vzorky vyprodukované a odebrané v blízkém okolí jaderné elektrárny.

V okolí Jaderné elektrárny Temelín proběhly v letech 2002 a 2003 odběry vzorků listů opadavých dřevin na několika místech ve vzdálenostech 0,6 – 9,7 km. Jako pozadové referenční oblasti byly zvoleny lokality s nízkým antropogenním vlivem od spalování fosilních paliv (Košetice, Klet' a Sudoměřice u Bechyně). Odběry, měření vzorků a vyhodnocení proběhly ve spolupráci Státního ústavu radiační ochrany a Ústavu jaderné fyziky AV ČR.

### ***1.17 Metody stanovení $^{14}\text{C}$ v životním prostředí***

V současné době jsou pro stanovení  $^{14}\text{C}$  ze vzorků životního prostředí používány dvě konvenční metody založené na počítání radioaktivních přeměn a jedna metoda založená na přímém počítání atomů izotopů uhlíku.

#### ***1.17.1 Metoda GPC (Gas Proporcional Counting)***

Nejstarší, dnes však už méně používanou metodou, je měření vzorku na nízko-  
požadovém velkoobjemovém plynovém proporcionalním počítači (GPC). Uhlík ze vzorku je před měřením převeden do plynné formy. Aktivita je obvykle přeměřována ve formě přečištěného  $\text{CO}_2$ , příp. je vzorek dále zpracováván a uhlík je převeden do formy methanu ( $\text{CH}_4$ ) nebo acetylenu ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ).

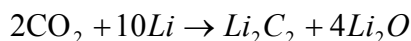
Při měření způsobují elektrony, emitované při radioaktivní přeměně  $\beta$ , ionizaci plynové náplně detektoru a dochází k uvolnění dalších elektronů, které jsou urychlovány vloženým napětím a způsobují další ionizaci. Tento impuls je detekován. Aktivita vzorku je úměrná počtu registrovaných impulsů za časovou jednotku. Takto detekovaná aktivita je poté korigována na příspěvek od přirozeného pozadí.

#### ***1.17.2 Metoda LSC (Liquid Scintillation Counting)***

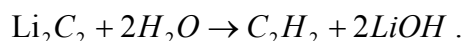
V současné době je nejpoužívanější konvenční metodou měření aktivity  $^{14}\text{C}$  ve formě benzenu s použitím nízko-  
požadových kapalinových scintilačních spektrometrů (LSC). Tato metoda je používána na Oddělení dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky AV ČR.



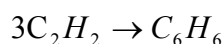
Vzorek je před měřením spálen v proudu kyslíku nebo karbonizován za omezeného přístupu vzduchu a vzniklý CO<sub>2</sub> přečištěn. Poté je syntetizován karbid lithný (Li<sub>2</sub>C<sub>2</sub>) ve dvou krocích. V prvním kroku probíhá redukce CO<sub>2</sub> s použitím kovového lithia na elementární uhlík:



Ve druhém kroku tento uhlík reaguje s lithiem za vzniku karbidu lithného. Takto připravený karbid lithný je hydrolyzován a vzniká acetylen dle rovnice:



V následující části je acetylen přečištěn (zbaven sloučenin dusíku, které zvyšují zhášení) a katalytickou trimerizací připraven benzen (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>):



Připravený benzen je po dobu několika týdnů (obvykle 1 měsíc) skladován pro vymření rušivého <sup>222</sup>Rn (T<sub>1/2</sub> 3,8 dne) a jeho dceřiných produktů (T<sub>1/2</sub> řádově minuty a hodiny). Radioaktivní přeměnou vzniklé <sup>210</sup>Pb (T<sub>1/2</sub> 22,3 let), ulpí na stěnách skleněné vzorkovnice, odkud je možné slít takřka čistý benzen. Ten je poté dlouhodobě proměřován na nízkopozadovém kapalinovém scintilačním spektrometru. Toto kapalinově scintilační měření je založeno na počítání radioaktivních přeměn <sup>14</sup>C, které jsou vztaženy na jednotku času. Při radioaktivní přeměně emitovaný elektron záření β předává svou energii scintilačnímu řetězci, který se skládá ze solventu, primárního a sekundárního scintilátoru za následné emise fotonu. Tyto fotony jsou detekovány fotonásobičem. Velikosti detekovaného impulsu je poté přiřazeno číslo kanálu a do tohoto kanálu je impuls přičten. Takto je získáno kapalinově-scintilační spektrum. Pro vyhodnocení se poté použije část spektra, která odpovídá energii záření β emitovaného radiouhlíkem.

Tato série vzorků, slepých a kontrolních vzorků je obvykle proměřována v mnoha opakovaných cyklech.



Obr. 1.8 Nízkopozad'ový kapalinový scintilační spektrometr Quantulus 1220. <sup>(40)</sup>

### 1.17.3 Metoda AMS (Accelerator Mass Spectrometry)

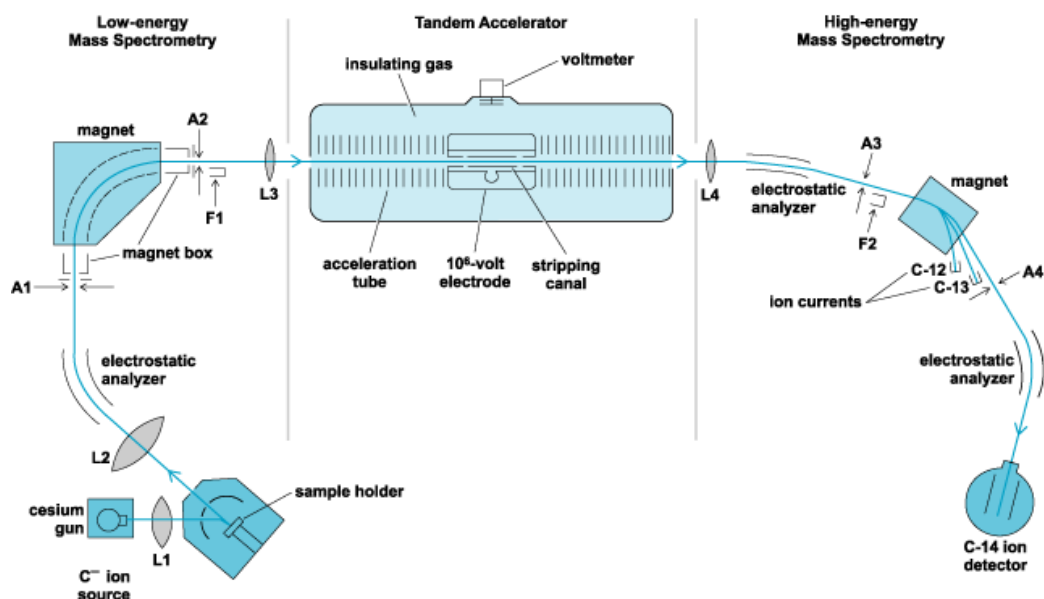
Hmotová spektrometrie s tandemovým urychlovačem se od předchozích dvou metod liší v tom, že nestanovuje počet radioaktivních přeměn za časovou jednotku, ale přímo počítá atomy s hmotovými čísly 12, 13 (stabilní izotopy uhlíku) a 14 ( $^{14}\text{C}$ ). Jde o vysoce citlivou a přesnou metodu.

Vzorek pro měření AMS je spálen na oxid uhličitý, přečištěn a poté v redukční atmosféře přidavkem vodíku převeden na elementární uhlík. Takto vzniklý grafit je lisován do terčů.

Grafitové terče jsou bombardovány ionty cesia, které takto generují záporně nabitě ionty uhlíku. První magnet vychyluje ve svazku ionty s hmotností 14. Kromě malého množství  $^{14}\text{C}^-$  je vychýleno mnohem více molekulárních iontů  $^{12}\text{CH}_2^-$  a  $^{13}\text{CH}^-$ , které mají stejné hmotové číslo. Tyto ionty v centrální stripovací části tandemového urychlovače kolidují s atomy argonu či tenkou folií (tzv. centrální „stripper canal“). Při kolizi dochází k rozpadu molekulárních iontů, změně jejich polaritě a vzniku kladných iontů  $\text{C}^{3+}$ . Ve druhé části urychlovače jsou tyto atomy uhlíku ve formě kladně nabitých

částic dále urychlovány k záporně nabité elektrodě, kde jsou pomocí různých magnetických filtrů vychylovány ionty izotopů uhlíku a s použitím Faradayových detektorů počítány atomy  $^{12}\text{C}$  a  $^{13}\text{C}$ . Pomocí plynových proporcionálních detektorů jsou detekovány atomy  $^{14}\text{C}$ .

Následně je vypočteno poměrové zastoupení atomů  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  a  $^{14}\text{C}$  ve vzorku.



Obr. 1.9 Schéma urychlovačového hmotnostního spektrometru (AMS).

Legenda k obrázku: Low-energy Mass Spectrometry – Nízkoenergetická hmotnostní

spektrometrie,

Tandem accelerator – Tandemový urychlovač,

High-energy Mass Spectrometry – Vysokoenergetická hmotnostní  
spektrometrie,

sample holder – držák vzorku,

C<sup>-</sup> ion source – zdroj C<sup>-</sup> iontů,

cesium gun – cesiové dělo (zdroj iontů cesia),

L1 – L4 – fokusační čočky,

A1 – A4, F1 – F2 – prvky určené pro nastavení přístroje,

electrostatic analyzer – elektrostatický analyzátor,

magnet box – magnet box,

*insulating gas – izolační plyn,*  
*voltmeter – voltmetr,*  
*acceleration tube – urychlovací trubice,*  
*10<sup>6</sup>- volt electrode – elektroda s napětím 10<sup>6</sup> voltů,*  
*stripping canal – centrální kanál (rozpad molekulárních iontů),*  
*ion currents – iontové proudy,*  
*C-14 ion detector – detektor <sup>14</sup>C iontů.*

### **1.18 Interpretace výsledků**

Výsledky monitorování výpustí a okolí daných zdrojů se zpravidla vyjadřují ve veličině aktivita radionuklidů vypouštěných do ovzduší a vodotečí, obsažených ve vybraných složkách životního prostředí, případně ve veličině dávkový ekvivalent měřené v určených kontrolních bodech v okolí daného zdroje. Výsledky monitorování se pomocí modelových výpočtů vyjadřují jako úvazek efektivní dávky pro jedince kritické skupiny obyvatelstva v okolí zdroje.

### ***1.19 Přehled legislativy související s radiační ochranou***

- Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů v platném znění.
- Zákon č. 13/2002 Sb. kterým se mění zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů.
- Vyhláška SÚJB č. 106/1998 Sb. o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu.
- Vyhláška SÚJB č. 146/1997 Sb., kterou se stanoví činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro svolení k přípravě vybraných pracovníků, ve znění vyhlášky SÚJB č. 315/2002 Sb.
- Vyhláška SÚJB č. 185/2003 Sb. o vyřazování jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie z provozu.
- Vyhláška SÚJB č. 195/1999 Sb. o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.
- Vyhláška SÚJB č. 214/1997 Sb. o zabezpečování jakosti při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření a o stanovení kritérií pro zařazení a rozdělení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd.
- Vyhláška SÚJB č. 215/1997 Sb. o kritériích pro umístování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření.
- Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění.
- Vyhláška SÚJB č. 315/2002 Sb., kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 146/1997 Sb., kterou se stanoví činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřová-

ní zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení v přípravě vybraných pracovníků.

- Vyhláška SÚJB č. 317/2002 o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě).
- Vyhláška SÚJB č. 318/2002 Sb. o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.
- Vyhláška SÚJB č. 319/2002 Sb. o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě.
- Vyhláška SÚJB č. 419/2002 Sb. O osobních radiačních průkazech.

## 2 Cíle práce a hypotézy

Cílem práce je zhodnotit trend výskytu  $^{14}\text{C}$  v životním prostředí v souvislosti s provozem jaderných reaktorů a jeho rizika vlivu na člověka. Dále zhodnotit plnění legislativních požadavků v oblasti zajištění monitorování  $^{14}\text{C}$ .

Hypotézy:

Měření výskytu radioisotopu  $^{14}\text{C}$  v plynných výpustech Jaderné elektrárny Temelín splňuje zákonné a autorizované limity předepsanými platnou legislativou České republiky.

V okolí jaderné elektrárny Temelín je zajištěno monitorování výskytu  $^{14}\text{C}$  v životním prostředí.

### 3 Metodika

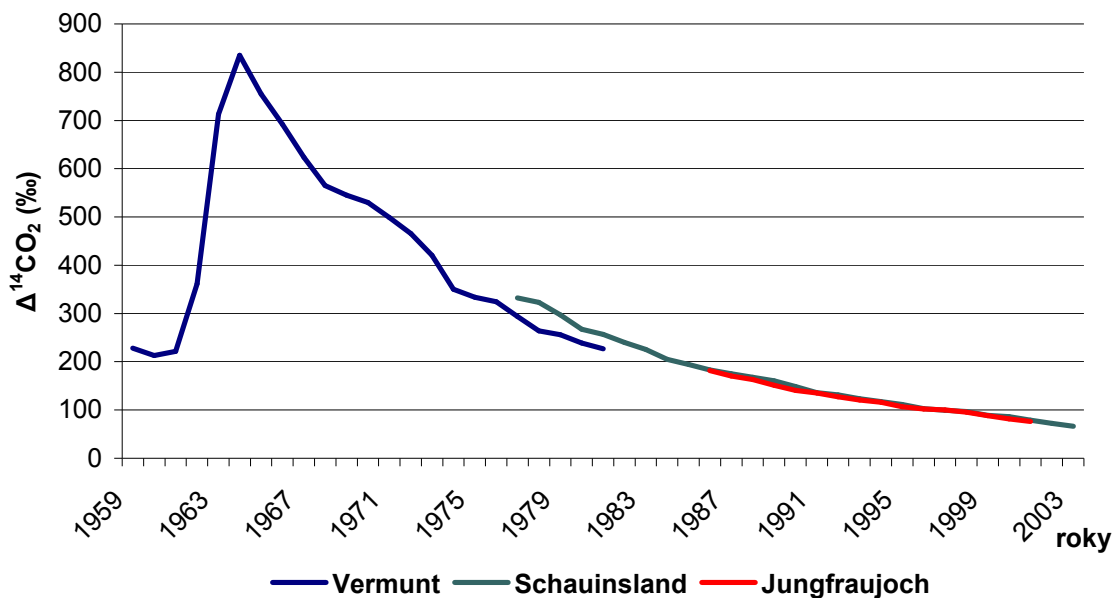
Po prostudování domácí a zahraniční odborné literatury, vztahující se k metodám stanovování  $^{14}\text{C}$ , monitorování plyných výpustí Jaderné elektrárny Temelín a distribuci  $^{14}\text{C}$  v životním prostředí, bylo přistoupeno ke sběru dostupných dat. Tato data byla obsažena v měsíčních zprávách Laboratoře radiační kontroly okolí v Českých Budějovicích, výročních zprávách Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, výročních zprávách Státního úřadu radiační ochrany, zprávách o radiační situaci na území České republiky a interních dokumentech Jaderné elektrárny Temelín a Laboratoře radiační kontroly okolí v Českých Budějovicích. Údaje o měření  $^{14}\text{C}$  v plyných výpustech jaderných elektráren ve světě byly získány ze zprávy UNSCEAR z roku 2000 a informací volně dostupných na internetu. Následně bylo provedeno zpracování a analýza dat a informací ve smyslu přijaté hypotézy formou tabulek a grafů.



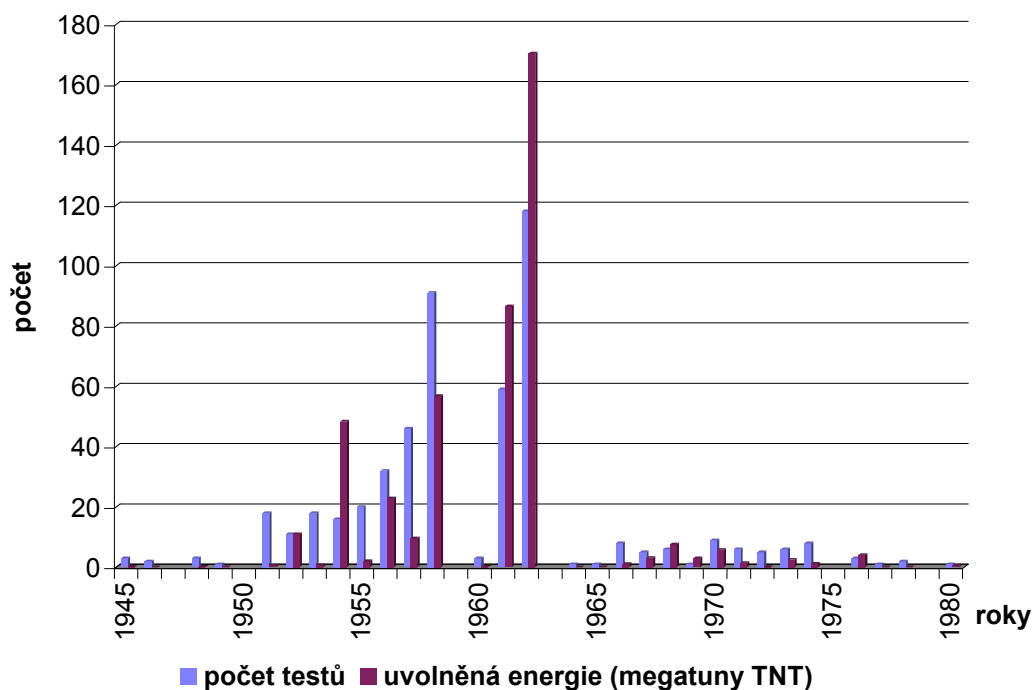
## 4 Výsledky

### 4.1 Měření aktivit atmosférického $^{14}\text{C}$ ve světě.

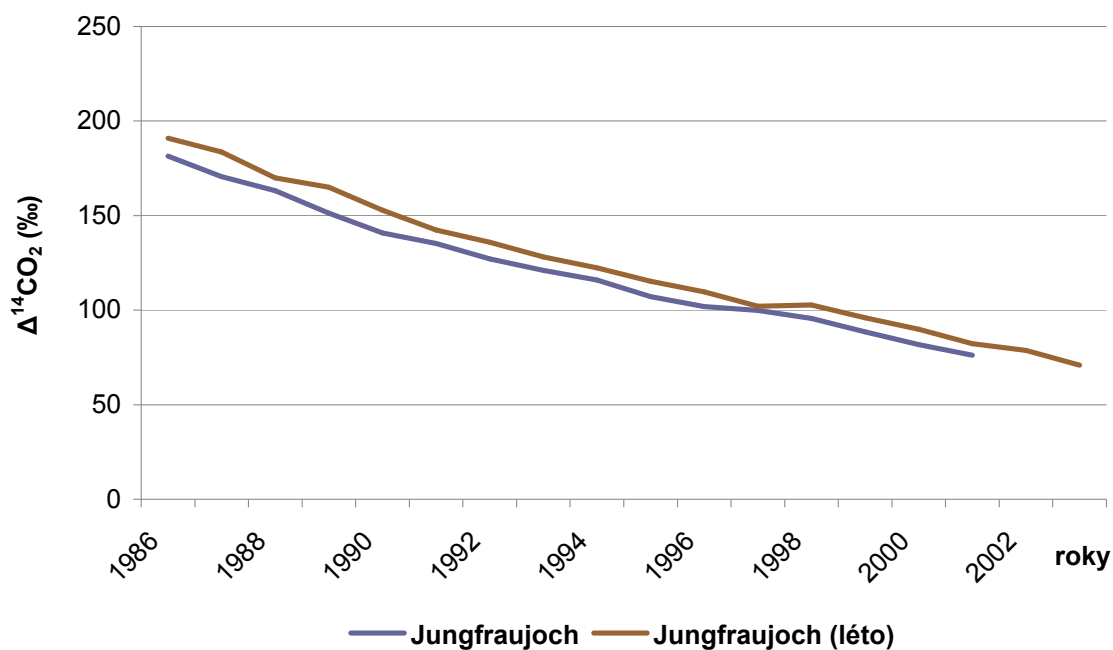
Graf č. 1: Vývoj aktivity atmosférického  $\Delta^{14}\text{CO}_2$  ve třech evropských monitorovacích stanicích.



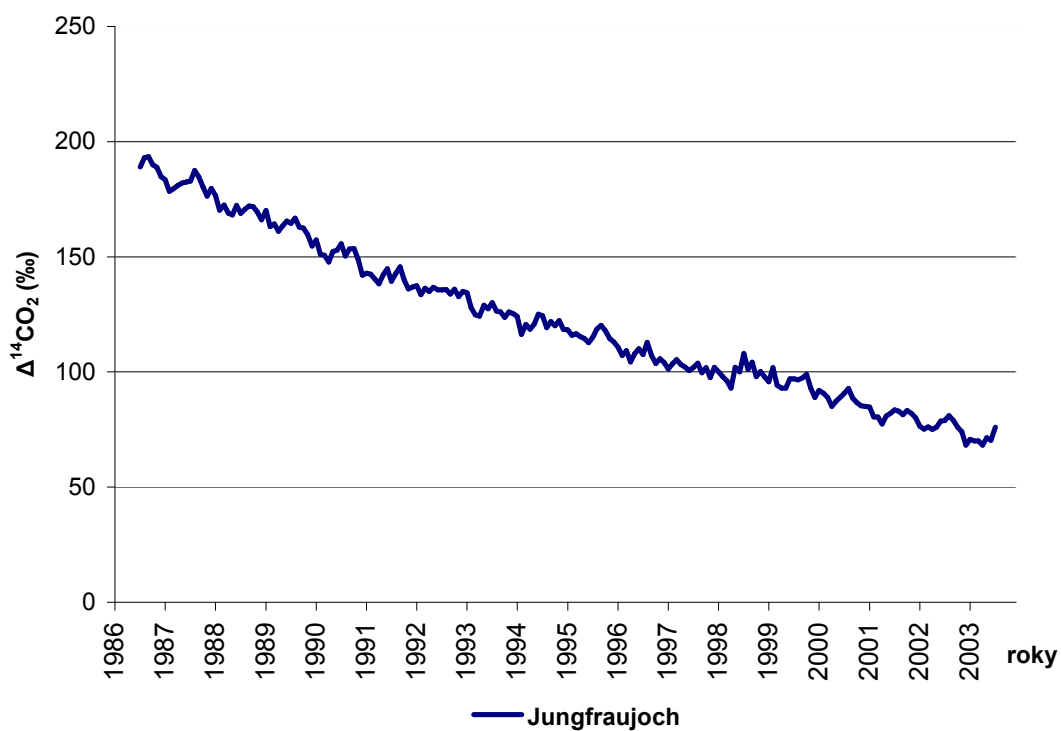
Graf č. 2: Počet atmosférických testů jaderných zbraní a jejich energie.



Graf č. 3: Rozdíl hlavních ročních hodnot  $\Delta^{14}\text{CO}_2$  a hlavních hodnot  $\Delta^{14}\text{CO}_2$  v letním období v letech 1986 – 2003 ve stanici Jungfraujoch.



Graf č. 4: Průběh aktivity atmosférického  $\Delta^{14}\text{CO}_2$  ve stanici Jungfraujoch.



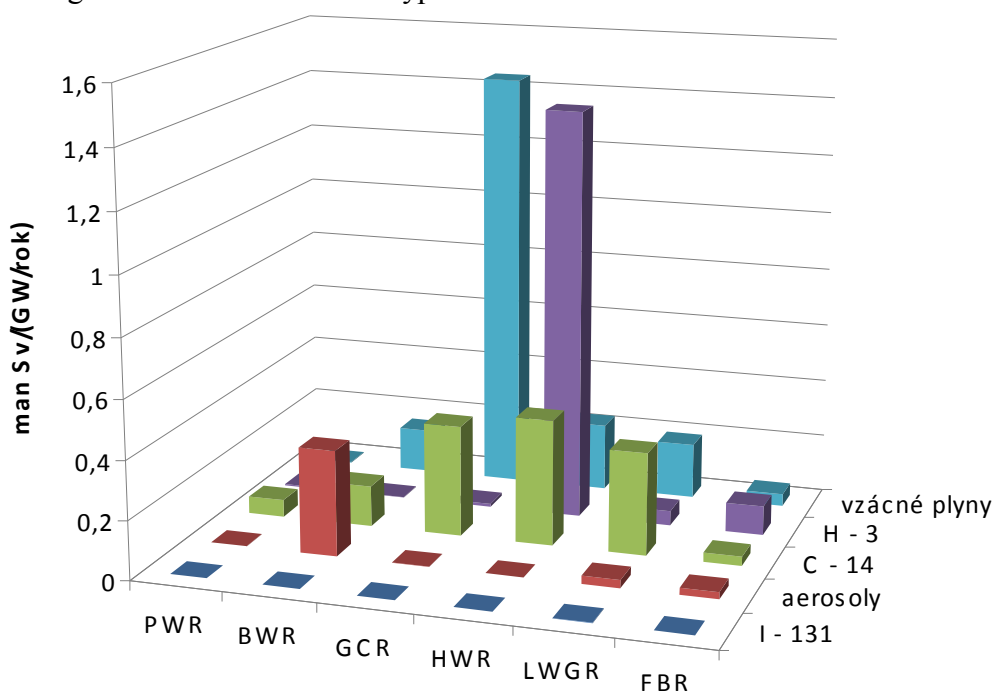
Tabulka č. 1: Světový inventář  $^{14}\text{C}$ .

Pozn.: a – rozptýleno do ovzduší, b – údaje se vztahují k rozmezí let 1995 – 1997.

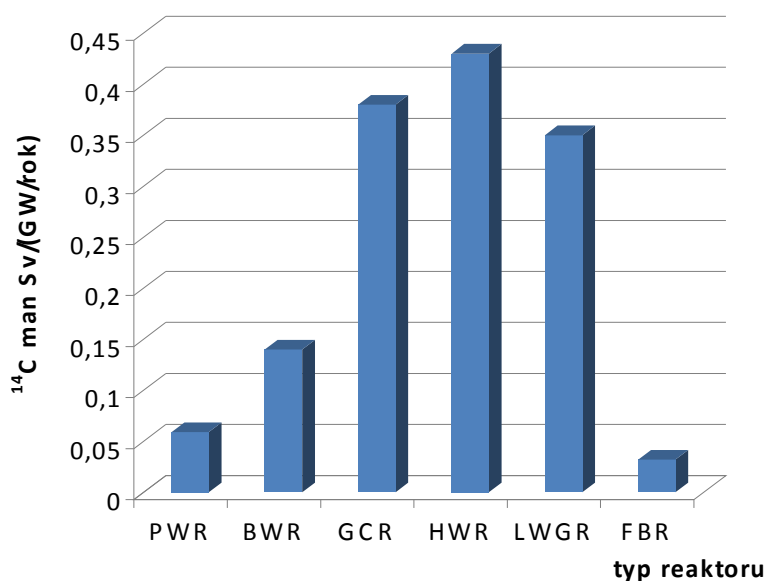
Zdroj	Inventář (PBq)	Rychlost uvolňování do životního prostředí (PBq/rok)	Podíl z inventáře (%)
Přirozená kosmogenní produkce	12750	1,54	98,34
Atmosférické testy jaderných zbraní	213 <sup>a</sup>	-	1,64
Jaderně energetická zařízení	2,8	0,15 <sup>b</sup>	0,02
Celkem	12966		100

#### 4.2 Uhlík-14 z jaderně energetických zařízení ve světě.

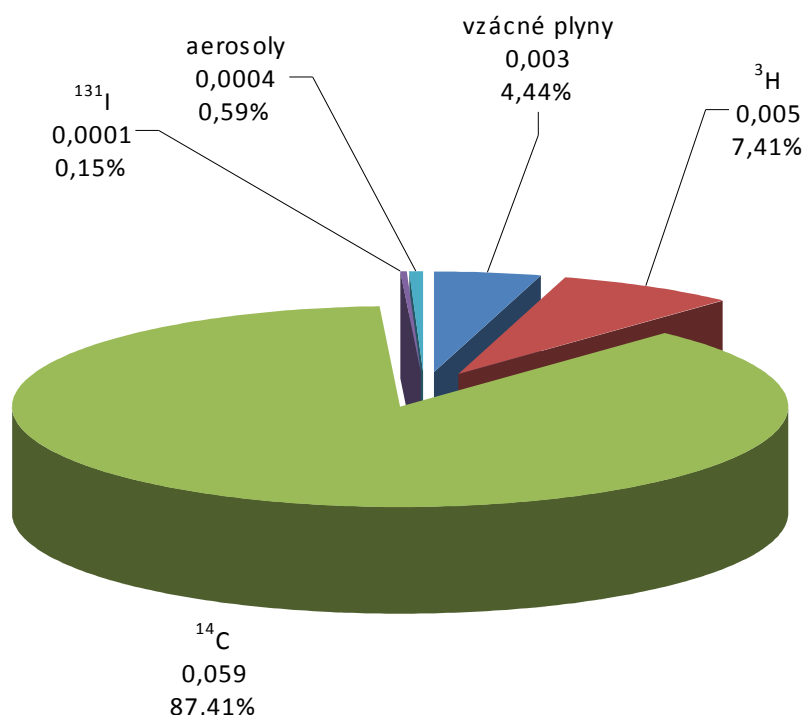
Graf č. 5: Příspěvky radionuklidů k efektivní dávce normalizované na jednotku elektrické energie za rok v závislosti na typu reaktoru.



Graf č. 6: Příspěvek  $^{14}\text{C}$  k efektivní dávce normalizované na jednotku elektrické energie za rok v závislosti na typu reaktoru.



Graf č. 7: Průměrné efektivní dávky [man Sv/(GW/rok)] z ročního příjmu radionuklidů uvolňovaných do ovzduší z PWR reaktorů z let 1990 – 1994.

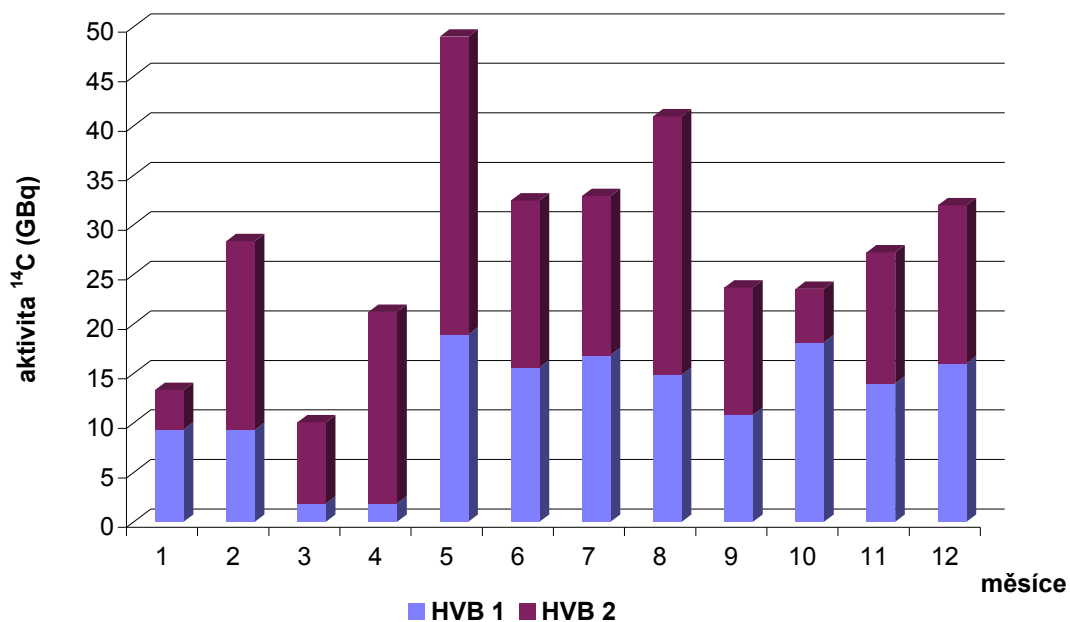


Tabulka č. 2: Aktivita  $^{14}\text{C}$  (průměr z let 1999 – 2003) v plynných výpustech některých elektráren s WWER a PWR reaktory v Evropě.

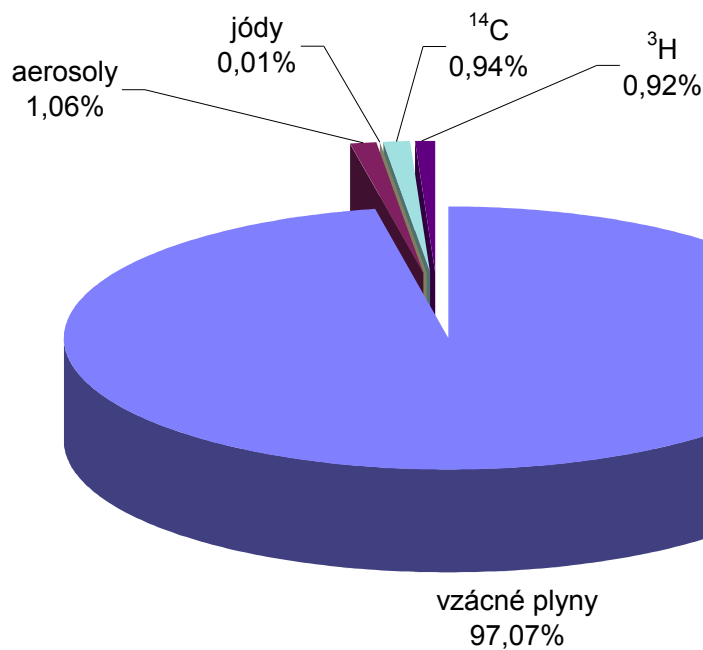
Země	Název	Typ reaktoru	Výkon (MWe)	Zahájení komerčního provozu	Aktivita $^{14}\text{C}$ (GBq/rok)
Finsko	Loviisa	WWER	2x488	1977,1978	320
Německo	Neckarwestheim 1	WWER	785	1976	226
	Neckarwestheim 2	WWER	1269	1989	280
	Obrigheim	WWER	340	1969	62
	Biblis A	PWR	1146	1975	275
	Biblis B	PWR	1240	1977	254
	Brokdorf	PWR	1326	1986	330
	Emsland	PWR	1290	1988	452
	Grafenrheinfeld	PWR	1275	1982	158
	Grohnde	PWR	1325	1985	346
	Isar 2	PWR	1330	1988	408
	Philippsburg 2	PWR	1336	1985	216
		Stade	PWR	630	1972 (2003 ukončení provozu)
	Unterweser	PWR	1255	1979	46
Španělsko	Trillo	PWR	999	1988	52
	Ringhals 2	PWR	875	1975	659 (průměr z let 2002 - 2003)
Nizozemí	Borselle	PWR	452	1973	107
Velká Británie	Sizewell B	PWR	1188	1995	171

### 4.3 Monitorování $^{14}\text{C}$ z plyných výпустí Jaderné elektrárny Temelín.

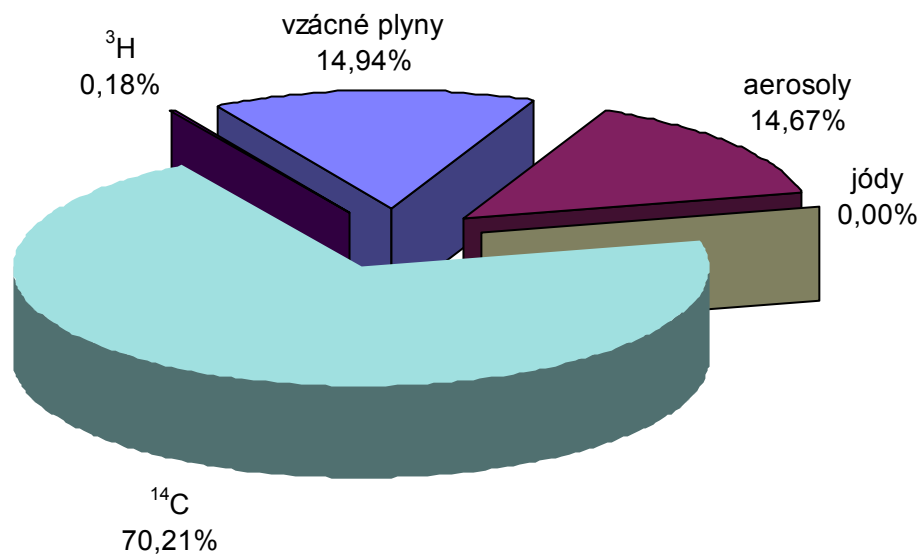
Graf č. 8: Aktivita  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínkách obou hlavních výrobních bloků ETE v roce 2003.



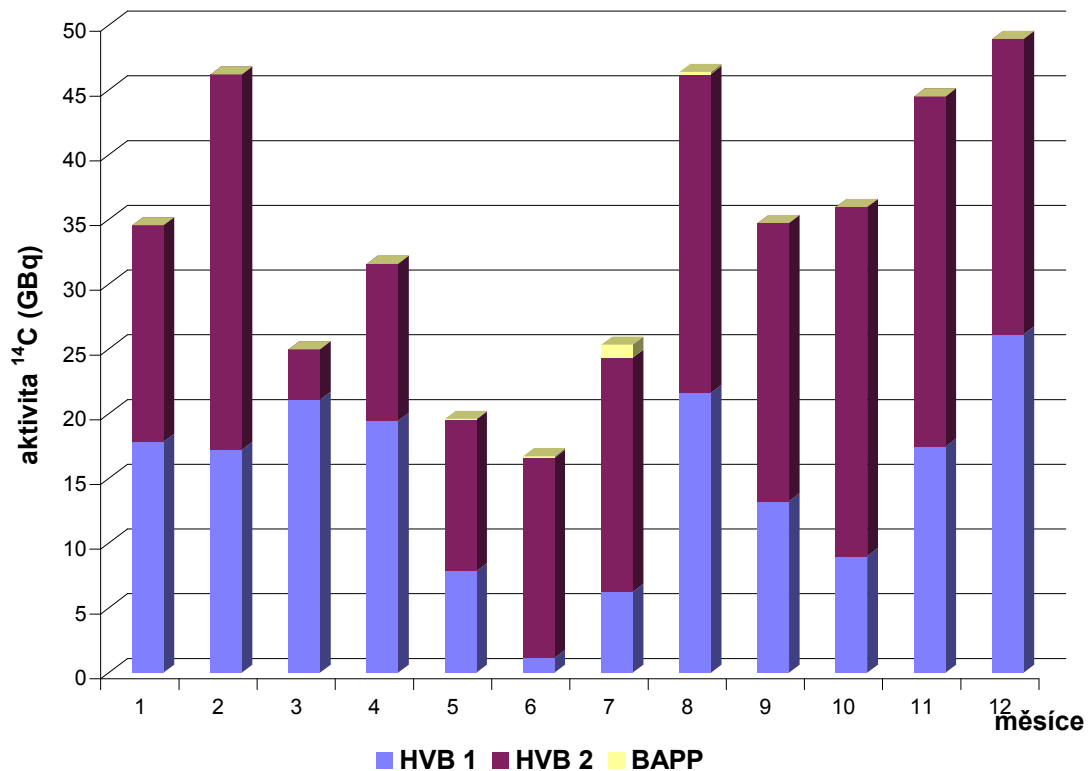
Graf č. 9: Příspěvek radionuklidů k celkové vypuštěné aktivitě z plyných výпустí ETE za rok 2003.



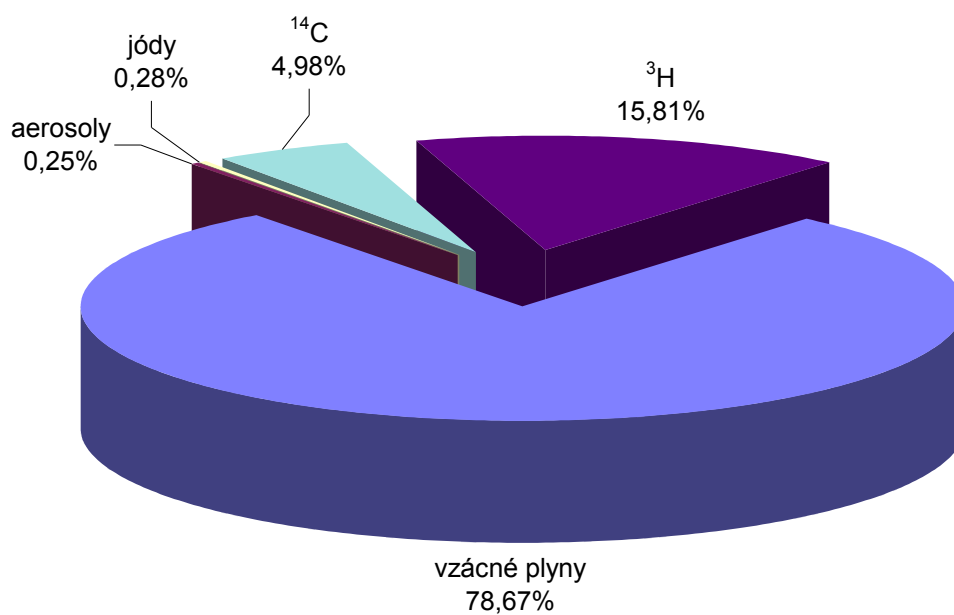
Graf č. 10: Příspěvek radionuklidů k E(50) z plyných výpustí ETE za rok 2003.



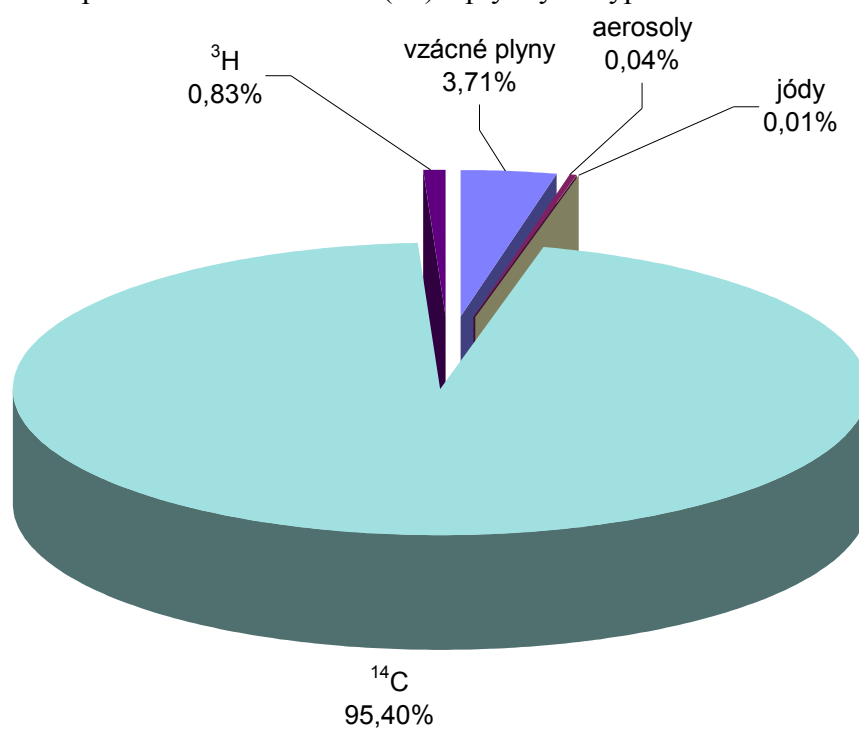
Graf č. 11: Aktivita  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínech obou hlavních výrobních bloků a budově aktivních a pomocných provozů ETE v roce 2004.



Graf č. 12: Příspěvek radionuklidů k celkové vypuštěné aktivitě z plyných výpustí ETE za rok 2004.

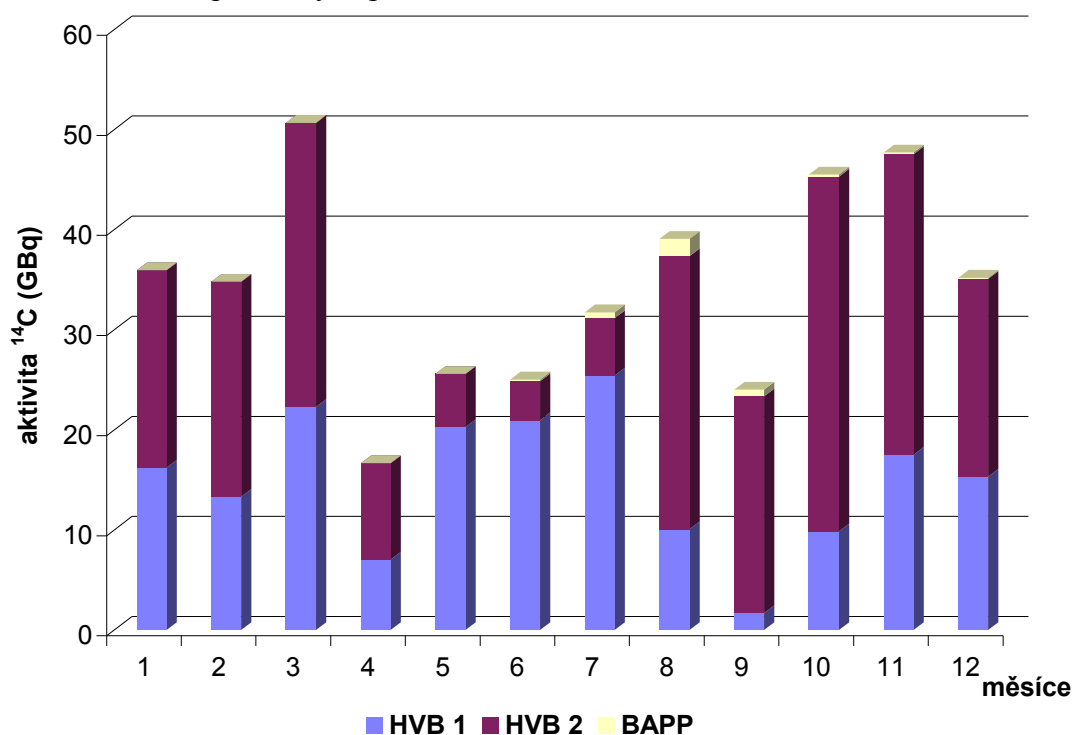


Graf č. 13: Příspěvek radionuklidů k E(50) z plyných výpustí ETE za rok 2004.

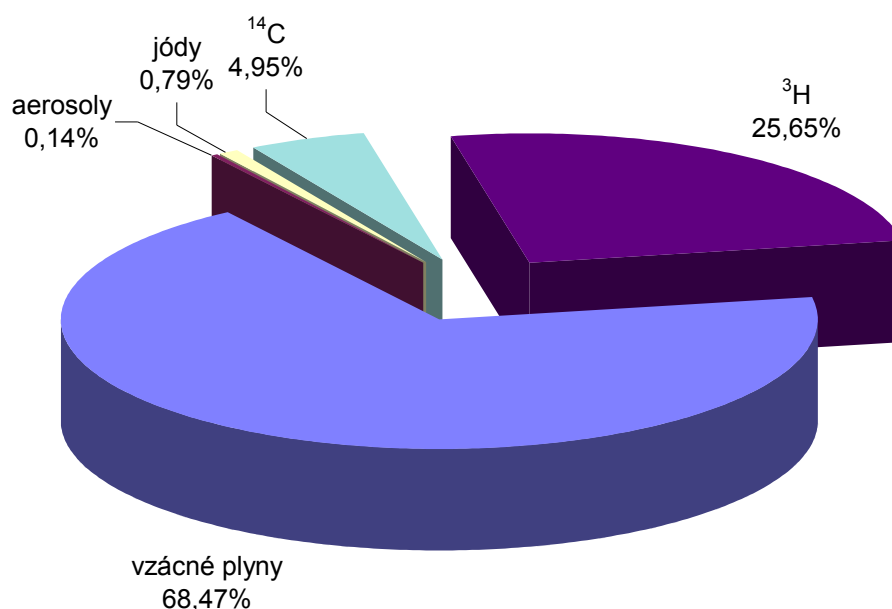




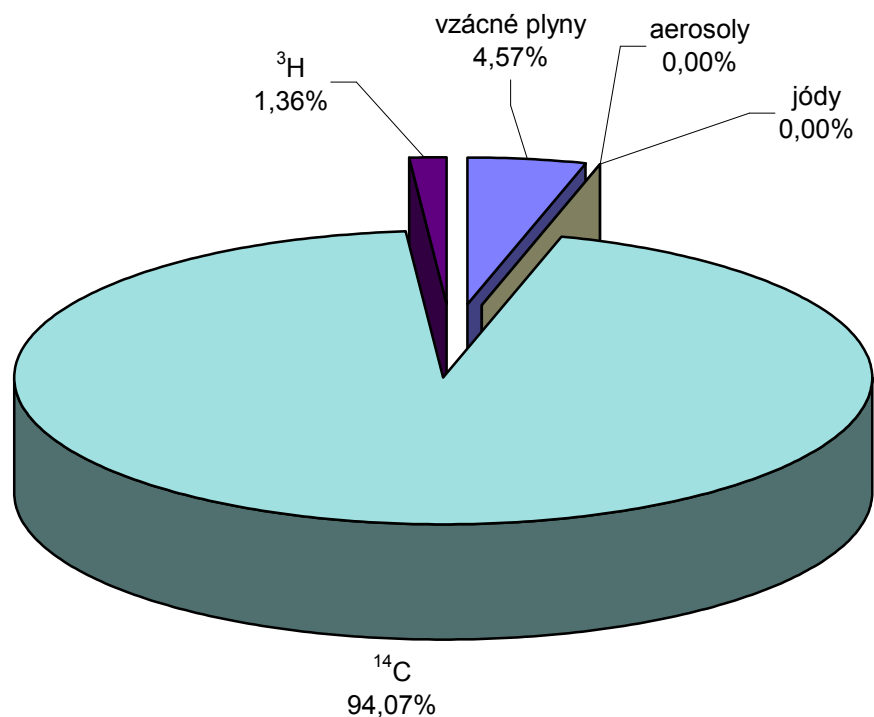
Graf č. 14: Aktivita  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínech obou hlavních výrobních bloků a budově aktivních a pomocných provozů ETE v roce 2005.



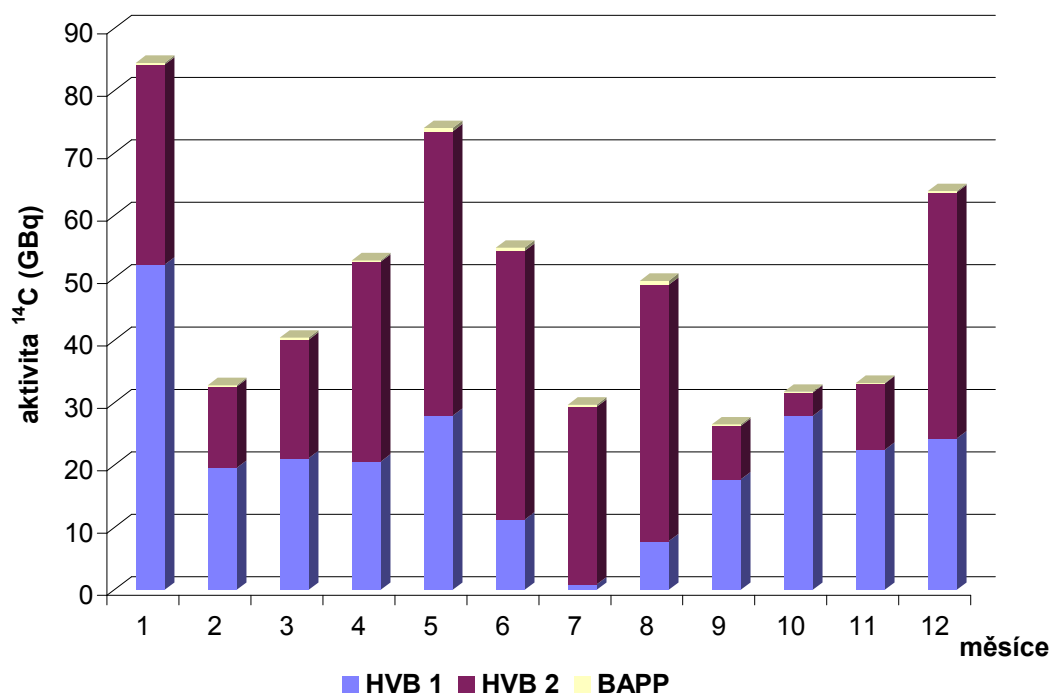
Graf č. 15: Příspěvek radionuklidů k celkové vypuštěné aktivitě z plyných výpustí ETE za rok 2005.



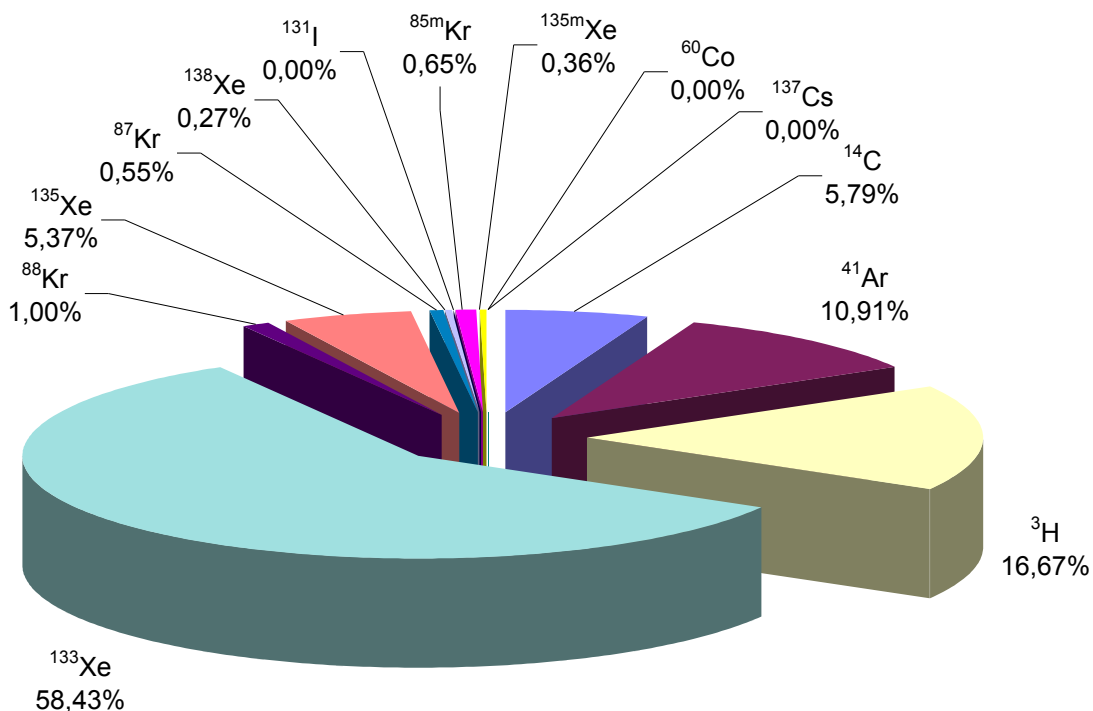
Graf č. 16: Příspěvek radionuklidů k E(50) z plynných výpustí ETE za rok 2005.



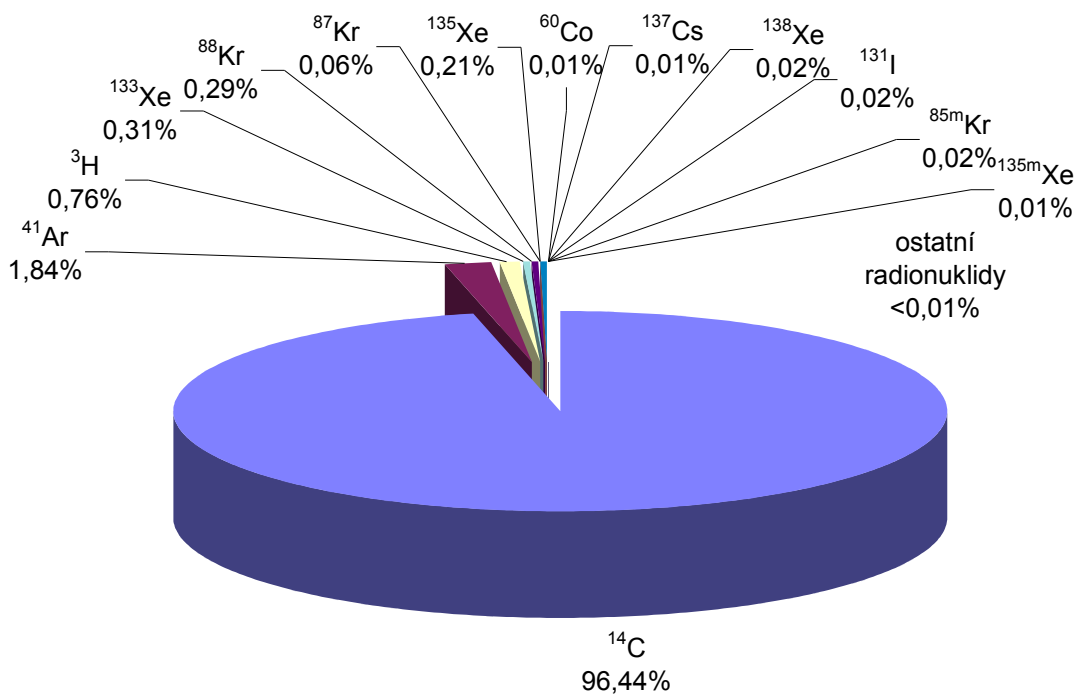
Graf č. 17: Aktivita  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínech obou hlavních výrobních bloků a budově aktivních a pomocných provozů ETE v roce 2006.



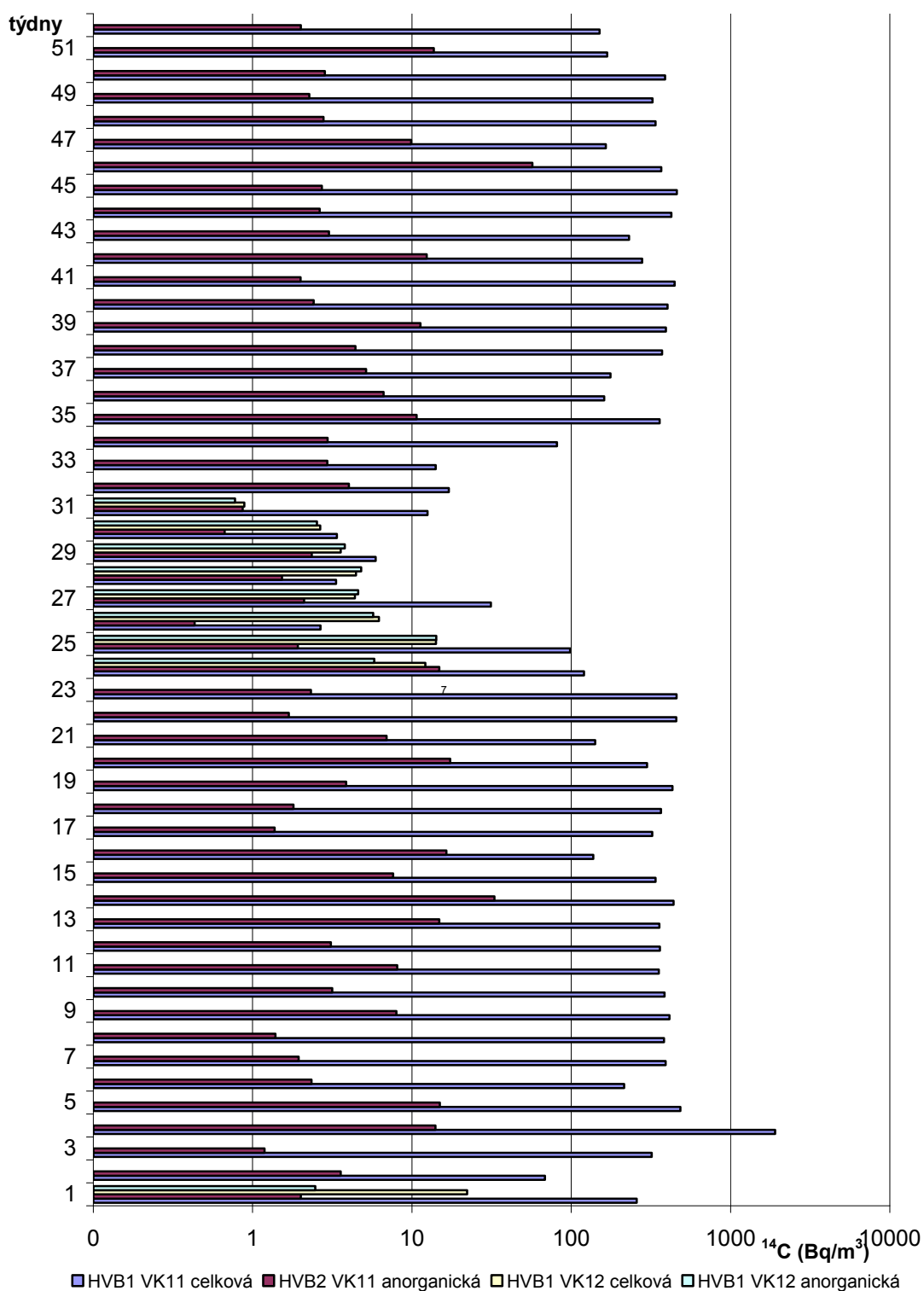
Graf č. 18: Příspěvek radionuklidů k celkové vypuštěné aktivitě z plyných výpustí ETE za rok 2006.



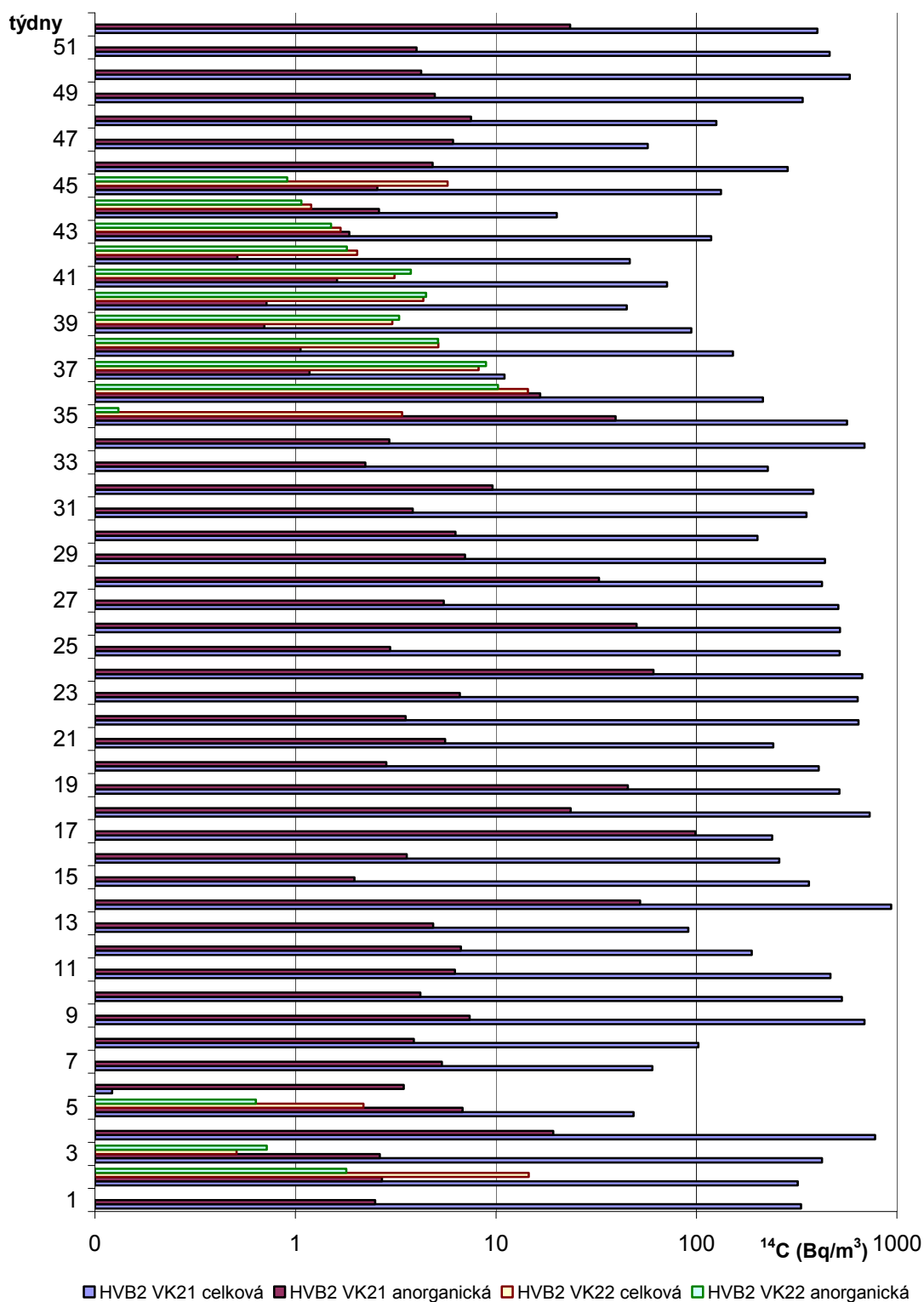
Graf č. 19: Příspěvek radionuklidů k E(50) z plyných výpustí ETE za rok 2006.



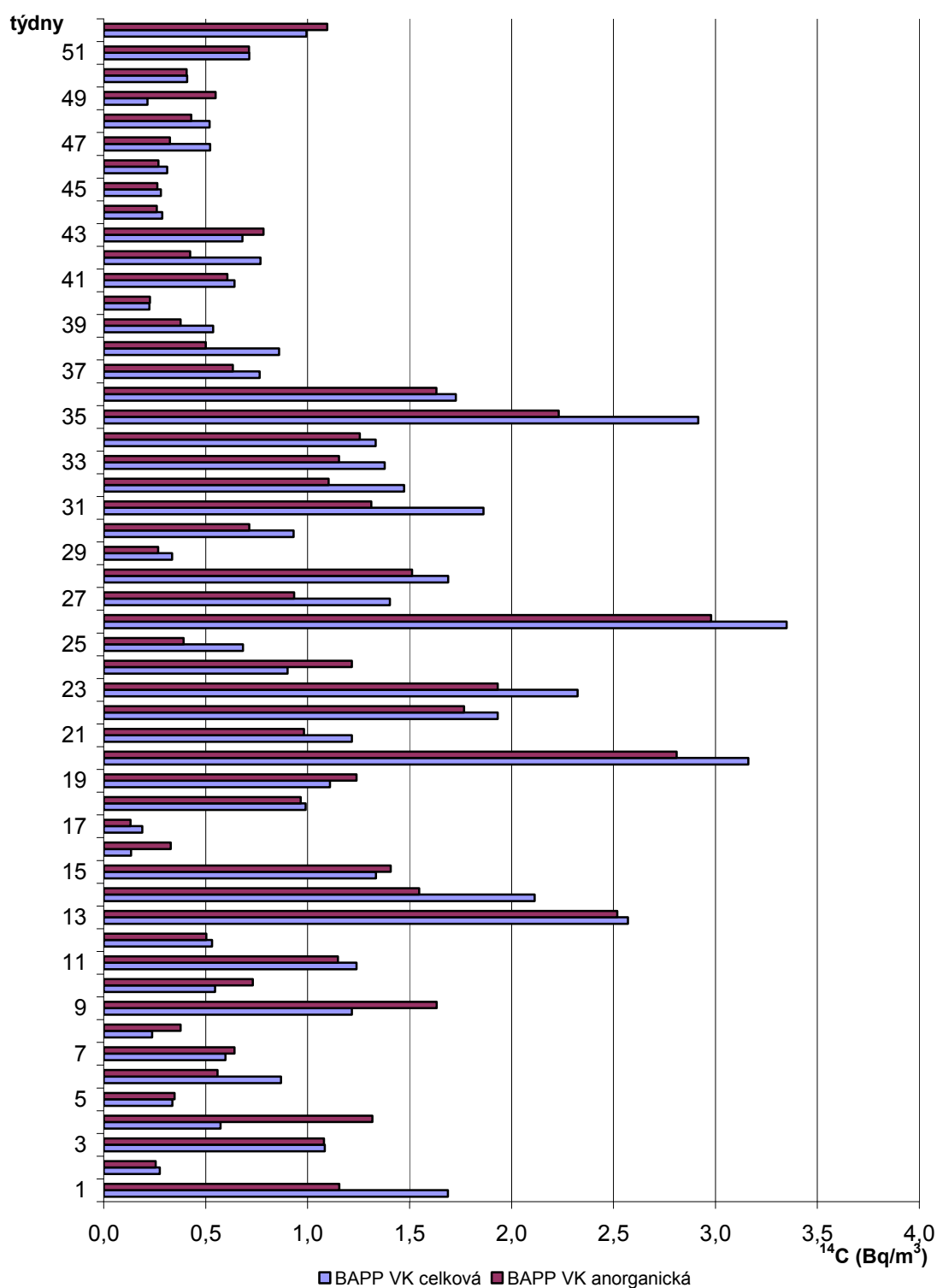
Graf č. 20: Objemová aktivita celkové a anorganické formy  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínkách HVB1 ETE v roce 2006.



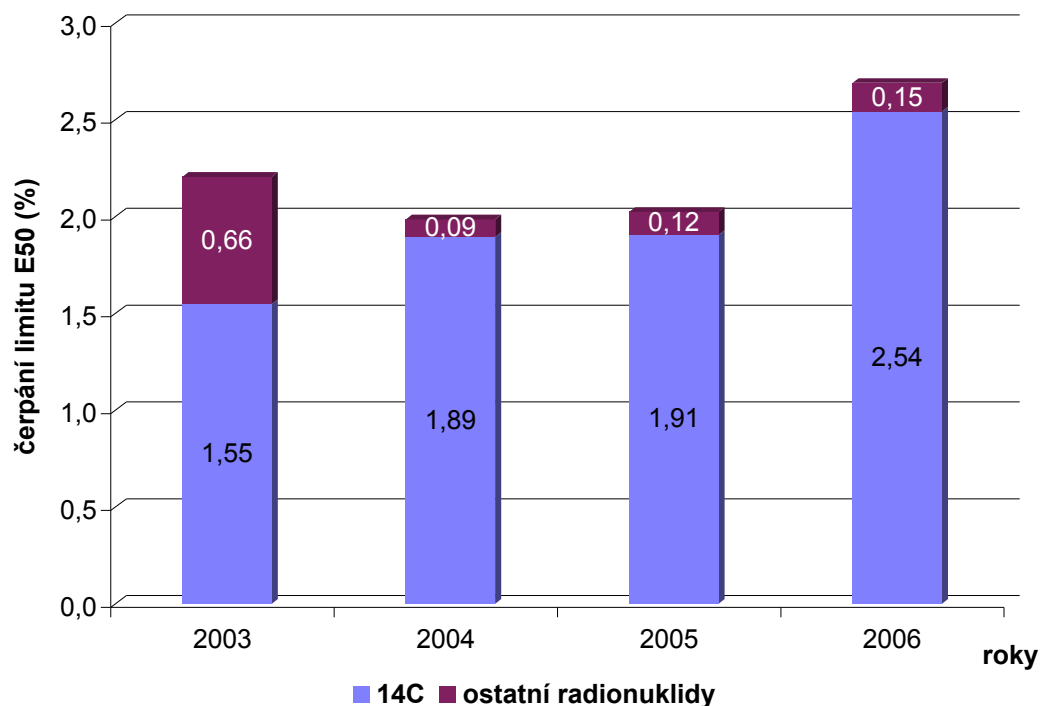
Graf č. 21: Objemová aktivita celkové a anorganické formy  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínkách HVB2 ETE v roce 2006.



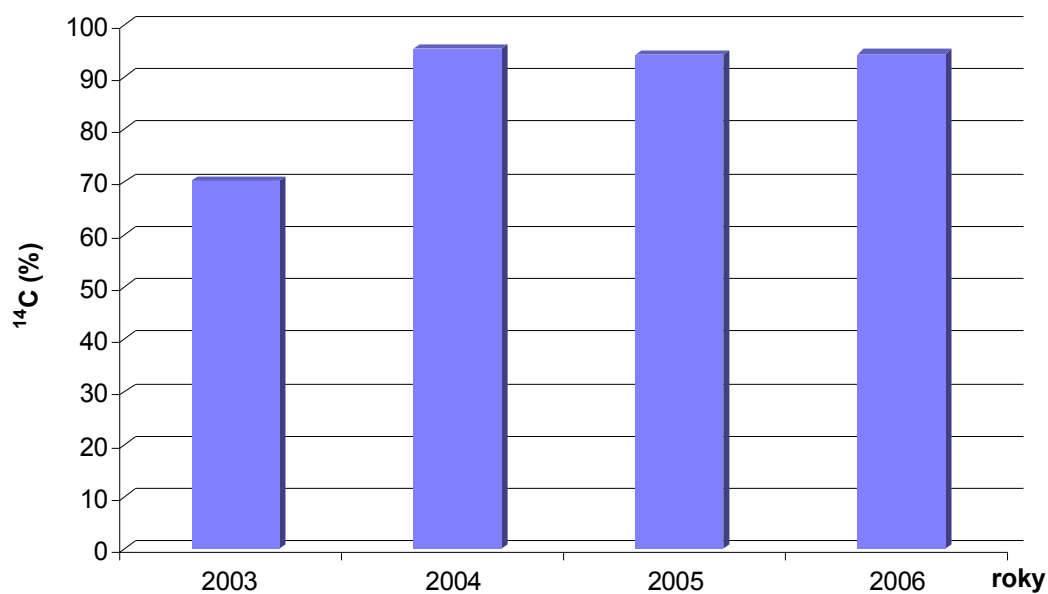
Graf č. 22: Objemová aktivita celkové a anorganické formy  $^{14}\text{C}$  ve ventilačních komínkách BAPP ETE v roce 2006.



Graf č. 23: Procentuální čerpání autorizovaného limitu E50 z plyných výpustí z let 2003 – 2006.



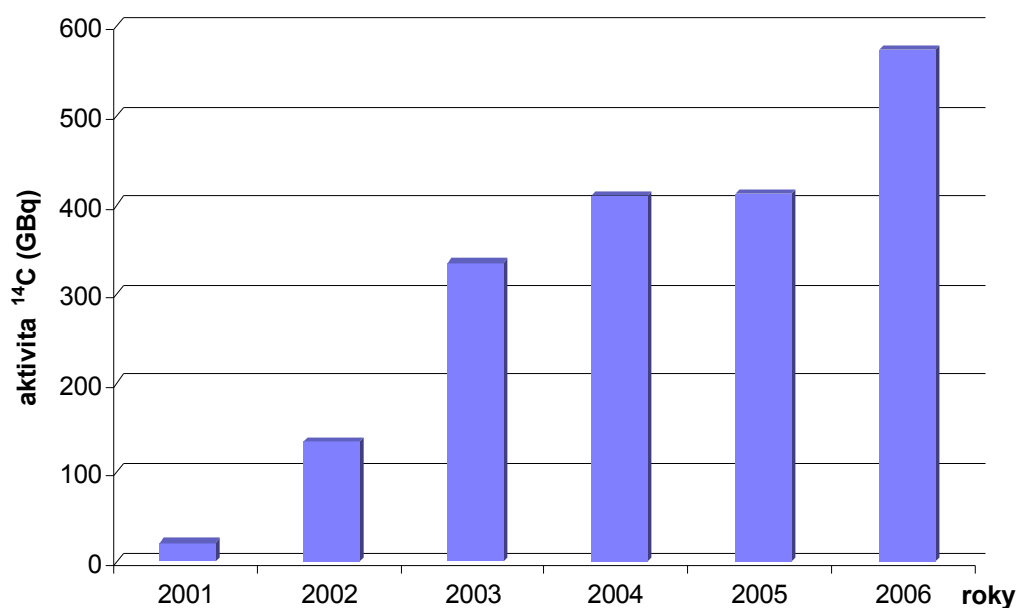
Graf č. 24: Podíl <sup>14</sup>C na čerpání autorizovaného limitu E50 z plyných výpustí z let 2003 – 2006.



Tabulka č. 3: Příspěvek  $^{14}\text{C}$  v jednotlivých ventilačních komínkách ETE k čerpání autorizovaného limitu E(50) v letech 2002 – 2006 vyjádřený v procentech.

Rok	BAPP VK	HVB1 VK11	HVB1 VK12	HVB2 VK21	HVB2 VK22	CELKEM
2002	0,0000	0,1006	0,0002	0,0023	0,0003	0,1034
2003	0,0001	0,6503	0,0310	0,8650	0,0013	1,5477
2004	0,0063	0,7915	0,0326	1,0602	0,0033	1,8939
2005	0,0168	0,8296	0,0029	1,0512	0,0046	1,9051
2006	0,0177	1,1383	0,0041	1,4295	0,0046	2,5420

Graf č. 25: Aktivita  $^{14}\text{C}$  (suma  $\text{CO}_2$  a spalitelných forem) uvolněná v plynných výpus-  
tech ETE v průběhu let 2001 – 2006.





#### 4.4 Měření $^{14}\text{C}$ v okolí Jaderné elektrárny Temelín v roce 2003

Tabulka č. 4: Výsledky měření vzorků dřevin odebraných v okolí ETE 30. 7. 2003.

Místo odběru	Vzorek	Vzdálenost od ETE (km)	$\Delta^{14}\text{C}$ (‰)
Hřbitov u Temelína	Bez černý	1,2	49,4
Ohyb silnice – Temelínec	Bez černý	1,4	50,1
Remízek, 800 m od obce Temelín	Bez černý	1,2	55,8
U remízku, 800 m od obce Temelín	Pšenice setá	1,2	74,7
Trafostanice – odbočení ze spojky ETE – Křtěnov	Bez černý	0,7	53,8
Polní cesta u Bohunic	Bez černý	2,3	73,1
Průměr			59,5

Tabulka č. 5: Výsledky měření vzorků dřevin odebraných v okolí ETE 21. a 25. 10. 2003.

Místo odběru	Vzorek	Vzdálenost od ETE (km)	$\Delta^{14}\text{C}$ (‰)
Hřbitov u Temelína	Bez černý	1,2	67,8
Polní cesta u Bohunic	Bez černý	2,3	65,7
Remízek, 800 m od obce Temelín	Jasan ztepilý	1,2	73,1
Okraj pole, blízko křižovatky Temelín – Týn – Bohunice	Topol osika	1,4	55,6
Staveniště u spojky k ETE od Křtěncova	Topol osika	1,1	54,4
Trafostanice – odbočení ze spojky ETE – Křtěnov	Bez černý	0,7	66,0
Okraj lesa, U Sýkorů	Bez černý	2,4	84,4
Remízek u odbočky „QUAIL“	Bez černý	1,8	75,6
Ohyb silnice – Temelínec	Dub letní	1,8	57,2
Kočín, směrem k trafostanici	Dub letní	2,3	51,3
Průměr			65,1

## 5 Diskuze

### 5.1 Zabezpečení monitorování radiouhlíku na JE Temelín

Uvádění radionuklidů do životního prostředí upravuje zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) v platném znění. Obecná pravidla a podmínky uvádění radionuklidů do životního prostředí jsou stanoveny vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění. Uvádění radionuklidů do životního prostředí je možné pouze na základě, v rozsahu a za podmínek stanovených v povolení SÚJB k uvádění radionuklidů do životního prostředí. Řízené vypouštění radionuklidů do životního prostředí je možné pouze za splnění podmínky, že u příslušné kritické skupiny obyvatelstva nepřekročí součet roční efektivní dávky a ročního úvazku efektivní dávky v důsledku plynných výpustí do ovzduší hodnotu 200  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$ .

Pro jadernou elektrárnu Temelín však Státní úřad pro jadernou bezpečnost stanovil pro plynné výpusti ještě nižší hodnotu ve formě tzv. autorizovaného limitu pro jednotlivce z kritické skupiny obyvatelstva a to ve výši 40  $\mu\text{Sv}/\text{rok}$  pro provoz obou hlavních výrobních bloků. Tento autorizovaný limit se vztahuje na součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření a je obsažen v Limitách a podmínkách pro provoz HVB1 a HVB2.

Limity a podmínky jsou základním provozním předpisem Jaderné elektrárny Temelín, na jehož základě jsou prováděny provozní kontroly za účelem ověřování, že jsou tyto limity dodržovány a nepřekračovány. Rozhodnutí SÚJB k povolení uvolňování radionuklidů do ovzduší dále obsahuje i hodnoty převodních koeficientů (konverzních faktorů)  $h$ , které slouží pro převod aktivity radionuklidů vypouštěných do ovzduší na součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek na 50 let ( $E_{50}$ ) z vnitřního ozáření dospělého jednotlivce z kritické skupiny obyvatelstva. Tyto převodní koeficienty jsou používány pro kontrolu a regulaci plynných výpustí v průběhu kalendářního roku. Aktuálně platná hodnota regulačního konverzního faktoru pro  $^{14}\text{C}$  je  $h_{50} = 1,93\text{E}-19 \text{ Sv}/\text{Bq}$ .

Monitorování  $^{14}\text{C}$  na Jaderné elektrárně Temelín bylo zahájeno v roce 2001. Rozsah monitorování  $^{14}\text{C}$  na Jaderné elektrárně Temelín je stanoven Programem monitorování výпустí z ETE, který byl schválen SÚJB. Monitorování  $^{14}\text{C}$  tedy za provozu probíhá ve vnitřních ventilačních komínech obou HVB a ventilačním komíně Budovy aktivních a pomocných provozů. Monitorování vnějších ventilačních komínů HVB se provádí pouze za odstávky reaktoru a při havarijních nebo pohavarijních stavech. Příprava, zpracování a měření vzorků a jejich vyhodnocení probíhá v Laboratoři radiační kontroly okolí v Českých Budějovicích. Roční bilancování se provádí pomocí výpočetního programu RDETE, který je autorizován SÚJB.

V programu monitorování okolí ETE schváleném SÚJB není zahrnuto monitorování  $^{14}\text{C}$  v okolí Jaderné elektrárny Temelín a monitorování  $^{14}\text{C}$  ve složkách životního prostředí. Tato monitorování jsou zajišťována v rámci činnosti Radiační monitorovací sítě Státním ústavem radiační ochrany ve spolupráci s Ústavem jaderné fyziky AV ČR, kde je monitorována aktivita atmosférického  $^{14}\text{CO}_2$  v Praze a na vybraných lokalitách v České republice. Toto monitorování bylo rovněž zahájeno v roce 2001. V blízkém okolí Jaderné elektrárny Temelín jsou zajištěny odběry vzorků bioty. Tyto vzorky jsou zpracovávány, proměřovány a vyhodnocovány na Oddělení dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky AV ČR v Praze metodou kapalinové scintilační spektrometrie (LSC).

## **5.2 Zhodnocení dosavadních výsledků sledování $^{14}\text{C}$**

Pro analýzu plyných výпустí JE Temelín se zaměřením na  $^{14}\text{C}$  byla použita data od roku 2003 do roku 2006 z měření Laboratoře radiační kontroly okolí v Českých Budějovicích.

Nejvíce  $^{14}\text{C}$  vzniká za provozu reaktoru zejména neutronovou aktivací  $^{14}\text{N}$  díky vysokému účinnému průřezu reakce. Je proto vysoce pravděpodobné, že neutron vzniklý při štěpné reakci může interagovat s jádrem atomu dusíku, který je přítomen v chladivu jako nečistota. Omezení množství vznikajícího radiouhlíku je tedy možné pouze dodržováním vysoké chemické čistoty chladiva reaktoru a přísnými kontrolami těsnosti palivových článků. Radiouhlík vzniká také v palivu samotném, ale ten není při provozu reaktoru uvolňován do chladiva a tudíž není přítomen plyných výпустech

ETE. Za odstávky reaktoru uhlík 14 nevzniká. Aktivita  $^{14}\text{C}$  v plynných výpustech tedy závisí na provozním režimu reaktoru. Dále je zde určitá závislost na stavu vyhoření paliva a technických a technologických postupech odplyňování primárního okruhu. Jak je patrné z grafu č. 22, průměrné týdenní objemové aktivity  $^{14}\text{C}$  ve ventilačním komíně Budovy aktivních a pomocných provozů se pohybují řádově v jednotkách  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , zatímco ve ventilačních komínech HVB se objemové aktivity pohybují řádově ve stovkách  $\text{Bq}/\text{m}^3$  (viz grafy 20 a 21). Příspěvek z ventilačního komína BAPP k celkové uvolněné aktivitě radiouhlíku je relativně malý.

Největší aktivita plynných výpustí ETE měřená ve ventilačních komínech připadá na vzácné plyny, zejména  $^{133}\text{Xe}$ . Tyto plyny však mají většinou relativně krátký poločas rozpadu a nízký konverzní faktor. Jako druhý největší příspěvek k celkové vypuštěné aktivitě je aktivita  $^3\text{H}$ .  $^{14}\text{C}$  je co do uvolněné aktivity na třetím místě. V roce 2003 to bylo 0,94%. Tato hodnota je nižší než v následujících letech a souvisí zejména s provozním režimem reaktorů, které se v roce 2003 nacházely ve fázi zkušebního provozu. V roce 2004 již procentuální hodnota příspěvku  $^{14}\text{C}$  činila 4,98%, v roce 2005 4,95% a v roce 2006 5,79%. Tyto hodnoty jsou poměrně stabilní a odpovídají provoznímu režimu reaktorů.

Uhlík 14 je nejdůležitějším radionuklidem uvolňovaným v plynných výpustech ETE, respektive tlakových lehkovodních reaktorů z hlediska příspěvku k úvazku efektivní dávky. To je způsobeno zejména díky poměrně vysokému konverznímu faktoru. V roce 2003 byl příspěvek  $^{14}\text{C}$  k čerpanému úvazku efektivní dávky 70,21%, v roce 2004 to bylo 95,4%, v roce 2005 94,07% a v roce 2006 96,44%.

Čerpání autorizovaného limitu úvazku efektivní dávky  $E(50) = 40 \mu\text{Sv}/\text{rok}$  bylo v letech 2003 – 2005 poměrně stabilní a pohybovalo se okolo 2%, jak vyplývá z tabulky č. 3. V roce 2006 je pozorovatelné navýšení na 2,6%. Toto navýšení čerpání  $E(50)$  je způsobeno zejména vyššími hodnotami aktivity uvolněnými v plynných výpustech v roce 2006.

V roce 2003 nebyla ani v jednom případě překročena hodnota vyšetřovací úrovně  $^{14}\text{C}$  ve výši 10 GBq/týden.

V roce 2004 byla v únoru zjištěna zvýšená objemová aktivita  $^{14}\text{C}$  na HVB2, která byla způsobena uvolněním nakumulované aktivity v primárním okruhu po roztěsnění primárního okruhu.

V roce 2005 došlo k překročení vyšetřovací úrovně 10 GBq/týden celkem ve čtyřech případech. Ke všem překročením došlo ve vnitřním ventilačním komíně HVB2, tj. za provozu bloku.

V roce 2006 došlo k překročení vyšetřovací úrovně celkem v 10 případech. Ve 3. týdnu došlo k výraznému překročení vyšetřovací úrovně ve vnitřním ventilačním komíně HVB1, kdy byla celková uvolněná aktivita  $^{14}\text{C}$  32,99 GBq/týden. Všechny ostatní případy překročení vyšetřovací úrovně byly naměřeny ve vnitřním ventilačním komíně HVB2.

Všechna překročení vyšetřovací úrovně vedla k šetření s cílem zjistit, jaké technologické operace související s plynnými výpustmi byly v posledním období prováděny.

Během provozu Jaderné elektrárny Temelín nedošlo k překročení autorizovaného limitu úvazku efektivní dávky  $E(50) = 40 \mu\text{Sv/rok}$ .

### **5.3 Porovnání plynných výpustí $^{14}\text{C}$ na JE Temelín s výpustmi na různých JE ve světě**

Monitorování plynných výpustí  $^{14}\text{C}$  se liší podle požadavků platné legislativy daného státu a schváleného programu monitorování. Kvůli nejednotnosti monitorování je proto obtížnější přesné srovnání výsledků těchto monitorování. Například do celkových plynných výpustí ETE jsou v případě nepřekročení minimální detekovatelné aktivity započítávány poloviční hodnoty minimální detekovatelné aktivity. V případě německých jaderných elektráren je při nepřekročení hodnoty minimální detekovatelné aktivity započtena hodnota nula. V případě francouzských jaderných elektráren není ve ventilačních komínech monitorována aktivita  $^{14}\text{C}$  vůbec. Zde je monitorován pouze radiouhlík obsažený v atmosféře a ve složkách životního prostředí v okolí jaderných elektráren.

V porovnání s jinými typy reaktorů jsou aktivity uvolňovaného  $^{14}\text{C}$  z PWR (WWER) reaktorů malé, jak je patrné z grafů č. 5 a 6. V tabulce č. 2 jsou uvedeny prů-

měrné aktivity  $^{14}\text{C}$  z let 1999 – 2003 některých evropských jaderných elektráren s PWR a WWER reaktory. Průměrná celkově uvolněná aktivita  $^{14}\text{C}$  z plyných výpustí jednoho bloku ETE z let komerčního provozu (2004 – 2006) byla přibližně 216,36 GBq. Tato průměrná hodnota se jeví jako přibližně srovnatelná s evropskými jadernými reaktory PWR a WWER podobného výkonu uvedenými v tabulce č. 2.

#### ***5.4 Trendy aktivit atmosférického $^{14}\text{C}$ pozorované v evropských monitorovacích stanicích***

Aktivita atmosférického  $^{14}\text{C}$  byla silně narušena v důsledku lidské činnosti, zejména v 50. a 60. letech minulého století, kdy proběhlo velké množství atmosférických testů jaderných zbraní (graf č. 2), při nichž bylo uvolněno do životního prostředí značné množství radionuklidů. Mezi tyto radionuklidy patří mimo jiné velké množství  $^{14}\text{C}$ , které bylo rozptýleno do atmosféry. Nárůst aktivity  $^{14}\text{CO}_2$  obsaženého v atmosféře je dobře patrný v grafu č. 1 z monitorování v rakouské alpské stanici Vermunt. Po roce 1963, začalo pozvolna klesat množství  $^{14}\text{CO}_2$  obsaženého v atmosféře s poločasem 6 let. Tato hodnota je výrazně nižší s porovnáním  $T_{1/2}$  radiouhlíku, který je 5730 let. Je to způsobeno zejména sedimentováním radiouhlíku do povrchových mořských vod a jeho ukládáním do hlubokomořských sedimentů jak bylo popsáno v kapitole 1.6.

Klesající trend trvá do dnešních dnů i přes masivní nárůst využívání jaderné energie, jak je vidět z monitorování atmosférického  $^{14}\text{CO}_2$  v německé monitorovací stanici Schauinsland a švýcarské monitorovací stanici Jungfrauoch, která je umístěna ve výšce kolem 3000 m n. m. v Bernských Alpách. Dnešní hodnoty  $^{14}\text{C}$  se pohybují okolo +50‰  $^{14}\Delta\text{C}$  v porovnání s radionuklidovým standardem z roku 1890. Tabulka č. 1 ve výsledcích uvádí světový inventář  $^{14}\text{C}$  a rychlost uvolňování tohoto radionuklidu do životního prostředí, z níž lze pozorovat jen velmi nepatrný vliv jaderně energetických zařízení na celosvětový inventář  $^{14}\text{C}$ .

Aktivita atmosférického  $^{14}\text{C}$  se mění i v průběhu roku vlivem označovaným jako Suessův efekt, který byl popsán v kapitole 1.7.3. Vlivem Suessova efektu dochází k naředování atmosférického  $^{14}\text{C}$  neaktivním uhlíkem, který pochází zejména ze spalování fosilních paliv. Suessův efekt je dobře patrný z grafů č. 3 a 4, kde je podrobněji

zpracováno měření ve stanici Jungfraujoch. Minimální roční hodnoty aktivity  $^{14}\Delta\text{C}$  lze pozorovat v březnu a maxima v srpnu. Tato závislost je částečně způsobena sezónní výměnou vzdušných mas a částečně fázemi vegetačního období bioty. Zejména v zimním období narůstá množství fosilního uhlíku obsaženého v atmosféře vlivem nízkých teplot, spalování uhlí, inverzním charakterem počasí a dalšími zejména atmosférickými vlivy. V letních měsících naopak převládá rychlejší výměna vzdušných mas,  $^{14}\text{C}$  není tolik naředován fosilním uhlíkem a většina rostlin je ve vegetačním období, kdy fotosyntézou zachytává atmosférický  $\text{CO}_2$ .

### ***5.5 Distribuce chemických forem C-14 do životního prostředí v okolí ETE***

Distribuce do životního prostředí v okolí jaderné elektrárny Temelín závisí zejména na chemické formě plyné výpusti  $^{14}\text{C}$ . Dále je zde výrazná závislost na výšce ventilačního komína, převládajícím směru větru a dalších, zejména meteorologických vlivech. Tento radionuklid je z plyných výpustí ETE uvolňován do životního prostředí ve formě organických uhlovodíků (převládá metan) a ve formě oxidu uhličitýho. Ve ventilačních komínech obou HVB a BAPP je umístěno odběrové zařízení, umožňující sledovat anorganickou formu  $^{14}\text{C}$  ve formě oxidu uhličitýho a celkovou formu  $^{14}\text{C}$  tedy spalitelné uhlovodíky a oxid uhličitý. Odběrové zařízení bylo podrobněji popsáno v kapitole 1.14.2. Obecně lze říci, že u reaktorů typu PWR (WWER) převládají spalitelné organické formy  $^{14}\text{C}$ . Grafy č. 20, 21, kde jsou uvedeny objemové aktivity  $^{14}\text{C}$  celkové a anorganické formy plyných výpustí ETE v roce 2006 ukazují, že zastoupení anorganické složky výpusti  $^{14}\text{C}$  ve formě  $^{14}\text{CO}_2$  je výrazně nižší, než organické formy. V roce 2006 představovala anorganická složka výpusti  $^{14}\text{C}$  3,29%.

Vypouštěný metan je relativně stabilní a téměř nedochází k jeho lokálnímu zachytu v blízkém okolí elektrárny. Po několika desítkách dnů oxiduje na oxid uhličitý, jehož koncentrace je již značně naředěna. Oxid uhličitý může být zachytáván v blízkém okolí Jaderné elektrárny Temelín zejména při průběhu meteorologických jevů, jako je: atmosférická inverze, bezvětří, déšť, mlha a podobně. Během vegetačního období může být část  $^{14}\text{CO}_2$  fotosynteticky asimilována vegetací a dále přenášena v rámci potravního řetězce.



### **5.6 Zabezpečení odběru vzorků pro stanovování $^{14}\text{C}$ v životním prostředí**

Odběry vzorků životního prostředí v okolí ETE vycházejí z klasického modelu větrné růžice. Modelace vychází z údajů pro varné a těžkovodní reaktory, kde je aktivita  $^{14}\text{C}$  v biotě lehkou měřitelná, protože prokazatelně převyšuje aktivitu přirozeného radiouhlíku. Meteorologické studie jsou zpracovávány Českým hydrometeorologickým ústavem. Odběry vzorků bioty v okolí ETE probíhají ve směru převládajícího větru.

Obdobně jako u zahraničních měření aktivity  $^{14}\text{C}$  v okolí jaderných elektráren jsou i v okolí ETE pro měření  $^{14}\text{C}$  odebírány zejména listy opadavých dřevin. Je dáвана přednost listům Bezu černého, který patří mezi všeobecně rozšířené dřeviny s mělkým kořenovým systémem. Je zde také malá pravděpodobnost záměny.

Volba lokace odběru vzorku je také velmi důležitá. Kromě úrovně plynných výpustí  $^{14}\text{C}$  a meteorologických podmínek, mají vliv na záchyt  $^{14}\text{C}$  v biomase také vhodné podmínky pro tvorbu biomasy. Vhodnými podmínkami se rozumí dostatek vláhy, sluneční svit a podobně. Lokální míra Suessova efektu je dalším důležitým faktorem ovlivňujícím měření aktivity  $^{14}\text{C}$  v biotě. Proto je nevhodné odebírat vzorky pro měření například v blízkosti frekventované silnice. V případě jaderné elektrárny Temelín je takovou komunikací poměrně frekventovaná silnice druhé třídy číslo 105 vedoucí z Českých Budějovic do Týna nad Vltavou.

Výsledky odběrů listů opadavých dřevin v okolí ETE v letech 2002 a 2003 (viz tabulky č. 3 a 4) prokázaly, že aktivity  $^{14}\text{C}$  v okolí ETE výrazně nevybočují z rozmezí hodnot pozorovaných v pozadových referenčních oblastech. S přihlédnutím k nejistotám pozorování a přirozeným variacím aktivit  $^{14}\text{C}$  v životním prostředí není prokazatelné navýšení úrovně aktivit  $^{14}\text{C}$  v okolí Jaderné elektrárny Temelín. Toto tvrzení je v souladu s pozorováním aktivit  $^{14}\text{C}$  v okolí jaderných elektráren s PWR reaktory v zahraničí.

### **5.7 Posouzení jednotlivých metod stanovování $^{14}\text{C}$ v životním prostředí**

Monitorování atmosférického  $^{14}\text{C}$  ve formě  $^{14}\text{CO}_2$  je velmi přesnou a citlivou metodou s vysokou vypovídací schopností, kterou lze využívat v průběhu celého roku. Mezi hlavní nevýhody však patří, že vzorky lze odebírat pouze na malém počtu míst.

Vybudování většího počtu stabilních měřících stanic v okolí ETE, vybavených přístroji zaměřených na měření atmosférického  $^{14}\text{C}$  by bylo velmi nákladné a výsledky měření by byly specifické pouze pro místo odběru bez možnosti flexibilně reagovat na aktuální meteorologickou situaci v průběhu roku.

Při monitorování  $^{14}\text{C}$  v biotě je hlavní výhodou možnost odebrat velké množství biomasy z velkého počtu míst vybraných podle meteorologických studií. Tato metoda je méně nákladná, ale její hlavní nevýhodou je omezení pouze na část vegetačního období. Může také docházet k větším variacím aktivity  $^{14}\text{C}$  v biotě, které souvisí například s rychlostí vzniku biomasy. V přírodě neexistují dvě naprosto totožná místa, která by se dala označit jako referenční pro odběr vzorků biomasy. Proto je nutné důkladně označit vzorky datem a přesným místem odběru. S výhodou lze odebírat vzorky víceletých bylin, které mají dlouhé vegetační období. Tyto rostliny obvykle tvoří takzvaná patra, z nichž v nejhornějším je obsažena aktivita  $^{14}\text{C}$  v daném roce. Měřit  $^{14}\text{C}$  lze také zpětně z letokruhů dřevin.

Odběr zemědělských produktů (maso, mléčné výrobky) pro měření  $^{14}\text{C}$  je další možnou metodou měření vlivu plynných výпустí  $^{14}\text{C}$  na okolí. Tyto vzorky však obvykle pocházejí z větší vzdálenosti od jaderné elektrárny a její vliv je zde menší.

Při měření vzorků bioty konvenčními metodami je třeba připravit vzorky o hmotnosti několika gramů. Při měření vzorku metodou urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS) postačuje zpravidla množství o tři řády menší, tedy pouze několik mg, přičemž nejistoty stanovení  $^{14}\text{C}$  jsou srovnatelné.

### ***5.8 Distribuce $^{14}\text{C}$ v lidském organismu***

Uhlík 14 se dostává do těla ingescí a inhalací. Tento izotop je metabolizován stejným způsobem jako ostatní izotopy uhlíku. Nejvíce uhlíku 14 je obsaženo v jídle. 99% dávky obdržené od radiouhlíku je způsobeno příjmem ingescí. Uhlík rychle prochází z trávicího traktu do krve. Míra příjmu uhlíku 14 inhalací je silně závislá na jeho chemické formě. Nejběžnější chemickou formou antropogenního radiouhlíku je  $^{14}\text{CO}_2$ . Uhlík 14 ve formě oxidu uhličitého je téměř všechen absorbován do krevního řečiště, příjem z oxidu uhelnatého je asi 40%. Inhalovaný radiouhlík ve formě metanu je absor-

bován do krevního řečiště jen asi z 1%. Všechnu uhlík 14 absorbovaný do krevního řečiště je rychle distribuován do všech orgánů a tkání. Uhlík 14 je eliminován z těla s biologickým poločasem 40 dní. Míra absorpce a biologický poločas eliminace se mění s věkem. U dětí bývá poločas eliminace kratší. Protože je  $^{14}\text{C}$  čistý slabý beta zářič, představuje možné ohrožení zdraví pouze v případě, je-li přijat do těla. Emitovaný beta elektron má nízkou energii a proto nemůže pronikat hluboko do tkání nebo daleko ve vzduchu. Zevní kontaminace proto nepředstavuje vážné ohrožení.

Uhlík 14 má rovněž schopnost procházet placentární bariérou. Může tak dojít k buněčnému poškození ionizujícím zářením a potenciálnímu vzniku rakovinného bujení.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit úroveň monitorování radioizotopu uhlíku – 14 v plynných výpustech Jaderné elektrárny Temelín a jeho distribuci v životním prostředí v okolí. Povinnost zajistit monitorování uhlíku – 14 vyplývá z platné legislativy České republiky konkretizované do formy programu monitorování výpustí schváleného Státním úřadem pro jadernou bezpečnost. Toto monitorování je zajištěno zařízením pro proporcionální odebírání vzorků vzdušiny, umístěného ve ventilačních komínech obou hlavních výrobních bloků a ventilačním komíně Budovy aktivních a pomocných provozů. Kontinuálně odebírané vzorky jsou po týdenní expozici odesílány ke zpracování, měření a vyhodnocení do Laboratoře radiační kontroly okolí.

Na základě analýzy získaných hodnot a informací jsem dospěl k závěru, že hodnoty aktivit  $^{14}\text{C}$  uvolňovaných v rámci plynných výpustí z jaderné elektrárny Temelín sice nejvýraznější měrou přispívají k čerpání autorizovaného limitu plynných výpustí stanoveného Státním úřadem pro jadernou bezpečnost, na druhé straně však zdaleka nevedou k hodnotám úvazků efektivních dávek jedinců kritické skupiny obyvatelstva, které by schválený autorizovaný limit a podmínky pro uvádění radionuklidů do životního prostředí mohly ohrozit.

Měření a vyhodnocování výsledků plynných výpustí zabezpečovaná provozovatelem se jeví, že splňují všechny požadavky kladené schválenými postupy a platnou legislativou. Možnost negativního dopadu plynných výpustí a zejména  $^{14}\text{C}$  na zdraví občanů žijících v okolí jaderné elektrárny Temelín je minimalizována na rozumně dosažitelnou úroveň.

Kontrolní monitorování složek životního prostředí je zajišťováno Státním ústavem radiační ochrany ve spolupráci s Ústavem jaderné fyziky AV ČR. Z hlediska vlivu plynných výpustí jaderné elektrárny Temelín obsahujících radiouhlík, bylo zjištěno, že aktivity  $^{14}\text{C}$  v okolí jaderné elektrárny Temelín výrazně nevybočují z rozmezí hodnot pozorovaných v pozadových referenčních oblastech. S přihlédnutím k nejistotám pozorování a přirozeným variacím aktivit  $^{14}\text{C}$  v životním prostředí není navýšení úrovně aktivit  $^{14}\text{C}$  v okolí Jaderné elektrárny Temelín prokazatelné.

V porovnání se zahraničními jadernými elektrárnami lze říci, že monitorování radiouhlíku v plynných výpustech jaderné elektrárny Temelín je zajištěno na dostatečně vysoké úrovni.

## 7 Seznam použité literatury

1. ČEZ, a. s. *Program monitorování okolí ETE*. ČEZ, a. s., Metodika, evidenční číslo 203 rev00, 2006, 61 s. – interní dokument ETE.
2. ČEZ, a. s. *Program monitorování výpustí z ETE*. ČEZ, a. s., Metodika, evidenční číslo 455 rev02, 2005, 38 s. – interní dokument ETE.
3. DAVIS, W. *Carbon 14 production in nuclear reactors*, Management of Low-Level Radioactive Waste, 1977.
4. EPRI *Characterisation of C-14 generated by the nuclear power industry*. Electrical Power Research Institute, Report EPRI TR-105715, Palo Alto, California, USA, 1995.
5. IAEA *Nuclear Power Reactors In The World*. Reference Data Series No. 2, Vienna 2006.  
ISSN 1011 – 2642
6. KLENER, V. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vydání Praha: SÚJB, 2000.  
619 s.  
ISBN 80 – 238 – 3703 – 6
7. KUNA, P.; NAVRÁTIL, L. *Klinická radiobiologie*. 1. vydání Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n. p., 1990, 154 s.  
ISSN 80 – 7066 – 192 – 5
8. LEVIN, I.; HESSHAIMER, V. *Radiocarbon – A unique tracer of global carbon cycle dynamics*. Radiocarbon. Heidelberg, Germany, 2000, Vol. 42, Nr. 1, s. 49 – 80.

9. LEVIN, I. KROMER, B. *The tropospheric  $^{14}\text{CO}_2$  level in mid-latitudes of the northern hemisphere (1959 – 2003)*. Radiocarbon, Heidelberg, Germany, 2004, Vol. 46, Nr. 3, s. 1261 – 1272.
10. LRKO *Stanovení objemové aktivity C-14 laboratorní kapalinovou scintilační spektrometrií záření beta – vzorky plynných výpustí*, Standardní zkušební postup, 2005, SZP6 33 s. – interní dokument LRKO.
11. MAJER, V. *Základy jaderné chemie*. 2. přepracované vydání Bratislava: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1981, 612 s.  
ISBN 04 – 618 – 81
12. MEIJER, A., J.; PLICHT Van Der, J. *Comparing long-term atmospheric  $^{14}\text{C}$  and  $^3\text{H}$  records near Groningen, The Netherlands with Fruholmen, Norway and Izana, Canary Islands  $^{14}\text{C}$  stations*. Radiocarbon. Groningen, The Netherlands, 1995, Vol. 37, Nr. 1, s. 39 – 50
13. NAVRÁTIL, L.; ROSINA, J. *Lékařská biofyzika*. 1. vyd. Praha: MANUS, 2000, 357 s.  
ISBN 80 – 902318 – 5 – 3
14. POSPÍCHAL, J. *Radiochemical methods used on NPP Temelin for preparation of environmental and effluent samples*. 2006 – prezentace PowerPoint.
15. POVINEC, M.; CHUDÝ, M.; ŠIVO, A. *Anthropogenic radiocarbon – past, present, and future*. Radiocarbon. Bratislava, 1986, Vol. 28, No. 2A, s. 668 – 672.
16. RAČEK, J. *Jaderné elektrárny*. 1. vydání Brno: VUT v Brně, 2002.  
ISBN 80 – 214 – 2158 – 4

17. RICHARDSON, R., B.; DUNFORD, D., W. *Review of the ICRP tritium and  $^{14}\text{C}$  internal dosimetry models and their implementation in the GENMOD-PC code.* Health Physics. Ontario, Canada, 2001, Vol. 81, Nr. 3, s. 289 – 301.
18. ROUSSEL – DEBET, S.; GONTIER, G.; SICLET, F.; FOURNIER, M. *Distribution of carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants. Journal of environmental radioactivity.* 2006, No. 87, s. 246 – 259
19. STRICHT Van Der, S.; JANSSENS, A. *Radioactive effluents from nuclear power stations and nuclear reprocessing sites in the European Union, 1999 – 2003.* Radiation protection 143, 2005. 116 s.  
ISBN 92 – 79 – 00888 – 9
20. STUIVER, M.; POLACH, H., A. *Discussion: Reporting of  $^{14}\text{C}$  data.* Radiocarbon. 1977, Vol. 19, No. 3, s. 355 – 363.
21. SVĚTLÍK, I.; DRESLEROVÁ, D.; LIMBURSKÝ, P.; TOMÁŠKOVÁ, L. *Radiouhlík v přírodě a jeho využití pro datovací účely.* Archeologické rozhledy, č. LIX, 2007, s. 80 – 94.
22. SVĚTLÍK, I.; MICHÁLEK, V.; TOMEŠ, M. et al. *Sledování C-14 v okolí jaderných elektráren.* 2004 – prezentace PowerPoint.
23. SVĚTLÍK, I.; MIRCHI, R.; MICHÁLEK, V.; TOMÁŠKOVÁ, L. *Výsledky monitorování atmosférického  $^{14}\text{CO}_2$  a jejich porovnání s údaji jiných monitorovacích stanic v Evropě.* 2005 – prezentace PowerPoint.
24. SVĚTLÍK, I.; TOMÁŠKOVÁ, L. *Stanovení  $^{14}\text{C}$  v roztoku primárního chladiva primárního okruhu.* Praha, Výzkumná zpráva ODZ ÚJF AV ČR 559/05, 14 s.



25. UNSCEAR 2000 *Report of the United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly*. Annex A – C, 2000.
26. <http://www.sujb.cz> – Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 4. dubna 2007, 18:45:34.
27. <http://www.suro.cz> – Státní ústav radiační ochrany, 22. dubna 2007, 18:03:18.
28. <http://www.cez.cz> – Energetická skupina ČEZ, a. s., 18. dubna 2007, 19:56:52.
29. <http://www.ujf.cas.cz/index.php> - Ústav jaderné fyziky AV ČR, 14. dubna 2007, 12:48:44.
30. <http://www.radiocarbon.org> – Radiocarbon, An International Journal Of Cosmogenic Isotope Research, 23. března 2007, 13:55:14.
31. <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon> - Carbon, Wikipedia, the free encyclopedia, 19. března 2007, 14:45:06.
32. [http://earthobservatory.nasa.gov/Library/CarbonCycle/carbon\\_cycle.html](http://earthobservatory.nasa.gov/Library/CarbonCycle/carbon_cycle.html) - The Carbon Cycle – NASA, Earth Observatory, 29. března 2005, 16:34:34.
33. [http://web.ges.gla.ac.uk/~dfabel/AMS/AMS\\_schematic.html](http://web.ges.gla.ac.uk/~dfabel/AMS/AMS_schematic.html) - Accelerator Mass spectrometry, University of Glasgow, 15. května 2007, 20:53:28.
34. <http://www.insc.anl.gov/> - International Nuclear Safety Center, 24. dubna 2006, 10:57:48.

35. <http://c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=dating.html> – Radiocarbon Web Info, University of Oxford, 16. dubna 2007, 14:21:30.
36. <http://www.iaea.org> – International Atomic Energy Agency, 18. dubna 2007, 19:29:26.
37. <http://www.unscear.org> – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 26. března 2007, 18:39:18.
38. <http://www.epri.com> – Electric Power Research Institute, 23. dubna 2007, 13:44:08.
39. <http://www.hfsjg.ch/> - International Foundation High Altitude Research Stations Jungfrauoch and Gornergrat, 4. dubna 2007, 19:41:10.
40. [http://www.emmc.chonnam.ac.kr/EQImages/CRW\\_4793\\_1.jpg](http://www.emmc.chonnam.ac.kr/EQImages/CRW_4793_1.jpg) - Chonnam National University, 16. dubna 2007, 21:15:34.

## **8 Klíčová slova**

$^{14}\text{C}$

Jaderná elektrárna Temelín

plynné výpusti

monitorování výpustí

monitorování okolí

radiační ochrana

## **9 Přílohy**

### ***Příloha č. 1***

#### Seznam použitých zkratk:

BAPP – budova aktivních a pomocných provozů

ETE – elektrárna Temelín

HVB – hlavní výrobní blok

HVB1 VK11 – vnitřní ventilační komín prvního hlavního výrobního bloku

HVB1 VK12 – vnější ventilační komín prvního hlavního výrobního bloku

HVB2 VK21 – vnitřní ventilační komín druhého hlavního výrobního bloku

HVB2 VK22 – vnější ventilační komín druhého hlavního výrobního bloku

JE – jaderná elektrárna

LRKO – Laboratoř radiační kontroly okolí

MMKO – Monitorovací místo kontroly ovzduší

MMKV – Monitorovací místo kontaminace vody

SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SZÚ – Státní zdravotní ústav

UNSCEAR – United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation

VK – ventilační komín

***Příloha č. 2***

*Letecký pohled na areál jaderné elektrárny Temelín.*



***Příloha č. 3***

*Ventilační komín budovy aktivních a pomocných provozů (uprostřed), ventilační komíny hlavních výrobních bloků (vzadu vpravo).*



***Příloha č. 4***

*Pohled na švýcarskou alpskou monitorovací stanici Jungfrauoch.*

