

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH**

Zdravotně sociální fakulta

**Stanovení objemové aktivity nuklidů záření gama  
ve vzorcích životního prostředí a posouzení vlivu  
provozu Jaderné elektrárny Temelín na  
výslednou aktivitu**

Diplomová práce

AUTOR PRÁCE: **Bc. Lenka Davidová**

VEDOUCÍ PRÁCE: **Ing. Jiří Pospíchal**

V Českých Budějovicích dne 22. května 2007

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Stanovení objemové aktivity nuklidů záření gama ve vzorcích životního prostředí a posouzení vlivu provozu Jaderné elektrárny Temelín na výslednou aktivitu jsem vypracovala 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

.....

***Poděkování:***

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Pospíchalovi za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Děkuji Bc. Danielu Janovskému za pomoc a rady při statistickém zpracování

## **Abstract**

### Determination of volume activity of gamma nuclide in environmental samples and assessment of influence of NPP Temelin on actual measured activity

In this thesis I target the assesment of a volume activity of gamma ray nuclides in the environment and the examination of the operation the Nuclear Power Station (NPS) Temelín in term of emitting the gamma ray nuclides and their environmental impact.

There were collected data of several sorts of environmental samples for statistical analysis. The activity of gamma ray nuclides released by nuclear power station to the environment after its initiation was compared to the activity of gamma ray nuclides contained it the environment before the initiation of the NPS. It was chosen five exemplary samples - aerosoles, sediments, milk, soil and surface moisture, which have been scanning in years 1995 and 2005.

In these samples, that have sufficient amount of data (sorts of milk, aerosoles and surface moisture) so the statistical analysis was relevant, it was proved, by the non-parametrical Mann-Whitney statistical testing, that there were no statistical difference between the data before and after the initiation of the NPS. The environmental impact wasn't demonstrated.

In these samples, that haven't sufficient amount of data (sediments and soil), they were also tested (parametrical t. test) and it was proved that there were no statistical difference between the data before and after the initiation of the NPS. Because of very low quality of the testing, we have to use the box plot to ascertain the influence of NPS. In these plots the environmental impact wasn't demonstrated as well.

## Seznam použitých zkratk

BAPP	budova aktivních pomocných provozů
ČEZ	České energetické závody
ETE	elektrárna Temelín
HVB	hlavní výrobní blok
JE	Jaderná elektrárna
LRKO	laboratoř radiační kontroly okolí
MDA	Minimální detekovatelná aktivita
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
ZS	Základní soubor

## OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	SOUČASNÝ STAV .....	11
2.1	Záření gama.....	13
2.2	Zdroje ionizujícího záření .....	13
2.2.1	Jaderný reaktor .....	13
2.2.2	Přírodní radioaktivita .....	18
2.2.3	Zdroje ionizujícího záření v jaderné elektrárně .....	33
2.3	Stanovení objemové aktivity nuklidů záření gama .....	37
2.3.1	Legislativní požadavky .....	37
2.3.2	Program monitorování .....	39
2.3.3	Odběr vzorků.....	40
2.4	Gamaspektrometrická analýza .....	52
2.5	Jaderná elektrárna Temelín .....	55
2.6	Veličiny a jednotky .....	58
2.6.1	Aktivita.....	58
2.6.2	Měrná aktivita .....	59
2.6.3	Plošná aktivita .....	59
2.6.4	Objemová aktivita .....	59
3	CÍL PRÁCE .....	60
4	HYPOTÉZA .....	61
5	METODIKA .....	62
5.1	Sběr a zpracování dat .....	62
5.2	Popisná statistika.....	62
5.3	Grafická analýza dat.....	64
5.3.1	Kvantilový graf .....	64
5.3.2	Histogram .....	65
5.3.3	Krabicový graf .....	66
5.4	Testování statistických hypotéz .....	66

5.4.1	Pomůcka pro výběr vhodného statistického testu .....	68
5.5	Charakteristika použitých testů .....	69
5.5.1	Test normality .....	69
5.5.2	F-test (dvouvýběrový test rozptylů) .....	70
5.5.3	Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů (pro nezávislé výběry).....	72
5.5.4	Mannův-Whitneyův test.....	74
5.6	Výběr vzorků životního prostředí .....	75
5.6.1	Povrchové vody.....	76
5.6.2	Sedimenty.....	76
5.6.3	Aerosoly .....	77
5.6.4	Neobdělávané půdy.....	78
5.6.5	Mléko .....	80
6	VÝSLEDKY .....	81
6.1	Exploratorní analýza .....	81
6.1.1	Povrchové vody.....	81
6.1.2	Sedimenty.....	85
6.1.3	Aerosoly .....	89
6.1.4	Mléko .....	92
7	DISKUZE .....	102
8	ZÁVĚR.....	106
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	107
9.1	Seznam legislativy související s radiační ochranou .....	110
10	KLÍČOVÁ SLOVA.....	112
11	PŘÍLOHY .....	113

## 1 Úvod

Jaderná elektrárna Temelín byla kontroverzní stavbou již od samého počátku výstavby. Budí pozornost veřejnosti, ochránců životního prostředí, ekonomů i politiků z České republiky i ze zahraničí. Někteří v ní vidí velkého dodavatele levné a čisté energie, přísun peněz do státní pokladny, pomoc a úlevu oblastem znečištěným provozem tepelných elektráren, jiní zase příčinu velké nezaměstnanosti, megalomanskou přeinvestovanou stavbu, skvrnu na kráse jižních Čech a především skrytou kontaminaci prostředí a hrozbu ozáření obyvatelstva při jaderné havárii.

Ve své práci bych chtěla přispět svým dílem k posouzení, zda mají pravdu zahraniční aktivisté, kteří nás téměř dennodenně svými blokádami hraničních přechodů seznamují se svým nesouhlasem s provozem elektrárny a s katastrofickými scénáři, či novináři a média, kteří šíří téměř poplašné zprávy a zbytečně svou pozorností zveličují drobné události, nebo zkušení odborníci.

Zaměřím se na posouzení provozu jaderné elektrárny Temelín z hlediska vypouštění nuklidů záření gama, které mají významný podíl celkového množství vypouštěných radionuklidů, a na jejich vliv na životní prostředí.



## 2 Současný stav

### 2.1 Záření gama

Záření gama je elektromagnetické vlnění o vlnové délce menší než  $10^{-2}$  nm. Lze ho oslabit silnou vrstvou materiálu obsahující jádra těžkých prvků, například olova. Záření  $\gamma$  má výrazný kvantový ráz, takže se projevuje jako proud částic, fotonů  $\gamma$ . Protože fotony nemají elektrický náboj, záření  $\gamma$  se neodchyluje v elektrickém ani magnetickém poli. Silně ionizuje atomy a uvolňuje z látky nabitě částice, a to v důsledku fotoelektrického jevu, Comptonova rozptylu a tvorby elektron-pozitronových párů.(28) Záření  $\gamma$  neexistuje samostatně, ale vždy doprovází jaderné děje, při nichž vzniká záření  $\alpha$  nebo  $\beta$ .

Zdrojem záření  $\gamma$  je jádro izotopu, který právě vznikl přeměnou radionuklidu.(27) Toto jádro má v okamžiku vzniku vyšší energii, je excitované. V krátké době, řádově  $10^{-13}$  s, přechází do základního stavu a tento přechod je spojen s vyzářením fotonu záření  $\gamma$ . Z mechanismu vzniku vyplývá, že záření  $\gamma$  má diskrétní energetické spektrum, jeho energie jsou určeny rozdílem energetických stavů v jádře, mezi nimiž dochází k přechodům. U některých radionuklidů je takový přechod jediný, záření  $\gamma$  je monoenergetické, u jiných jich může být celá řada, je emitováno více energetických čar fotonů. (21)

### 2.2 Zdroje ionizujícího záření

#### 2.2.1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je nejmohutnějším zdrojem ionizujícího záření. Současně je zařízením obsahujícím největší množství různých radionuklidů. Reaktory mohou být energetické, sloužící k výrobě elektřiny nebo tepla, či výzkumné, vyrábějící například

radioizotopy nebo neutrony k technologickým účelům, nebo reaktory školní s velmi malým výkonem. V převážné většině jsou to reaktory využívající zpomalených neutronů, které se pohybují rychlostmi odpovídajícími rychlostem tepelných pohybů atomů v látce. Při těchto rychlostech je pravděpodobnost štěpení velká. Energie zpomalených neutronů leží v rozmezí 0,002 eV až 0,5 eV.

Jako palivo v reaktorech slouží nejčastěji uran 238 obohacený U-235. Jako moderátor, ke zpomalování neutronů, se používá nejčastěji voda, grafit nebo těžká voda. Jako chladivo, sloužící k odvádění tepla z reaktoru, příp. k tvorbě páry k pohonu turbíny, pak voda, těžká voda nebo oxid uhličitý.

Primárním procesem při štěpné reakci je absorpce neutronu atomovým jádrem štěpného materiálu. Jaderná reakce může probíhat několika způsoby, z nichž je pro funkci jaderného reaktoru nejdůležitější štěpení jádra na dva úlomky souměřitelné hmotnosti. Vzniklá jádra jsou v excitovaném stavu. Při reakci se zároveň uvolňují nové neutrony a energie kolem 200 MeV. Z toho cca 83 % se projevuje ve formě kinetické energie štěpných fragmentů, 6 % se spotřebovává na okamžité záření a 11 % na záření vznikající při radioaktivní přeměně štěpných produktů. Celkem bylo zjištěno kolem 200 různých štěpných produktů, jejichž nukleonová čísla leží v rozmezí od 72 do 158. Z toho kolem 60 jsou primární produkty, ostatní vznikají jejich přeměnou.(21) Vzhledem k tendenci jader štěpit se tak, aby štěpné fragmenty ležely blízko magickým jádrům, štěpení, alespoň při nízkých energiích částic, které je vyvolávají, je s největší pravděpodobností nesymetrické.

V návaznosti na prvotní akt štěpení vzniká kromě štěpných fragmentů řada dalších částic. V první řadě je to několik tzv. okamžitých neutronů. Štěpné fragmenty i po emisi okamžitých neutronů mají proti srovnatelným stabilním jádrům stále přebytek neutronů, takže dávají vznik přeměnovým řadám, složeným z několika radionuklidů  $\beta^-$ . V některých případech vede přeměna  $\beta^-$  do tak vysokého vybuzeného stavu dceřinného jádra, že excitační energie postačuje k odtržení neutronu. O těchto neutronech se hovoří jako o zpožděných. Přeměna beta je zdrojem elektronů a antineutron. Mimoto se bezprostředně při štěpení emituje i okamžité záření gama, při záchytu neutronů se vysílá záchytové záření  $\gamma$ . Další fotony doprovázejí přeměnu beta štěpných produktů. Při

interakci neutronů a dalších částic s technologickými médii v reaktoru a s konstrukčními materiály dochází k jejich aktivaci a tím ke vzniku dalších radionuklidů. Zatímco při odstavení reaktoru se zastaví produkce štěpných fragmentů a okamžitého záření gama i neutronů, štěpné produkty i produkty aktivace se uplatňují i poté a mohou se za provozu i mimo něj s technologickými médii šířit do dalších systémů jaderného zařízení vně jaderného reaktoru. I když by štěpné produkty měly zůstat uvnitř obalů palivových článků, dochází k jejich úniku do chladiva difúzí a případnými trhlinkami v obalech. Samotný štěpný materiál obsahuje různé zářiče alfa z přírodních přeměnových řad, zářiči  $\alpha$  jsou také mnohé transurany. Celé jaderné zařízení s reaktorem je tak komplexním zdrojem ionizujícího záření.

Nabitě částice, ať již jde o štěpné fragmenty, částice alfa nebo elektrony, mají krátké dosahy a pohltí se v materiálu a obalech palivových článků, případně jsou-li emitovány z radionuklidů vně palivových článků, pohltí se v konstrukčních materiálech reaktoru, materiálech technologických médií, stěnách primárního okruhu apod. Neutrony a záření gama však vytvářejí značná pole záření v okolí reaktoru, záření  $\gamma$  i v blízkosti celého primárního okruhu, úložišť vyhořelých palivových článků a dalších systémů jaderného zařízení. Nejdůležitější zdroje záření  $\gamma$  v jaderném reaktoru jsou shrnuty v tabulce 1

tabulka 1 Hlavní zdroje záření  $\gamma$  v jaderném reaktoru, převzato z (21)

Záření	Místo vzniku	Energie na 1 štěpení	Časový průběh
Okamžité $\gamma$	jaderné palivo	7,8 MeV	úměrný okamžité hustotě výkonu v palivu v době t
$\gamma$ z radiačního záchytu neutronů	komponenty reaktoru, které jsou v toku tepelných neutronů	2 - 8 MeV	úměrný výkonu reaktoru v čase t
$\gamma$ z nepružného rozptylu neutronů	komponenty reaktoru v toku neutronů s větší energií než první vybuzené stavy jader atomů, z nichž jsou složeny	2 - 8 MeV	úměrný výkonu reaktoru v čase t
$\gamma$ ze štěpných produktů	jaderné palivo	několik MeV	závisí na průběhu hustoty výkonu v palivu po celou dobu, po kterou je palivo v reaktoru
$\gamma$ z radionuklidů vzniklých aktivací	komponenty reaktoru, které jsou v toku neutronů	závisí na vzniklých radionuklidech	závisí na průběhu příkonu fluence neutronů po dobu rovnou několikanásobku střední doby života daného radionuklidu

Celková uvolněná energie při jednom štěpení je kolem 8 MeV. V průměru se tato energie rozdělí na deset fotonů, což znamená, že střední energie fotonového spektra je nižší než 1 MeV. Spektrum je spojitě a rychle klesající s rostoucí energií. Výjimečně v něm však je možné najít i fotony s energií větší než 10 MeV. (21)

I po emisi okamžitých neutronů a okamžitých fotonů zůstává část štěpných produktů v excitovaných izomerních stavech, které přecházejí do základního stavu v době přibližně do  $10^{-3}$  s. Po tomto čase již začne ve spektru emitovaných fotonů převládat záření  $\gamma$  z přeměny štěpných produktů. Energetické spektrum se mění s časem od štěpení, postupně převládají fotony z dlouhodobějších radionuklidů. Protože se však

asi 75 % všech fotonů ze štěpných produktů emituje do  $10^{-3}$  s po štěpení, v reaktoru pracujícím na konstantním výkonu se brzy ustaví přibližně rovnovážné spektrum a štěpné produkty mohou být v prvním přiblížení považovány za konstantní zdroj záření  $\gamma$ . Po odstavení reaktoru postupně převládnou v celkovém spektru fotony z dlouhodobých štěpných produktů.(21)

Kromě fotonového a neutronového záření, které je bezprostředním důsledkem štěpné jaderné reakce, se lze setkat s množstvím sekundárních částic, které jsou důsledkem interakce těchto neutronů a fotonů s atomy různých materiálů. Sem patří především záření  $\gamma$  z radiačního záchyty neutronů. Tyto fotony mají v průměru vyšší energii než okamžité štěpné fotony nebo fotony z přeměny štěpných produktů. Jejich energetická spektra jsou charakteristická pro prvky, na jejichž jádrech dochází k absorpci, takže jejich zobecnění je obtížné. V radiační ochraně jsou nepříjemnou komplikací, jednak pro svou vyšší energii, ale také proto, že vznikají v samotném materiálu stínění.(21)

Podstatně menší význam mají fotony z nepružného rozptylu neutronů. Nepružný rozptyl je prahovým procesem, který může nastat jedině v případě, že excitační energie jádra při rozptylu neutronu je vyšší než energie prvního excitovaného stavu tohoto jádra. Jeho účinný průřez nabývá u většiny prvků významnějších hodnot teprve při energiích neutronů kolem 5 až 10 MeV. Takové neutrony jsou v reaktoru zastoupeny jen málo. Podobně jsou v reaktoru i jeho okolí málo významné i fotoneutrony, tzn. neutrony emitované při reakci  $(\gamma, n)$ . Práh této reakce bývá u většiny běžných jader až kolem 8 MeV. Z toho vyplývá, že se prakticky uplatní jen několik málo nuklidů s nižším prahem. Jako bombardující částice slouží fotony z vysokoenergetického konce okamžitého spektra, z radiačního záchyty a výjimečně i z radionuklidy. Z těch se v reaktorech, ve kterých je v aktivní zóně přítomen kyslík nejvíce uplatňuje  $^{16}\text{O}$  s hlavní energetickou linií fotonů 6,13 MeV. Vzniká z reakce  $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ . Pravděpodobnost vzniku fotoneutronů je dále ovlivněna nízkými účinnými průřezy fotojaderných reakcí. Na druhé straně fotoneutrony mohou vytvářet slabá, ale měřitelná neutronová pole i v dalších technologických zařízeních, jako je primární okruh a jeho okolí. Z hlediska radiační ochrany personálu je většinou tento příspěvek bezvýznamný.(21)

Nejpodstatnějším zdrojem sekundárního ionizujícího záření v jaderných zařízeních je aktivace konstrukčních materiálů a technologických médií. Při průchodu reaktorem je velkými neutronovými toky ozařováno chladivo i moderátor a dochází k jejich aktivaci. Dále se aktivují i všechny nečistoty v těchto médiích přítomné, jako např. korozní produkty. Radionuklidy jsou roznášeny do primárního okruhu, který se stává významným zdrojem záření  $\gamma$ . Nepominutelná je i aktivace konstrukčních materiálů reaktoru v aktivní zóně a jejím blízkém okolí. Konkrétní vzniklé radionuklidy a jejich aktivity závisejí na složení materiálů v toku neutronů, na příkonu fluence a energetickém spektru neutronů i na době ozařování.(21)

### 2.2.2 Přírodní radioaktivita

I když největší pozornost i obavy jsou dnes soustředěny na umělé zdroje záření, zvláště na jaderná zařízení, zdaleka největší ozáření obyvatelstva je způsobeno zdroji přírodními. Přírodnímu ozáření byly organismy vystaveny odnepaměti a do značné míry nevyhnutelně. Toto ozáření je přitom rozloženo nerovnoměrně – některé skupiny osob na Zemi jsou ozářeny dávkami, které o jeden až dva řády převyšují světový průměr a ve výjimečných případech jsou na samé hranici dávek pro deterministické účinky záření. Jde o lokality s vysokými úrovněmi radonu v budovách (např. některé obce ve středočeském plutonu nebo třebečském syenitovém masivu, obec Umhausen v Rakousku, některé lokality v Německu, Skandinávii, USA i jinde), i místa s vyšší úrovní zevního záření (Kerala v Indii, Ramsar v Iránu, Guarapari v Brazílii aj.).

Ozáření z přírodních zdrojů se uskutečňuje několika způsoby. Některé jsou ovlivnitelné lidskou činností a je rozumné je regulovat, příkladem jsou protiradonová opatření při výstavbě nových nebo rekonstrukci stávajících budov, opatření ke snížení ozáření osob při využívání podzemních zdrojů vody s vyšším obsahem přírodních radionuklidů, regulace uvolňování přírodních radionuklidů do životního prostředí při některých průmyslových činnostech.

Přírodní ozáření je způsobeno dvěma odlišnými zdroji:

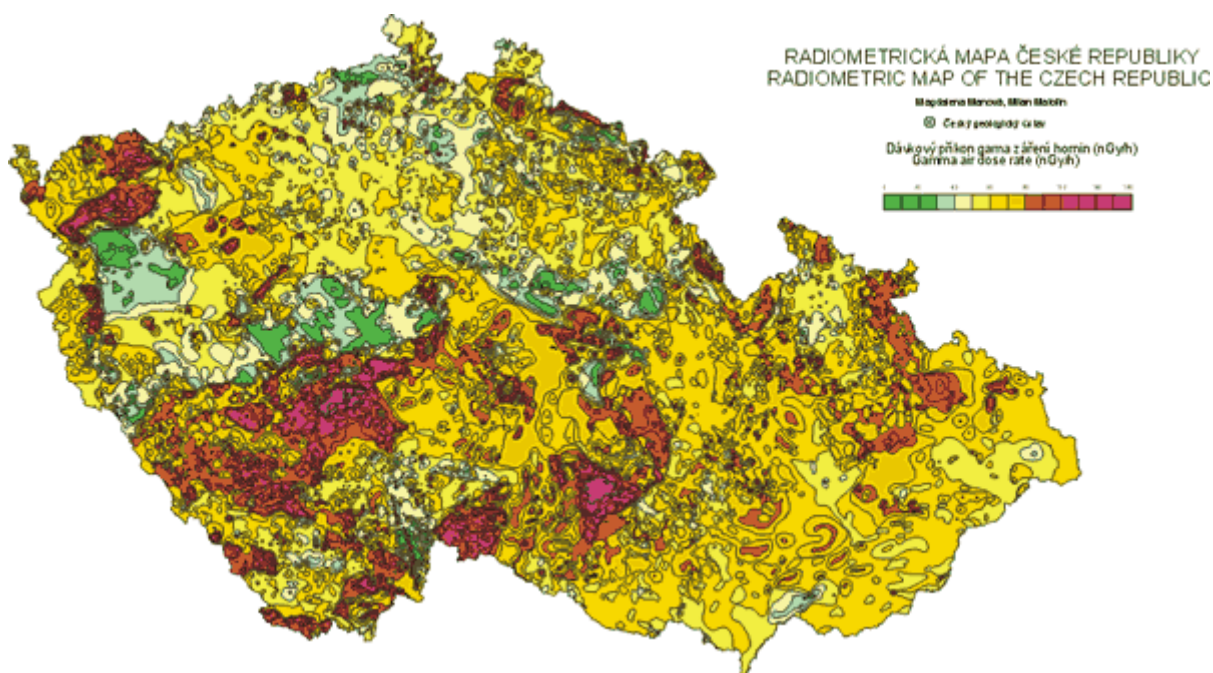
- **Kosmickým zářením**, které dopadá na Zemi z vesmíru. Ozařuje člověka zejména externě v závislosti na nadmořské výšce a poloze na Zemi.
- **Přírodními radionuklidy**, které se vyskytují v našem životním prostředí. Dělí se dále na *kosmogenní radionuklidy*, které vznikají průběžně jadernými reakcemi při interakci kosmického záření se stabilními prvky zejména ve vnějším obalu Země (např.  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$  aj.), původní *primordiální radionuklidy*, které vznikly v raných stádiích vesmíru a díky dlouhému poločasu rozpadu ( $>10^8$  roků) se dosud vyskytují na Zemi ve významném množství (např.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  aj.), radionuklidy vznikající *sekundárně* z původních radionuklidů tvořících přeměnové řady.

Z hlediska ozáření člověka jsou významné jen některé přírodní radionuklidy, v souhrnu je význam jednotlivých složek přírodního ozáření znázorněn v tabulce 2

**tabulka 2 Podíl jednotlivých složek přírodního záření z hlediska externího a interního ozáření člověka, převzato z (21)**

Složka ozáření	Roční efektivní dávka [mSv]	
	průměrná světová populace	oblasti s extrémními hodnotami
Externí ozáření:		
- kosmické záření	0,38	2
- terestrální	0,46	4,3
Interní ozáření (bez radonu):		
- kosmogenní radionuklidy	0,01	0,01
- terestrální radionuklidy	0,23	0,6
Radon:		
- inhalace	1,2	>10
- ingesce (podzemní vody)	0,005	0,1
thoron	0,07	0,1
celkem	2,4	

**Zevní ozáření gama** člověka způsobuje zejména přítomnost  $^{226}\text{Ra}$  (resp. radonu),  $^{232}\text{Th}$  a  $^{40}\text{K}$  v horninách a půdách povrchové vrstvy Země, jde o vrstvu několika desítek centimetrů. Průměrný dávkový příkon ve vzduchu ve výšce 1 m nad zemí od terestrálních radionuklidů ve světě se uvádí kolem  $0,057 \mu\text{Gy/h}$ , extrémní hodnoty byly naměřeny na monazitových píscích (Guarapari v Brazílii až  $50 \mu\text{Gy/h}$ , Kerala v Indii  $2 \mu\text{Gy/h}$ ) nebo na horninách s vysokou koncentrací radia (Ramsar v Iránu  $1 - 10 \mu\text{Gy/h}$ ). Rozložení hodnot dávkového příkonu v České republice je patrné z radiometrické mapy, obrázek 1. Terestrální radionuklidy jsou takové přírodní radionuklidy, které pochází přímo z naší planety.



**Obrázek 1 Radiometrická mapa České republiky - dávkový příkon terestrálního gama záření (nGyh-1) (31)**

Z hlediska **vnitřního ozáření** je zcela dominantní radon  $^{222}\text{Rn}$ , thoron  $^{220}\text{Rn}$  a jejich produkty přeměny. Významný je i izotop draslíku  $^{40}\text{K}$ . Koncentrace draslíku



v těle je přísně homeostaticky udržována, a proto i koncentrace draslíku  $^{40}\text{K}$  je prakticky stejná u všech osob, a to na úrovni okolo 55 Bq/kg, což odpovídá průměrné roční efektivní dávce 0,17 mSv. Dále je potřeba věnovat pozornost izotopům radia  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{228}\text{Ra}$ , uranu  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ , polonia  $^{210}\text{Po}$  a olova  $^{210}\text{Pb}$ . V příjmu těchto radionuklidů, a odpovídajících dávkách, mohou být značné rozdíly u jednotlivých osob nebo skupin obyvatelstva.

S výjimkou inhalace radonu a jeho přeměnových produktů, které mají na svědomí nejvyšší dávky obyvatelstvu, je obecně podstatně větší příjem radionuklidů ingescí než inhalací. Průměrné hodnoty příjmu ve světě jsou uvedeny v tabulce 3. Je ovšem třeba dodat, že hodnoty pro ingesci jsou pro Českou republiku v porovnání se světem vyšší, z důvodu vyššího obsahu radionuklidů v podzemní vodě u nás.(21)

**tabulka 3 Průměrný roční příjem přírodních radionuklidů ingescí a inhalací, převzato z (21)**

Radionuklid	Roční příjem [Bq]		Roční efektivní dávka [ $\mu\text{Sv}$ ]	
	Ingesce	Inhalace	Ingesce	Inhalace
$^{238}\text{U}$	5,7	0,007	0,22	0,056
$^{234}\text{U}$	5,7	0,007	0,24	0,066
$^{230}\text{Th}$	3	0,0036	0,53	0,05
$^{226}\text{Ra}$	22	0,0036	5,3	0,013
$^{210}\text{Pb}$	36	3,6	22	4
$^{210}\text{Po}$	63	0,36	66	1,2
$^{232}\text{Th}$	1,7	0,007	0,3	0,18
$^{228}\text{Ra}$	15	0,007	9	0,019
$^{228}\text{Th}$	3	0,007	0,09	0,28
$^{235}\text{U}$	0,2	0,0004	0,009	0,003

#### 2.2.2.1 Terestrální nuklidy záření gama v životním prostředí

V této kapitole bude podán přehled koncentrací významných terestrálních radionuklidů v jednotlivých složkách prostředí, s cílem ukázat i na souvislosti výskytu a relativní významnost z hlediska ozáření člověka.

Na úvod několik základních charakteristik. **Uran** je zastoupen zejména třemi významnými izotopy (relativní hmotnostní zastoupení je uvedeno v závorce):  $^{238}\text{U}$  (99,28 %),  $^{235}\text{U}$  (0,71 %),  $^{234}\text{U}$  (0,0058 %), přitom izotopy  $^{238}\text{U}$  a  $^{234}\text{U}$  jsou v přírodě v radioaktivní rovnováze. Hmotnostní obsah uranu se v zemské kůře pohybuje v řádu jednotek ppm (tj. hmotnostní obsah  $10^{-6}$ ). Hmotnostní obsah 1 ppm uranu odpovídá hmotnostní měrné aktivitě izotopu  $^{238}\text{U}$  12,2 Bq/kg. **Thorium** ( $^{232}\text{Th}$ ) se vyskytuje v podobných koncentracích, přitom 1ppm thoria odpovídá hmotnostní měrné aktivitě  $^{232}\text{Th}$  4,1 Bq/kg. **Radium** se objevuje jednak jako izotop  $^{226}\text{Ra}$  z uran-radiové, jednak jako izotop  $^{228}\text{Ra}$  z thoriové řady. Oba izotopy se vyskytují zpravidla v podobných hmotnostních aktivitách jako uran a thorium (odpovídající hmotnostní koncentrace radia je ovšem velmi malá, řádu  $10^{-12}$ ). Radium je chemicky podobné vápníku a podobným mechanismem vstupuje také do potravinových řetězců. Zemská kůra obsahuje dále jednotky procent dalšího významného prvku – **draslíku**, který je směsí několika izotopů s podílem 0,0118 % radioaktivního izotopu  $^{40}\text{K}$  (jeho poločas je 1,3 miliardy let). (21)

#### 2.2.2.2 Obsah přírodních radionuklidů gama v horninách a půdách

Primárním zdrojem přírodních radionuklidů bývají *horniny*. Hmotnostní aktivity významných radionuklidů  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  v různých horninách se liší až o několik řádů, hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$  a jeho přeměnových produktů jsou v horninách přibližně v rovnováze s  $^{238}\text{U}$ . Typické hodnoty hmotnostních aktivit jsou:  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ) v rozmezí 1 – 1000 Bq/kg, v uranových ložiscích více než desítky tisíc Bq/kg, průměrné hodnoty se pohybují v řádu desítek Bq/kg. (21r) Vyšší obsah uranu, a tedy i radia, bývá v horninách vyvěřelých (např. v durbachitech, žulách), střední v metamorfovaných horninách (např. v pararulách) a nejnižší v sedimentárních horninách (pískovcích, jílovcích). Hmotnostní aktivita  $^{232}\text{Th}$  je v rozmezí 1 – 100 Bq/kg, extrémní hodnoty jsou však až stovky Bq/kg v mozanitových pískách. Průměrné hodnoty se pohybují v řádu desítek Bq/kg. Obsah  $^{40}\text{K}$  se uvádí v rozmezí 70 – 1800 Bq/kg a průměrné hodnoty pak ve stovkách Bq/kg.

Podobné hodnoty najdeme v *půdách*. V souhrnných přehledech (např. UNSCEAR 1993 in (21)) se uvádí následující průměrné hodnoty hmotnostních aktivit v půdách a jejich rozpětí (v závorce) ve světě:  $^{40}\text{K}$  370 (100-500) Bq/kg,  $^{232}\text{Th}$  25 (7-50) Bq/kg,  $^{226}\text{Ra}$  25 (10-50) Bq/kg. V půdách lze očekávat větší narušení rovnováhy mezi jednotlivými produkty rozpadových řad než v horninách. Z hlediska rozboru expozičních cest je třeba počítat s tím, že horniny a půdy jsou zdrojem externího záření gama, a také, že z nich uvolňované radionuklidy migrují do vody, ovzduší a potravinových řetězců. Samostatným problémem je radioaktivita stavebních materiálů vyráběných z hornin nebo z druhotných surovin.

### 2.2.2.3 Obsah přírodních radionuklidů gama ve vodách

Přírodní radionuklidy obsažené v horninách se uvolňují do vod relativně složitými procesy, které závisí na geochemických, fyzikálních a hydrologických poměrech. Vyšší hodnoty bývají v podzemní vodě, kde dochází k dlouhodobému kontaktu s horninami s vyšším obsahem přírodních radionuklidů. Vody vyplňují póry a dutiny v půdách a horninách, rozdělovací koeficienty mezi pevnou fází a vodou silně závisí na výše uvedených faktorech a uvádějí se v rozmezí  $10^2$ – $10^3$  pro radium,  $10^3$ – $10^6$  pro thorium a  $10^4$  pro olovo. Z těchto údajů a s přihlédnutím k obsahu přírodních radionuklidů v půdách a horninách lze odhadnout objemové aktivity jednotlivých radionuklidů ve vodě v rozmezí 1-100 mBq/l. Typické hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve vodách ve světě uvádí (UNSCEAR 1993 in (21))  $^{226}\text{Ra}$  0,5 mBq/l,  $^{210}\text{Pb}$  10 mBq/l,  $^{232}\text{Th}$  0,05 mBq/l. Extrémní hodnoty ve světě v podzemních vodách dosahují objemových aktivit např. pro  $^{226}\text{Ra}$  1-146 Bq/l (Ramsar) a souvisí s lokálními vysokými koncentracemi radionuklidů v horninách. Tyto vody jsou často využívány pro lázeňství.

V porovnání s podzemní vodou jsou hodnoty v povrchových vodách řádově nižší. Výjimku tvoří případy, kde jsou do toků vypouštěny vody z důlní činnosti a kdy se mohou v tocích vyskytovat koncentrace srovnatelné s podzemní vodou. Známým

případem v České republice je např. Ploučnice, kde došlo v minulosti ke kontaminaci  $^{226}\text{Ra}$  v důsledku těžby uranu.(21)

Samostatnou problematikou související s přírodní radioaktivitou vod je výskyt přírodních radionuklidů v sedimentech vodotečí. V důsledku dlouhodobé kumulace radionuklidů lze v některých sedimentech nalézt hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů na úrovni 100-10 000 Bq/kg, a to i v tocích neovlivněných důlní činností.(21)

#### 2.2.2.4 Obsah přírodních radionuklidů gama v pitné vodě

Pitná voda vždy obsahuje určitá množství radioaktivních látek přírodního původu. Jedná se především o radionuklidy, které jsou součástí přírodních přeměnových řad – uranové, thoriové a aktiniové. Vznikají postupnou radioaktivní přeměnou uranu a thoria obsažených v horninách a zčásti přecházejí do vody. Výskyt přírodních radionuklidů v pitné vodě je aktuální zejména v případě pitné vody z podzemních zdrojů, objemová aktivita povrchové vody je obvykle o jeden až dva řády nižší.

Nejčastěji je v pitné vodě zjišťována přítomnost radonu, izotopů uranu a radia  $^{226}\text{Ra}$ . V některých případech je možno prokázat také přítomnost radionuklidů  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  a jiných izotopů radia. Zcela vyloučit nelze ani výskyt dalších dlouhodobých radionuklidů jako je  $^{232}\text{Th}$ .

#### 2.2.2.5 Obsah přírodních radionuklidů gama v ovzduší

Přírodní radionuklidy se uvolňují do ovzduší především z hornin a půd. Jde o radon unikající ze země do atmosféry, kde dochází k jeho přeměně na další radioaktivní prvky, ale také o přírodní radionuklidy uvolňované do ovzduší v podobě prachu.

Radon uniká ze země difúzí a rychle se rozptýluje díky turbulentní konvekci též do vyšších vrstev. Průměrná objemová aktivita radonu v přízemní vrstvě atmosféry,

která se ustálí jako rovnováha mezi jeho přísunem z podloží a jeho rozpadem, se pohybuje kolem 5-10 Bq/m<sup>3</sup>. V důsledku inverzních stavů v přízemní vrstvě kolísá aktivita během dne a noci přibližně dvakrát, v extrémních případech i o řád.

Radon se postupně přeměňuje na další radionuklidy, z mnoha jmenujme gama zářič <sup>210</sup>Pb. Tyto radionuklidy zůstávají zčásti ve vzduchu, zčásti se usazují na povrchy předmětů na Zemi. Objemová aktivita dlouhodobých produktů přeměny – <sup>210</sup>Pb – je na úrovni 0,1-0,5 mBq/m<sup>3</sup>, tedy mnohem nižší než původní aktivita radonu. Roční efektivní dávka obyvatelstvu od radonu a jeho produktů přeměny při pobytu venku 2000 hodin ročně je okolo 0,1 m Sv.

Kromě radonu a jeho produktů lze v ovzduší nalézt i radionuklidy přítomné v prachu uvolněném z hornin a půd. Průměrná prašnost se odhaduje na 10<sup>-7</sup> kg/m<sup>3</sup>, s přihlédnutím k běžnému obsahu přírodních radionuklidů v půdách a horninách lze proto odhadnout objemové aktivity v ovzduší na úrovni jednotek μBq/m<sup>3</sup>. Typické hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve vzduchu jsou <sup>226</sup>Ra 0,5 μBq/m<sup>3</sup>, <sup>210</sup>Pb 50 μBq/m<sup>3</sup>, <sup>232</sup>Th 1 μBq/m<sup>3</sup>. (UNSCEAR 1993 in (21))

#### 2.2.2.6 Obsah přírodních radionuklidů gama v potravinových řetězcích

Přírodní radionuklidy se dostávají do rostlin kořenovým přestupem z půdy (koeficienty kořenového přestupu pro radium, thorium a olovo jsou v rozmezí 0,0001-0,01), přestupem z kontaminované vody při zálivce (významné zejména u listové zeleniny), a také depozicí přírodních radionuklidů na rostliny z ovzduší. S přihlédnutím k uvedeným aktivitám ve složkách prostředí (půdě, vodě, ovzduší) jsou v rostlinách hmotnostní aktivity radionuklidů až desítky mBq/kg. Obdobně lze odhadnout obsahy přírodních radionuklidů v mase a mléce hospodářských zvířat, kde je významná expoziční cesta především ingescí krmiva a vody. Za samostatnou pozornost stojí vyšší faktor přestupu <sup>210</sup>Pb do ryb. Typické hodnoty měrných aktivit přírodních radionuklidů v jednotlivých částech potravního řetězce jsou uvedeny v tabulce 4.

**tabulka 4 Referenční hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů záření gama v potravinách v mBq/kg (UNSCEAR 1993 in (21))**

<b>Příjem</b>	<sup>226</sup> <b>Ra</b>	<sup>210</sup> <b>Pb</b>	<sup>232</sup> <b>Th</b>
Mléčné produkty	5	40	0,3
Maso	15	80	1
Obiloviny	80	100	3
Listová zelenina	50	30	15
Ovoce	30	25	0,5
Ryby	100	200	-

### 2.2.2.7 Přírodní nuklidy záření gama uvolněné do životního prostředí při některých činnostech

Při některých průmyslových činnostech se do prostředí uvolňují látky s vyššími aktivitami přírodních radionuklidů záření gama. Kromě těžby a zpracování uranu je to například zpracování materiálů, které nejsou sice považovány za radioaktivní, ale obsahují významné stopy přírodních radionuklidů, dále případy dlouhodobé kumulace přírodních radionuklidů při některých procesech (např. usazování v potrubích a armaturách v dolech, v rafineriích minerálních olejů, hromadění ve vodárenských kalech, fluátech při praní filtrů atd.) Tyto činnosti mohou být závažné z hlediska expozice pracovníků, z hlediska expozice obyvatelstva je nutno sledovat problematiku hospodaření s odpady. Přehled činností, při kterých může dojít k výskytu vyšších koncentrací přírodních radionuklidů v látkách a které uvádí příslušné evropské doporučení (EC 1998 in (21)) je v tabulce 5. Hlavními uvažovanými radionuklidy jsou zde radionuklidy uranové a thoriové přeměnové řady, zejména izotopy radia a  $^{210}\text{Pb}$ . Obecně je třeba počítat s narušením radioaktivní rovnováhy mezi jednotlivými členy přeměnových řad. Při uvedených aktivitách se v některých látkách objevují přírodní radionuklidy v koncentracích  $10^3$ - $10^4$  Bq/kg, výjimečně i vyšších. Takové koncentrace jsou z hlediska ozáření pracovníků (případně i obyvatelstva) již nezanedbatelné, a proto je v posledních letech této problematice věnována pozornost.

**tabulka 5 Přehled činností spojovaných s výskytem vyšších koncentrací přírodních radionuklidů (21)**

Pracovní činnost	Radionuklidy a typické měrné aktivity	Profesionální expozice nad 1 mSv	Významnější expozice jednotlivců z obyvatelstva
fosfátový průmysl (fosfátová hnojiva), kyselina fosforečná (detergenty)	vstupní materiál: 1,5 kBq/kg U, vedlejší produkt sádrovec: 1 kBq/kg <sup>226</sup> Ra, sraženiny v provozních trasách až 100 kBq/kg	možné (zevní gama, inhalace ve výrobních prostorech)	možné (kapalné výpusti, použití fosfosádry, atmosférické výpusti <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po při tepelném zpracování)
výroba kyseliny sírové	Pyrity: struska > 1 kBq/kg	?	?
odvodnění uhelných dolů	kaly mohou obsahovat 10-100 kBq/kg	možné (zevní i vnitřní ozáření během oprav)	nevhodná regulace odpadů na skládky
uhelný prach a popílek, popel z topné rašeliny	popílek 0,2-10 kBq/kg popel z topné rašeliny až 100 kBq/kg	nepravděpodobné	možné (využití popílku jako stavebního materiálu)
výroba spec. kovů (tavírny, hutě)	cínová ruda: <1 kBq/kg U, Th, tavení olova/vizmutu (10-100 kBq/kg, <sup>210</sup> Bi/ <sup>210</sup> Po), bauxit: <1 kBq/kg U, Th, pyrochlor, columbit (Fe-Nb): <2 kBq/kg Th, aktivity se koncentrují ve strusce a prachu	možné (zevní gama, inhalace ve výrobních prostorech)	možné (atmosférické výpusti, těkavé materiály <sup>210</sup> Pb, <sup>210</sup> Po, použití odpadu)
slitiny magnesium/thorium	až 4 % Th v konečné slitině 20 % Th v předslitině	možné (prach a dým)	možné (nevhodná regulace odpadů na skládky)
vzácné zeminy (např. zpracování monazitových písků)	až 10 kBq/kg uranu až 1000 kBq/kg Th	možné (zevní gama, inhalace)	možné (nevhodná regulace odpadů na skládky)



slévárenské písky	zirkoniové písky (1-5 kBq/kg) monazitové písky (až 1000 kBq/kg)	možné (vdechování prachu s $^{210}\text{Po}$ , $^{210}\text{Pb}$ )	možné (nevhodná regulace odpadů na skládky)
žáruvzdorné hmoty	zirkoniové minerály: 5 kBq/kg U, 1 kBq/kg Th	možné (zevní gama, inhalace ve výrobních prostorech)	možné (nevhodná regulace odpadů na skládky)
naftový a plynový průmysl	rádium v nánosech (typicky 1-100 kBq/kg, až 4000 kBq/kg), také výskyt Th	možné (zevní gama, inhalace v případech rozptýlu při nehodě)	možné při nevhodné regulaci skládkování
zpracování $\text{TiO}_2$ , pigmentový průmysl	suroviny: rudy ilmenit a rutil: 1 kBq/kg U, Th	možné (zevní gama, inhalace ve výrobních prostorech)	možné při využití odpadů
thoriové svařovací elektrody, plynové punčošky	thoriové svařovací elektrody: až 500 kBq/kg Th, plyn. punčošky: oxid thoria 95 %	možné (inhalace prachu a dýmu při svařování, broušení)	možné (nevhodná regulace odpadů na skládky)
porcelánové zubní náhrady	až 0,03 % U	možné (inhalace při formovacích praech)	nevhodná regulace odpadů na skládky
optický průmysl a skleněné zboží	sloučeniny vzácných zemin v leštících prášcích: U, Th některé sklo s přídavkem U, Th	možné (inhalace při leštění, tvarování ...)	možné (zevní ozáření očí při použití přísad U, Th v optických zařízeních, očních čočkách)
přírodní kameny	žuly, černé břidlice, tufy (1-5 kBq/kg)	možné (zevní gama)	možné (při použití jako stavebního materiálu)

Mezi další činnosti, při kterých dochází k uvolňování přírodních radionuklidů do životního prostředí, se řadí těžba a spalování uhlí, ropy a zemního plynu, dále použití fosfátových hnojiv a využití vedlejších produktů (druhotných surovin) při výrobě stavebních materiálů.

Při spalování uhlí v tepelných elektrárnách dochází k podstatné koncentraci přírodních radionuklidů v popílku. UNSCEAR (UNSCEAR 1993 in (21)) uvádí

průměrné hodnoty měrných aktivit přírodních radionuklidů v popílku 265 Bq/kg pro  $^{40}\text{K}$ , 240 Bq/kg pro  $^{226}\text{Ra}$ , 930 Bq/kg pro  $^{210}\text{Pb}$ , 70 Bq/kg pro  $^{232}\text{Th}$ . Na efektivní dávce obyvatelstvu se podílí inhalace prachových částic asi 70 %, zbytek připadá na zevní ozáření ze spadu a ingesci radionuklidů deponovaných na rostlinách. Průměrná roční kolektivní efektivní dávka vztažená na výkon elektrárny se uvádí kolem 0,5 Sv/GW pro moderní elektrárny s odlučovači popílku a 6 Sv/GW pro elektrárny bez odlučovačů (pro hustě obydlené oblasti Číny však až 50 Sv/GW) (21). Průměrná individuální efektivní dávka pro obyvatele planety je odhadována na 2  $\mu\text{Sv}$ , v blízkosti elektráren řádově vyšší. Podobně při používání uhlí k vytápění domácností dochází k lokálnímu uvolňování radionuklidů do ovzduší měst a obcí. O této expozici neexistuje mnoho údajů, individuální dávky se odhadují na 0,4-8  $\mu\text{Sv}$  ročně. Podobně se odhadují individuální dávky ze spalování ropy (10 nSv/rok) a zemního plynu (1 nSv/rok) (21). Z uvedeného vyplývá, že expozice obyvatelstva těmito cestami má na celkovém ozáření zanedbatelný podíl. Jako zajímavost je ovšem vhodné připomenout, že radioaktivita uvolněná tepelnou elektrárnou je větší než radioaktivita uvolněná elektrárnou jadernou za normálního provozu.(21)

Dalším příkladem je využití druhotných surovin – popílku, škváry, fosfosádry - při výrobě stavebních materiálů (plynosilikáty, cementy, beton, škvárobeton apod.) V některých byly zjištěny vysoké koncentrace radionuklidů uran-radiové přeměnové řady (1-10 kBq/kg). Při pobytu osob v budovách postavených z těchto materiálů se roční efektivní dávky ze zevního ozáření pohybují na úrovních 0,1-10 mSv/rok.

#### 2.2.2.8 Radionuklidy v uranovém hornictví

V uranovém hornictví se setkáváme s přírodními radionuklidy uran-radiové přeměnové řady. Přírodní uran  $U_{\text{nat}}$  je tvořen izotopy  $^{238}\text{U}$  (99,2831 %),  $^{235}\text{U}$  (0,7115 %) a  $^{234}\text{U}$  (0,0054 %).(21)

Součet efektivních dávek podílejících se na ozáření pracovníků v uranovém hornictví je tvořen třemi podíly:

- **Vnější záření gama**, jehož rozhodujícím zdrojem je  $^{226}\text{Ra}$ , které je současně i význačným zářičem alfa. Od roku 1961 byly v uranovém hornictví zavedeny osobní filmové pro zjišťování ozáření pracovníků z tohoto zdroje.
- **Radon 222**, kterému je v uranovém hornictví přisuzován největší význam. Proto byl od samých počátků těžby  $^{222}\text{Rn}$  monitorován. Je to dozimetricky nejvýznamnější izotop ze tří v přírodě se nalézajících izotopů radonu. Radon je nejtěžší plyn ze skupiny inertních plynů, je přirozeně radioaktivní. Jeho dozimetrický význam spočívá v tom, že je mateřským prvkem krátké přeměnové řady tvořené tzv. krátkodobými produkty přeměny radonu. Jsou to izotopy  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ , a  $^{210}\text{Po}$ . Tyto radionuklidy s krátkými poločasy rozpadu (od zlomků sekund až po desítky minut) mají charakter pevných látek a po svém vzniku se vážou na aerosolových částicích v ovzduší. Po vdechnutí jsou, v závislosti na velikosti aerosolových částic, zachycovány v plicích. Samotný radon je většinou vydechnut zpět, takže jeho příspěvek k ozáření plicní tkáně je velmi malý.
- Dlouhodobé **radionuklidy uran-radiové řady emitující záření alfa**  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{210}\text{Po}$ . Jsou součástí respirabilní i nerespirabilní složky prашného aerosolu v ovzduší. Dlouhodobé radionuklidy jsou v osobní dozimetrii uranového průmyslu systematicky zjišťovány a zaznamenávány až od roku 1997 v souvislosti s novou legislativou v radiační ochraně, zákonem č. 18/1997 Sb. a jeho prováděcími vyhláškami SLIB. Do té doby byly zjišťovány pouze nahodile, nebo pro potřeby různých studií.(21) a jejich podílu na ozáření horníků se nepřisuzoval zásadní význam. Výsledky dvouletého osobního monitorování prokázaly, že jejich podíl na ozáření pracovníků činí více než 30 %.

#### 2.2.2.9 Kosmická složka přírodního pozadí

Jednou z významných složek přírodního radiačního pozadí je kosmické záření. (21) Má vliv na celou populaci, ale obzvláště významně se podílí na ozáření v letadlech a kosmických lodích. Z hlediska možné radiační zátěže člověka jsou důležité pouze tři složky kosmického záření: galaktické kosmické záření, sluneční kosmické záření a záření radiačních (van Allenových) pásů Země.

**Galaktické kosmické záření** – pochází z hlubokých oblastí vesmíru mimo sluneční soustavu. Skládá se z protonů (85 % fluence), jader helia (12 %), těžších jader téměř všech prvků soustavy (1 %) a elektronů (3 %). Jeho energetické spektrum jen málo závisí na typu částice, pro energie vyšší než 1 GeV na jednotku atomové hmotnosti má tvar  $\approx E^{-2,5}$ , nejvyšší známé energie jsou  $10^{20}$  eV. Pole tohoto záření v mezihvězdném prostoru je izotropní, za milion let se změní jen málo. Dávkový ekvivalent tady dosahuje hodnot okolo 1 Sv za rok. V blízkosti Země jsou však variace jeho složení a intenzity v důsledku interakcí se slunečním větrem, magnetickým polem Země a jeho atmosférou značně významnější. Intenzita slunečního větru, skládajícího se vesměs z nízkoenergetických protonů a elektronů, je podstatně vyšší v obdobích vyšší sluneční aktivity a svým magnetickým vlivem znesnadňuje galaktickému kosmickému záření vstup do blízkosti Země. Proto je intenzita galaktického kosmického záření a úroveň případného ozáření vyšší v obdobích nízké sluneční aktivity a opačně. Tyto změny se opakují ve zhruba 11ti letých cyklech, dochází však i k dlouhodobým variacím sluneční aktivity. Jejich vliv závisí i na energii částice galaktického kosmického záření. Zatímco pro energie řádově 100 MeV se snižuje intenzita při vysokém slunečním maximu až desetkrát, pro energie kolem 4 GeV je tento vliv jen 20 %. To je důležité proto, že účinek sluneční aktivity se kombinuje se stínícím vlivem magnetického pole Země. Zatímco v blízkosti magnetických pólů mohou vstupovat do zemské atmosféry i částice s energiemi kolem 100 MeV, v oblasti jihovýchodní Asie k tomu potřebují až 17 GeV na jednotku atomové hmotnosti.

**Sluneční kosmické záření** schopné způsobit radiační zátěž na Zemi a v jejím okolí pochází především ze slunečních erupcí. Jejich vznik ani jejich rozsah (energie a toky částic) nejsou předvídatelné. V obdobích maximální sluneční aktivity jsou

častější, je to až desetkrát za rok, nejintenzivněji jsou pozorovány spíše na konci tohoto období. V jejich průběhu je emitováno záření, které může být nasměřováno i k Zemi. Toto sluneční kosmické záření se skládá z 99 % z protonů, těžší nabitě částice jsou velmi variabilní, většinou nepřesahují 100 MeV. Jsou však známy i erupce, jejichž maximální energie přesáhly 1 GeV. Vliv magnetického pole Země na možnost jejich vstupu do atmosféry je podobný jako u galaktického kosmického záření. Je také třeba uvést, že zvýšení úrovně záření v blízkosti Země v důsledku slunečních erupcí je poměrně krátkodobé, v průběhu 24 hodin klesne vůči maximu zhruba o řád.

**Radiační (van Allenovy) pásy** Země jsou tvořeny protony a elektrony zachycenými magnetickým polem Země v určitých vzdálenostech od povrchu. Energie částic se v těchto pásích mění v čase ve velkém rozsahu, dosahuje u protonů až několik stovek MeV, u elektronů několik set keV. Existují dva radiační pásy: vnější se středem okolo 20 tisíc kilometrů nad zemským povrchem a vnitřním jehož střed je vzdálen od povrchu okolo 3 tisíc kilometrů. Zatímco vnější pás je třeba z hlediska možnosti ozáření uvažovat jen v souvislosti s meziplanetárními lety, vnitřní radiační pás je velmi významný i pro lety družic na oběžné dráze. Je to z toho důvodu, že v oblasti tzv. jihoatlantické anomálie se středem zhruba 800 km východně od Porto Alegre (Brazílie) sestupuje vnitřní radiační pás až do vzdálenosti pouhých 400 kilometrů od povrchu Země. Pro některé dráhy družic může toto záření přispívat k celkové expozici na palubě až polovinou, vzhledem k malé pronikavosti tak může velmi podstatně ovlivnit zejména pobyt mimo palubu družice.

### *2.2.3 Zdroje ionizujícího záření v jaderné elektrárně*

Při výrobě energie jaderným reaktorem vznikají radionuklidy. Štěpením v palivu vznikají štěpné produkty, aktivací neutrony vznikají aktivační produkty v samotném palivu, v pokrytí paliva, v konstrukčním materiálu i v chladihu primárního okruhu. Do chladihu primárního okruhu se dostávají radionuklidy několika různými cestami –

aktivací chladiva samého, difusí štěpných produktů netěsnostmi v palivu a korozi konstrukčního materiálu a pokrytí článků. Všechny reaktory mají systémy pro záchyt plyných a kapalných radionuklidů. Obsah radionuklidů v primárním okruhu je neustále sledován a měřen a jejich složení vypovídá zejména o možných netěsnostech paliva, a to zejména přítomnost radioizotopů jódu. Radionuklidy v primárním okruhu jsou zdrojem vnějšího a potenciálně i vnitřního ozáření pracovníků a prostřednictvím výpustí i ozáření obyvatelstva.

Ve všech typech jaderných elektráren se radionuklidy uniklé z paliva i z primárního okruhu nakonec dostávají do nízkoaktivních výpustí, které jsou monitorovány a regulovány. Kvalitativní složení výpustí a aktivity jednotlivých radionuklidů v nich závisí na typu reaktoru a na zařízení používaném k zacházení s výpustmi.

Obsah štěpných produktů v reaktoru se nazývá inventář reaktoru a je závislý na typu reaktoru, typu paliva a jeho stupni vyhoření. Inventář jakéhokoli ze štěpných produktů lze pro daný typ paliva a reaktoru vypočítat pro kterýkoli stupeň vyhoření paliva. Pro různé typy paliva a reaktorů jsou inventáře štěpných produktů tabelovány. Ve vyhořelém palivu, chlazeném nejdříve v bazénu vyhořelého paliva, se stávají dominantní dlouhodobé radionuklidy. K celkovému inventáři aktivity radionuklidů přispívají i aktivační produkty, jejichž aktivita i složení závisí na složení konstrukčního materiálu a chladicího média v primárním okruhu. (Klener) Inventář štěpných produktů je samozřejmě mnohem vyšší než inventář aktivačních produktů, ale s přihlédnutím k původu vzniku aktivačních produktů tyto produkty v kapalných i plyných výpustech obvykle převažují. Do aerosolových výpustí se dostávají z důvodu netěsností a následných odkapů z primárního okruhu nebo při mechanických údržbářských a opravářských pracích.

Obecně jsou do ovzduší vypouštěny štěpné produkty ve formě vzácných plynů (izotopy kryptonu a xenonu), dále některé aktivační produkty ve formě plynů ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{16}\text{N}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{76}\text{As}$ ), tritium, radioizotopy jódu v plyných formách a ve formě aerosolu, v aerosolových formách štěpné a aktivační produkty a ve velmi malých aktivitách (relativně k ostatním aerosolovým výpustem) i transurany. Při běžném dělení

vypouštěných radionuklidů na aktivační a štěpné je třeba brát v úvahu i takové radionuklidy, které jsou produktem obou procesů, jako např.  $^{134}\text{Cs}$ , které vzniká aktivací  $^{133}\text{Cs}$ , které je konečným produktem řady  $^{133}\text{In}$  vzniklé štěpením (v této řadě se vyskytuje též  $^{133}\text{I}$  a  $^{133}\text{Xe}$ ). Rovněž vznik transuranů v palivu je poněkud složitější, obvykle jde o záchyt neutronu (v některých případech i vícenásobný) a následnou radioaktivní přeměnu. (21)

Do hydrosféry je vypouštěno zejména tritium, dále pak aktivační a případně i štěpné produkty.

#### 2.2.3.1 Radionuklidy gama záření vypouštěné do ovzduší

Do ovzduší jsou především vypouštěny radioaktivní vzácné plyny, vzniklé štěpením, existuje nejméně 9 radioizotopů kryptonu a 11 radioizotopů xenonu, z nichž  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{131\text{m}}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ , a  $^{133\text{m}}\text{Xe}$  produkují záření gama. Většina z nich má velmi krátký poločas rozpadu, sekundy až minuty, a stačí se rozpadnout dříve, než mohou difundovat z paliva ven. Část radioaktivních vzácných plynů se difúzí dostane mezi palivo a jeho pokrytí, kde vytvářejí tlak. Jestliže se v palivu objeví netěsnost, vzácné plyny se dostávají do chladiva primárního okruhu. Uvolňování plynů z primárního okruhu u typu tlakovodních reaktorů (PWR) probíhá kontinuálně, z důvodu kontroly chemického složení a čištění vody. Aktivity výpustí ve ventilačním komíně se značně sníží o aktivitu krátkodobých radionuklidů díky filtrům a zpoždovacím linkám, přes které jsou vedeny. U reaktorů typu BWR jsou tyto procesy odlišné, u starších typů byly výpusti radioaktivních vzácných plynů vyšší.

Významnou část plynných výpustí u některých jaderných elektráren tvoří  $^{41}\text{Ar}$ , který vzniká reakcí  $(n,\gamma)$  na stabilním  $^{40}\text{Ar}$ , který je běžně obsažen ve vzduchu. Do primárního okruhu se dostává zejména jako nečistota dusíku, používaného pro tlakování vody.

Radioizotopy jódu vznikají procesem štěpení. Výtěžek je téměř nezávislý na tom, zda jde o uranové nebo plutoniové. Z hlediska ochrany před zářením je významný  $^{131}\text{I}$  s poločasem rozpadu 8,021 dne(24), který se ve výpustích vyskytuje v plynné formě

(elementární jód, organický jód) a ve formě aerosolu. Tento radioizotop má relativně krátký poločas, jeho aktivita ve výpustích závisí na počtu netěsností v palivových článcích a na rychlosti úniku chladiva z primárního okruhu a je významný zejména z hlediska ozáření personálu jaderné elektrárny. Pro ozáření obyvatelstva je významný zejména tím, že po úniku do prostředí se může dostat do potravinového řetězce.

Ve formě aerosolů se vyskytují radionuklidy, které vznikly přímo jako produkt štěpení nebo rozpadem vzácných plynů, vzniklých štěpením. Další radionuklidy vznikají aktivací materiálů přítomných v primárním okruhu jako příměs nebo uvolněných korozi konstrukčních materiálů. Aerosoly se vytváří při únicích netěsnostmi primárního okruhu nebo při údržbě a opravách aktivovaných částí primárního okruhu. Vzduch, odváděný ventilačními systémy z prostor, kde se radioaktivní aerosoly tvoří, je kontinuálně čištěn výkonnými filtračními systémy (obvykle za použití HEPA filtrů), v nichž je velká část aerosolů, zejména o větších rozměrech, zachycena. Výpusti aerosolů jsou obecně velmi nízké a radionuklidové složení je unikátní pro každou elektrárnu. V jaderných elektrárnách typu VVER bývají obvykle nacházeny tyto radionuklidy gama záření:  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{182}\text{Ta}$ . V pracovním prostředí se mohou vyskytnout i aerosoly radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu, které se ve výpustech do prostředí již neuplatní.

#### 2.2.3.2 Radionuklidy vypouštěné do vodotečí

Zdroje radionuklidů, které se dostávají do kapalných výpustí jsou principiálně stejné jako zdroje radionuklidů vypouštěných do ovzduší.



## 2.3 Stanovení objemové aktivity nuklidů záření gama

### 2.3.1 Legislativní požadavky

Požadavky na zajištění radiační ochrany při uvádění radionuklidů do životního prostředí jsou stanoveny vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně §56. Tímto paragrafem je stanoveno, že toto uvádění 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 obyvatel nepřekročí roční efektivní dávky v důsledku plyných výpustí do ovzduší hodnotu 200  $\mu\text{Sv}$  za rok a v případě kapalných výpustí do hydrosféry hodnotu 50  $\mu\text{Sv}$  za rok.

Tato vyhláška současně v §17 stanovuje směrné hodnoty ozáření, které se považují za dostatečné k prokázání rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany. Pro oblast uvolňování radionuklidů do životního prostředí je touto rozumně dosažitelnou úrovní radiační ochrany považováno u příslušné kritické skupiny obyvatel nepřekročení směrné hodnoty efektivní dávky v důsledku kapalných a plyných výpustí ve výši 50  $\mu\text{Sv}$  za rok.

Státní a dozorné orgány však mohou pro oblast uvolňování radionuklidů do životního prostředí stanovit ještě přísnější ukazatele, tzv. autorizované limity.

#### Autorizované limity stanovené SÚJB

SÚJB stanovil autorizované limity pro uvolňování radionuklidů do životního prostředí prostřednictvím schválení Limit a podmínek pro 1 a 2. HVB JE Temelín (řízená dokumentace 1,2 TL001) ve formě 50-ti ročního úvazku efektivní dávky E(50) pro jednotlivce z kritické skupiny obyvatel:

- Pro radionuklidy uvolňované do ovzduší ve výši **40 mSv** za rok pro oba bloky.
- Pro radionuklidy uvolňované do hydrosféry ve výši **0,2 mSv** za rok pro jeden blok, respektive **0,4 mSv** za rok pro dva bloky.

Výše uvedené podmínky jsou splněny pokud součet součinů aktivit jednotlivých radionuklidů a příslušných převodních koeficientů. Rozhodnutí SÚJB čj. 8871/2000 není vyšší než výše uvedený stanovený limit. Do součtu příspěvků od jednotlivých radionuklidů se nezapočítávají hodnoty od radionuklidů, jejichž příspěvek do celkové sumy efektivní dávky a 50-ti ročního úvazku efektivní dávky E(50) je nižší než 1%.

Počet takových příspěvků musí být omezen tak, aby chyba podcenění efektivní dávky a 50-ti ročního úvazku efektivní dávky E(50) v důsledku nezapočtení radionuklidů byla menší než 10%.

Při bilancování výpustí do ovzduší se u aerosolů sečítají týdenní naměřené aktivity z jednotlivých filtrů. Pokud jsou jejich aktivity menší než detekční meze, uvádí se „hodnota je menší než MDA“. U hodnot menších než MDA se započítává poloviční příspěvek.

#### Autorizované limity stanovené vodohospodářským rozhodnutím

„Rozhodnutí o povolení k nakládání s vodami pro jadernou elektrárnu Temelín“ čj. 6804/93/Si dle paragrafu 8 zákona č.138/1973 Sb., bylo vydáno ještě před nabytím platnosti Atomového zákona v roce 1993 Referátem životního prostředí Okresního úřadu v Českých Budějovicích (RŽP). Pro roční úvazky efektivní dávky E(50) pro jednotlivce z kritické skupiny obyvatel stanovilo následující autorizované limity:

- Z hlediska aktivity tritia vypouštěného do vodotečí ve výši **0,16  $\mu\text{Sv}$**  při provozu jednoho bloku a **0,32  $\mu\text{Sv}$**  při provozu dvou bloků, což představuje aktivitu tritia **20 TBq** při provozu jednoho bloku, respektive **40 TBq** při provozu dvou bloků.

- Z hlediska aktivity ostatních umělých radionuklidů (aktivační a štěpné produkty mimo tritium) vypouštěných do vodotečí ve výši **0,004  $\mu\text{Sv}$**  při provozu jednoho bloku, respektive **0,006  $\mu\text{Sv}$**  při provozu dvou bloků, což odpovídá celkové aktivitě beta ostatních umělých radionuklidů **0,7 GBq** při provozu jednoho bloku a **1 GBq** při provozu dvou bloků.

Při bilancování výpustí do vodotečí se do hodnocení zahrnují pouze radionuklidy s objemovou aktivitou větší než MDA.

### 2.3.2 Program monitorování

#### 2.3.2.1 Předprovozní monitorování

Před spuštěním jaderné elektrárny bylo důležité provést předprovozní monitorování k získání podkladů o původním stavu okolí budoucího zdroje. Tato monitorování sloužila ke stanovení radiačního pozadí měřeného životního prostředí a jeho složek. Provedl se výběr a odzkoušení optimálních metodik odběru, zpracování a měření vzorků životního prostředí. Ověřoval se také způsob vyhodnocování a interpretace naměřených hodnot. Součástí byly i meteorologické studie. Zprávy o stavu byly vydávány pravidelně čtvrtletně, byly předávány státnímu doзору, Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost a veřejnosti.

#### 2.3.2.2 Provozní monitorování

Po spuštění elektrárny musí docházet k pravidelnému odebírání různých vzorků pro zjištění potenciálního úniku radionuklidů do životního prostředí. Tyto radionuklidy vznikají při výrobě energie, štěpením v palivu vznikají štěpné produkty a aktivací neutrony vznikají aktivační produkty v palivu samém, v pokrytí paliva, v konstrukčním materiálu i v chladiivu primárního okruhu. (21)

Monitorování v okolí jaderné elektrárny Temelín je prováděno podle dokumentu ČEZ-ETE 27.08.02.01 (Monitorovací program výпустí). Tento dokument je schválen Státním úřadem pro jadernou bezpečnost a obsahuje přesný popis způsobu sledování, měření, hodnocení a zaznamenávání veličin a parametrů ionizujícího záření a výskyt umělých radionuklidů v okolí elektrárny pro zhodnocení výпустí a kontrolu případných úniků a jejich důsledků. Je stanovena přesná forma zápisu používaného k uvedení požadovaných údajů, jako je oblast měření, cíl měření, metoda, měřené místo atd. podle požadavků § 73 vyhlášky č. 307/2002 Sb.

Monitorování je zajištěno kontrolou úrovní plošné aktivity umělých radionuklidů v atmosférických spadech, kontrolou úrovní objemové aktivity umělých radionuklidů v aerosolech ovzduší včetně plynného radiojodu, kontrolou úrovní

objemové aktivity umělých radionuklidů v povrchových vodách, kontrolou úrovní objemových aktivit umělých radionuklidů v mléce, kontrolou úrovní příkonu dávkového ekvivalentu záření gama pomocí termoluminiscenčního dozimetru, kontrolou úrovní hmotnostní aktivity umělých radionuklidů v zemědělských plodinách, v rybách a v půdách.

### 2.3.3 Odběr vzorků (5-15)

**tabulka 6 Přehled programu monitorování okolí JE Temelín (13)**

Monitorovaná složka	Měřicí body	Frekvence měření, interval odběru	Monitorované radionuklidy
aerosoly v ovzduší	SRKO ČEZ-ETE	kontinuální odběr, týdenní interval výměny filtru	gamanuklidy
			Sr90: čtvrtletní měření - spojený vzorek za čtvrtletí (polovina všech filtrů)
atmosférické spady	SRKO ČEZ-ETE	kontinuální odběr, měsíční interval odběru	gamanuklidy
povrchová voda	pojistné nádrže pro dešťové vody	měsíční interval odběru	tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
		celková aktivita beta bez K40	
		čtvrtletní interval odběru	gamanuklidy
podzemní voda	monitorovací vrty (mělký horizont): HV 615 RK 2 RK 25	čtvrtletní interval odběru	gamanuklidy
			tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
			celková aktivita alfa

	odvodňovací vrty: OTKA 24 OTKA 82 OTKA 91	měsíční interval odběru	tritium
sedimenty	pojistné nádrže pro dešťové vody	odběr jednou ročně	gamanuklidy
aerosoly v ovzduší	SRKO České Budějovice SRKO Bohunice SRKO Zvěrkovice SRKO Litoradlice SRKO Nová Ves SRKO Sedlec	kontinuální odběr, týdenní interval výměny filtru	gamanuklidy: sloučené měření
			I131 – SRKO Č.Budějovice Sr90: čtvrtletní měření - spojený vzorek za čtvrtletí (polovina všech filtrů ze všech míst)
atmosférické spady	SRKO České Budějovice SRKO Bohunice SRKO Zvěrkovice SRKO Litoradlice SRKO Nová Ves SRKO Sedlec	kontinuální odběr, měsíční interval odběru	gamanuklidy: měření spojeného vzorku (polovina odebraného množství) ze všech míst
dešťové srážky	ČHMÚ Temelín LRKO České Budějovice	interval odběru: kalendářní měsíc	tritium
povrchová voda	Vltava – Hladná Vltava – Kořensko (nad hrází)	měsíční interval odběru	gamanuklidy
			tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
	celková aktivita alfa		
		jednou ročně	Sr90
Vltava – Solenice	měsíční interval odběru	tritium	celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez
			celková aktivita beta bez

			K40
			celková aktivita alfa
		čtvrtletní interval odběru	gamanuklidy
	pololetní interval odběru	Sr90	
	Vltava – Hněvkovice (pod přehradní hrází) Bělohůrecký rybník	čtvrtletní interval odběru	gamanuklidy
		tritium	
		celková aktivita beta	
		celková aktivita beta bez K40	
		celková aktivita alfa	
podzemní voda	HV 4C (mělký oběh)	čtvrtletní interval odběru	gamanuklidy
			tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
			celková aktivita alfa
	HV 1A (hlubin. oběh) HV 2B (hlubin. oběh) HV 3A (hlubin. oběh) HV 3C (mělký oběh) HV 5A (hlubin. oběh) HV 5C (mělký oběh) HV 6C (mělký oběh)	jarní a podzimní odběr	tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
			celková aktivita alfa
		jednou ročně (jarní nebo podzimní odběr)	gamanuklidy
podzemní voda	HS 3 tritium	jarní a podzimní odběr	tritium
	HS 4		gamanuklidy
podzemní voda: veřejná studna	Temelín Kočín	jednou ročně	gamanuklidy
			tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
			celková aktivita alfa

pitná voda: veřejný vodovod	Týn nad Vltavou Dříteň	měsíčně	tritium
			celková aktivita beta
			celková aktivita beta bez K40
		jednou ročně	gamanuklidy
ryby	údolní nádrž Orlík Bělohůrecký rybník	jednou ročně	gamanuklidy
sedimenty	Vltava - Hladná, Vltava - Kořensko, Bělohůrecký rybník	jednou ročně	gamanuklidy
neobdělávaná půda (frakce menší než 2 mm): vrstva 0 až 5 cm vrstva 5 až 10 cm	Bohunice Litoradlice Nová Ves Sedlec	jednou ročně	gamanuklidy
			Sr90: spojený vzorek vrstvy 0 až 5 cm ze všech míst Pu239,240: spojený vzorek vrstvy 0 až 5 cm ze všech míst
mléko	kravín Lhota Pod Horami	čtrnáctidenní interval odběru	gamanuklidy
			Sr90: slévaný vzorek za kalendářní měsíc
zemědělské plodiny: podle osevního plánu, nejméně 4 druhy, z toho aspoň 2 typy se zkrmovanou nadzemní částí	do vzdálenosti cca 5 km od JE Temelín	jedenkrát za vegetační období	gamanuklidy
zelenina - min. jeden druh listové a jeden druh kořenové zeleniny	do vzdálenosti cca 5 km od JE Temelín	jedenkrát za vegetační období	gamanuklidy
ovoce - min. jeden druh jablek	Temelín - sady	jedenkrát za vegetační období	gamanuklidy

borůvky	Všemslyce	jedenkrát za vegetační období	gamanuklidy
příkon fotonového dávkového ekvivalentu: (měření pomocí TLD)	stálé měřicí body	kontinuální měření, čtvrtletní interval výměny TLD a vyhodnocení	průměrný příkon fotonového dávkového ekvivalentu
	stálé měřicí body	kontinuální měření, půlroční interval výměny TLD a vyhodnocení	průměrný příkon fotonového dávkového ekvivalentu
neobdělávané půdy (gamaspektrometrie in situ)	Bohunice Litoradlice Nová Ves Sedlec Zvěrkovice	čtvrtletní interval měření	aktivita gamanuklidů na povrchu terénu
obdělávané půdy (gamaspektrometrie in situ)	Knín Kočín Křtěnov Temelín	jednou ročně	aktivita gamanuklidů na povrchu terénu
neobdělávané půdy (kermový příkon gama záření, měřený přenosnými přístroji)	Bohunice Litoradlice Nová Ves Sedlec Zvěrkovice	čtvrtletní interval měření: měření bude prováděno při měření gamaspektrometrií in situ	kermový příkon gama záření
skládka komunálního odpadu Temelínec	4 měřicí body	týdenní interval měření	kermový příkon gama záření

### 2.3.3.1 Monitorování výpustí

#### 2.3.3.1.1 Výpusti do ovzduší

Na jaderné elektrárně Temelín jsou monitorovány následující zdroje plynných výpustí:



- dvoudřívový ventilační komín na 1.HVB
- dvoudřívový ventilační komín na 2.HVB
- 1 ventilační komín na BAPP
- odvodušnění sekundárního okruhu na 1.HVB
- odvodušnění sekundárního okruhu na 2.HVB

Ventilační komíny na HVB jsou dvoudřívové, tj. jsou soustředné a dělí se na vnitřní a vnější. Výpusti z těchto komínů závisí na provozních režimech bloků, vnější dřívky komínů jsou provozovány pouze v obdobích odstávek jednotlivých bloků.

Ventilační komín BAPP je jednodřívový a je v provozu po celý rok.

K bilančnímu měření vzácných plynů v plynných výpustech z jednotlivých ventilačních komínů HVB ETE slouží „on-line“ spektrometrický systém.

Bilanční měření aerosolů, jódů, uhlíku a tritia je prováděno na základě odběrů reprezentativních vzorků.

Ke kontinuálnímu nebilančnímu monitorování plynných výpustí dále slouží následující monitory:

- PIG monitory – tyto monitory kontinuálně měří objemovou aktivitu aerosolů, jódů a vzácných plynů během všech provozních režimů bloku, tj. během normálního provozu, odstávek a havarijních i pohavarijních situací. Monitor umožňuje spektrometrické laboratorní měření odebraných aerosolových a jódových filtrů.

- HRGM monitor – vysokorozsahový monitor vzácných plynů určený pro měření za havarijních a pohavarijních podmínek.

- LRAM monitor – monitor pro měření dávkového příkonu ve vnitřním a vnějším komíně.

### Měření aerosolů

Měření aerosolů je zabezpečováno izokinetickým proporčním odběrem vzorku vzdušiny a záchytem přítomných aerosolů na velkoobjemový aerosolový filtr. Odběr vzorku je proporční v celém rozsahu průtoku vzdušiny komínem. Vzorek se odebírá a gamaspektrometricky proměřuje po týdenní expozici. Ve spojeném ročním vzorku se následně pomocí alfa-spektrometrie stanovují potenciálně přítomné

transurany, po radiochemické separaci i radioizotopy stroncia. Vzorek se odebírá z vnitřních komínů HVB a ventilačního komína BAPP za všech provozních režimů bloku. Z vnějšího komína HVB je odběr vzorků aerosolů prováděn pouze při odstávkách.

#### Měření radiojódů

Měření radioizotopů jódu se provádí na základě proporcionálního odběru vzorku vzdušiny a jejich zachytu na jódový filtr. Odběr vzorku je proporcionální v celém rozsahu průtoku vzdušiny komínem. Vzorek se odebírá a gamaspektrometricky proměřuje po týdenní expozici.

Vzorek se odebírá z vnitřních komínů HVB za všech provozních režimů bloku. Z vnějšího komína HVB je odběr vzorků radioizotopů jódu prováděn pouze při odstávkách.

#### Měření vzácných plynů

Měření aktivity vzácných plynů je zabezpečováno na základě nepřetržitého (on-line) gamaspektrometrického měření vzdušiny vypouštěné ventilačními komíny HVB po předchozím odstranění aerosolů a radioizotopů jódu pomocí účinných filtrů. Z důvodů získání většího měřeného objemu je vzdušina v měřicí nádobě natlakována. Měření aktivity vzácných plynů je zabezpečováno při všech provozních režimech bloku. Stanovená objemová aktivita vzácných plynů je korigována na tlakové a teplotní poměry v měřicí nádobě.

Vzorek vzácných plynů se odebírá z vnitřních komínů HVB za všech provozních režimů bloku, z vnějších komínů HVB pouze při odstávkách. Operativně se provádí i odběr vzorků vzácných plynů do tlakových láhví za účelem stanovení  $^{85}\text{Kr}$ .

#### 2.3.3.1.2 Výpusti do vodotečí

Monitorování kapalných výpustí z ETE je založeno na bilančním měření obsahu jednotlivých radionuklidů v jednotlivých kontrolních nádržích před jejich vypouštěním do sběrné jímky odpadních vod a následně do ponořeného stupně Kořensko.

Vypouštění těchto nádrží je možné pouze se souhlasem směnového inženýra a je automaticky kontrolováno měřicími systémy radiační kontroly. Ty umožňují v případě zjištění překročení nastavených referenčních úrovní aktivity kapalných výpustí automatické uzavření příslušných armatur a tím i zastavení jejich vypouštění.

Aktivita vod ve sběrné jímce odpadních vod na odpadním kanálu z Jaderné elektrárny Temelín je kontinuálně monitorována pomocí zařízení, které navíc zabezpečuje získávání proporcionálně nakapávaného vzorku za účelem provádění následné spektrometrické nebo radiochemické analýzy vypouštěných vod.

#### Měření v kontrolních nádržích

Vzorky vod určené k rozboru obsahu tritia a dalších umělých radionuklidů se odebírají v souladu se schváleným programem monitorování výpustí přímo z kontrolních nádrží před jejich vypouštěním, a to za účelem zjištění níže uvedených podmínek pro jejich vypouštění daných vodohospodářským rozhodnutím:

- Kontrolní nádrže smí být vypouštěny do sběrné jímky odpadních vod jen v případě, že aktivita tritia v nich není vyšší než  $2,5E11\text{Bq}$ .

- Kontrolní nádrže se nesmí vypouštět pokud ostatní přítomné radionuklidy emitující záření gama mohou způsobit u jednotlivce z obyvatelstva vyšší úvazek než jednu dvacetinu limitu padesátiročního úvazku efektivní dávky uvedeném v rozhodnutí.

- Kontrolní nádrže se nesmí vypouštět, pokud odtok ze sběrné jímky je menší než 150 l.s-1.

#### Měření v jímce odpadních vod

Dle požadavků vodohospodářského rozhodnutí (Rozhodnutí o povolení k nakládání s vodami vydané Referátem životního prostředí Okresního úřadu v Českých Budějovicích, RŽP) jsou zjištěné hodnoty aktivit vypouštěných radionuklidů z kontrolních nádrží potvrzovány spektrometrickou, případně radiochemickou analýzou na základě vzorků vod odebíraných z jímky odpadních vod.

Koncentrační a bilanční limity aktivity určené Vodohospodářským rozhodnutím RŽP pro odpadní vody vypouštěné z ETE do Vltavy jsou stanoveny bez příspěvku

aktivit radionuklidů obsažených v surové vltavské vodě čerpané na elektrárnu přes čerpací stanici Hněvkovice. Odběr vzorků vypouštěných odpadních vod je prováděn proporcionálně.

Koncentrační hodnoty aktivit jednotlivých radionuklidů jsou zjišťovány radiochemickými analýzami s četností stanovenou výše jmenovaným rozhodnutím RŽP jedenkrát měsíčně. Od zjištěných hodnot celkové beta aktivity vypouštěné odpadní vody se odečítá průměrná roční hodnota celkové aktivity beta vzorku surové vltavské vody v profilu Hněvkovice bez příspěvku tritia.

### 2.3.3.2 Monitorování radiační situace v okolí Jaderné elektrárny Temelín

Monitorování je prováděno podle dokumentu ČEZ – ETE 27.08.02.01 „Program monitorování pro radiační kontrolu okolí“.

#### 2.3.3.2.1 Kontrola ovzduší

##### Aerosoly

Odběry aerosolů jsou prováděny ve staničkách radiační kontroly okolí pomocí velkoobjemových prosávacích zařízení JAP/90 TAJFUN s nastaveným průtokem  $40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (možnost regulace průtoku je v rozmezí od 30 do  $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Filtry byly po týdenní expozici slisovány do tablety o průměru 26.0 mm a výšce 8.0 mm.

Ve sloučených vzorcích aerosolových filtrů za čtvrtletí byla stanovena objemová aktivita Sr90 metodou extrakce Y90 do TBP.

##### Atmosférické spady

Spady jsou odebírány pomocí velkoplošných odběrových zařízení JMK 401 umístěných ve staničkách radiační kontroly okolí. Plocha odběru je  $0,5 \text{ m}^2$ . Zařízení neumožňuje rozlišení mokřích a suchých spadů.

Spady byly vyhodnocovány v intervalu jednoho kalendářního měsíce. Po okyselení a přidání nosičů byly upraveny metodou velkoobjemového srážení bez předchozí filtrace. Stanovení gamanuklidů je prováděno gamaspektrometrickou analýzou s použitím HPGe detektoru.

#### Dešťové srážky

Odběr je kontinuálně prováděn pomocí stabilních odběrových zařízení typu MTM 400. Ve vzorku dešťových srážek byla stanovena objemová aktivita tritia. Pro měření byly vzorky predestilovány, měření byla provedena na zařízení TRICARB 2260 XL.

#### 2.3.3.2.2 Kontrola vod

Vzorky vody pro stanovení radionuklidů, s výjimkou tritia byly odebírány do polyetylenových vzorkovnic, voda byla stabilizována okyselením kyselinou dusičnou na pH Gamaspektrometrický rozbor byl proveden podle ČSN ISO 10703 (75 7630) Jakost vod – Stanovení objemové aktivity radionuklidů spektrometrií záření gama s vysokým rozlišením. Pro gamaspektrometrické rozborů byly velkoobjemové vzorky vody odpařeny do sucha za teploty pod bodem varu. Odparky byly uzavřeny vzduchotěsně do Petriho misek.

#### 2.3.3.2.3 Kontrola sedimentů

Odběry a analýzy vzorků sedimentů podle monitorovacího programu jsou prováděny jednou ročně v místech odběru vzorků povrchových vod . Výsledky analýz jsou průběžně uváděny podle zpracování a změření vzorků.

Stanovení radionuklidů bylo provedeno v povrchové vrstvě odebrané do hloubky 5 cm, pro měření byla vzata frakce o velikosti částic méně než 2 mm.

#### 2.3.3.2.4 Kontrola půd

Odběry vzorků půd jsou podle monitorovacího programu prováděny jednou ročně ve dvou povrchových vrstvách, odebíraných v hloubce od 0 do 5 cm a v hloubce od 5 do 10 cm pod povrchem, pro měření je použita frakce o velikosti částic méně než 2 mm. Stanovení radionuklidů gamaspektrometrickou analýzou je prováděno v obou vrstvách, stanovení Pu239,240 a Sr90 je prováděno v povrchové vrstvě.

#### 2.3.3.2.5 Kontrola mléka

Mléko bylo jednorázově odebíráno ve čtrnáctidenním intervalu. Vzorky byly v nativním stavu v objemu 3 l měřeny na polovodičovém detektoru.

Ve sloučených vzorcích mléka za kalendářní měsíc je stanovována objemová aktivita Sr90 metodou extrakce Y90 do TBP (tributylfosfát).

#### 2.3.3.2.6 Kontrola zemědělských půd a lesních produktů a plodin

Odběry zemědělských a lesních plodin a produktů byly zahájeny ve druhém čtvrtletí. Výsledky analýz jsou průběžně uváděny podle zpracování a změření vzorků.

Vzorky půd určené k analýzám byly na vzduchu vysušeny, upraveny na 2 mm prosev. Hmotnostní aktivita radionuklidů je stanovena v sušině (tj. je vztažena na 1 kg sušeného vzorku). U borůvek a u jahod bylo měření provedeno v nativním stavu a měrná aktivita je vztažena na původní hmotnost.

#### 2.3.3.2.7 Kontrola ryb

Odběry jsou prováděny jednou ročně a měřeny na obsah aktivačních a štěpných produktů metodou polovodičové spektrometrie gama.

### 2.3.3.3 Terénní gamaspektrometrie

Terénní gamaspektrometrická měření neobdělávaných půd jsou prováděna ve čtvrtletním intervalu. K měření byl použit přenosný HPGe (velmi čisté germanium – označení materiálu, ze kterého jsou zhotoveny polovodičové detektory pro gamaspektrometrickou analýzu) detektor bez kolimace umístěný 1 m nad zemí.

Při výpočtu aktivit se předpokládá přítomnost umělých radionuklidů pouze na povrchu půdy, což odpovídá situaci krátce po spadu.

Rozdílné hodnoty mezi jednotlivými lokalitami jsou běžné a pouze dokumentují variabilitu přítomnosti radionuklidů v různých místech povrchu země.

Terénní gamaspektrometrická měření obdělávaných půd jsou prováděna jednou ročně ve čtyřech lokalitách.

### 2.3.3.4 Kermový příkon záření gama

Měření kermového příkonu záření gama je prováděno ve stejných lokalitách jako terénní gamaspektrometrická analýza. Pro měření jsou používány přenosné přístroje TESLA NB 3201 a REUTER-STOKES RSS 112. Měření je prováděno současně s terénní gamaspektrometrií. Naměřená veličina přístrojem TESLA NB 3201, který je zkalibrován a ověřen pro příkon kermu ve vzduchu v rozsahu  $10^{-7}$  až 1,3 Gy/hod.

Měření kermového příkonu záření gama na skládce komunálního odpadu Temelínec se monitoruje ve 3 měřících bodech.

**tabulka 7 Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin pro radiační mimořádné situace**

Radionuklid	Nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin (vztažené na výsledný produkt, který je určen pro přímou konzumaci) pro radiační mimořádné situace [Bq/kg] nebo [Bq/l]			
	potraviny pro počáteční a pokračovací kojeneckou výživu	Mléko a mléčné výrobky	Pitná voda a tekuté potraviny	Ostatní potraviny
Izotopy stroncia, zejména Sr-90	75	125	125	750
Izotopy jódu, zejména I-131	150	500	500	2000
Izotopy plutonia a transuranových prvků emitujících záření alfa, zejména Pu-239 a Am-241	1	20	20	80
Všechny ostatní nuklidy s poločasem přeměny delším než 10 dní, zejména Cs-134 a Cs-137, kromě H-3, C-14, K-40	400	1000	100	1250

#### **2.4 Gamaspektrometrická analýza (biomonitoring)(2)**

Gama spektrometrická analýza umožňuje stanovit přítomnost celé řady přirozených a umělých radionuklidů, emitujících záření gama ve vzorcích, s velmi dobrou citlivostí. Je to nedestruktivní metoda, vyžadující poměrně jednoduchou přípravu vzorků (vysušení, slisování, pomletí atd.). Je založena na úměrnosti mezi



plochou píku stanovovaného radionuklidu v měřeném spektru a jeho měrnou aktivitou. Pro ideální případ aktivity A bodového zdroje platí:

$$A = \frac{P_E}{t Y_E \eta}$$

kde	$P_E$	je plocha píku
	$t$	je doba měření
	$Y_E$	je výtěžek fotonů o energii E
	$\eta$	účinnost detektoru

V reálných podmínkách měření hmotných vzorků je nutno provést korekci na samoabsorbci záření ve vzorku a vliv sumací. K detekci záření gama pro stanovení měrné aktivity radionuklidů se dnes používají výhradně polovodičové detektory. Scintilační detektory mají výrazně horší energetickou rozlišovací schopnost a lze je použít pouze ve zvláštních případech (např. letecká spektrometrie), kde se uplatní jiné výhodné vlastnosti těchto detektorů. Pro stanovení měrné aktivity radionuklidů musíme detekovat fotony s energiemi až jednotky MeV. Pro tuto oblast energií jsou nejvýhodnější germaniové detektory. Germaniové detektory se vyrábějí ve třech základních provedeních:

1. Koaxiální detektory
2. Planární detektory
3. Studnové detektory

Standardní konfiguraci představují koaxiální detektory. V běžném provedení umožňují měřit fotony s energií od cca 40 keV s dobrou účinností. Planární detektory je výhodné použít pro detekci fotonů nízkých energií. Studnové detektory mají maximální detekční účinnost, jsou výhodné pro měření malých objemů vzorků, jsou však relativně drahé.

Pro měření byl použit koaxiální HPGE detektor se vzorky v geometrii tzv. Marinelliho nádoby. V této geometrii je měřený materiál uzavřen v Marinelliho nádobě, která obklopuje detektor. Tím je zajištěna maximální geometrická účinnost. Pro

stanovení závislosti detekční účinnosti pro jednotlivé energie záření gama se používá sada zářičů o známé aktivitě, v geometrickém uspořádání, v podobě tzv. Marinelliho standardů, které se pak používá při měření. Je výhodné, aby standardy obsahovaly radionuklidy emitující fotony z celé oblasti měřeného spektra, nebo radionuklid emitujících fotony s celou řadou energií, jejichž píky jsou ve spektru dobře rozlišitelné a jejichž rozpadové schéma je dostatečně přesně známé. V současné době se používá k těmto účelům radionuklid  $^{152}\text{Eu}$  nebo směs několika radionuklidů.

Elektronický řetězec umožňující zpracovat impulsy z detektoru se skládá z předzesilovače, s chlazeným FET tranzistorem, lineárního spektroskopického zesilovače, mnohokanálového analyzátoru, počítače na záznam a zpracování naměřených spekter a napájecích obvodů. Jednotlivé díly laboratorních spektrometrů se v současné době dodávají i jako karty do počítače, což zvyšuje kompaktnost celého systému.

Zvláštní pozornost při měření nízkých měrných aktivit je třeba věnovat stínění detektoru. Je nutno maximálně odstínit jednak kosmické záření, jednak záření z konstrukčních materiálů a stěn laboratoře. Ke stínění se používají materiály s co nejvyšším protonovým číslem, důležitá je i izotopová čistota stínících materiálů. Z těchto důvodů se někdy používá místo Pb, obsahujícího  $^{210}\text{Pb}$  a jeho dceřinný produkt  $^{210}\text{Bi}$ , Fe. I to však může být znečištěno některými umělými radionuklidy např.  $^{60}\text{Co}$  nebo  $^{137}\text{Cs}$ . Použití starých materiálů, např. Fe z pancéřování bitevních lodí z 1. svět. války je samozřejmě extrémně drahé. Olovněné stínění je vhodné vyložit materiálem, který by absorboval charakteristické záření vybuzevané ve vnitřních stěnách stínění kosmickým zářením nebo zářením radionuklidů obsažených v měřeném vzorku. K tomuto účelu se používá Cd a Cu .

Pro stanovení měrné aktivity měřených radionuklidů je velmi důležité i zpracování získaných spekter. Je nutné identifikovat píky ve spektru, rozdělit multiplety, odečíst pozadí, přiřadit nalezené píky jednotlivým radionuklidům a vypočítat čistou plochu píku. V současné době se používá několik komerčních programů dodávaných často spolu se spektrometrickým systémem. Cena takovýchto programů je však poměrně vysoká. Mimo to existují programy vyvinuté k tomuto účelu v ČR, které

pro daný účel plně vyhovují. Další krok potom představuje výpočet měrné aktivity jednotlivých radionuklidů. Do výpočtu je třeba zahrnout experimentálně stanovenou kalibrační křivku absolutní účinnosti detektoru pro jednotlivé energie, korekce na samoabsorbci a na pravé sumace.

## **2.5 Jaderná elektrárna Temelín**

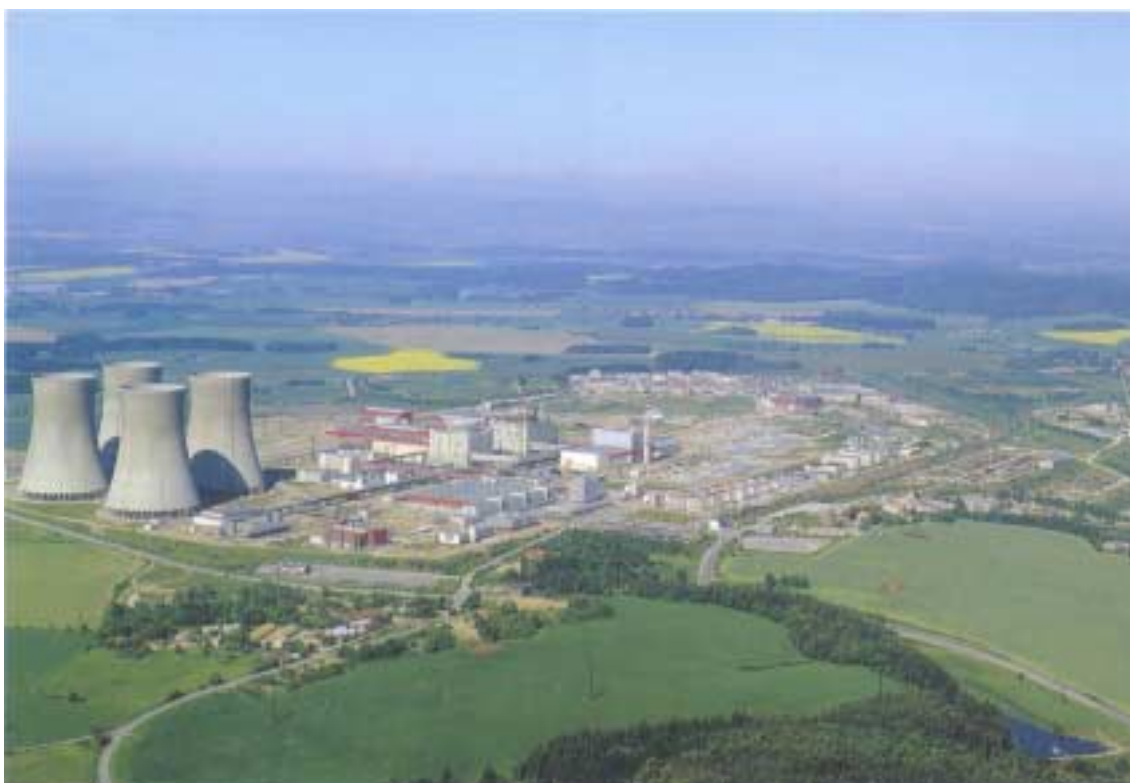
Jaderná elektrárna Temelín je druhou provozovanou a dnes největší jadernou elektrárnou v České republice. O její výstavbě bylo rozhodnuto v roce 1980 v rámci programu rozvoje československé energetiky, který předpokládal vybudování čtyř jaderných elektráren s reaktory typu VVER 1000. Tři měly stát na území České republiky, jedna na Slovensku. Jako první a nakonec jediná se v roce 1987 začala stavět elektrárna Temelín.

V roce 1990 rozhodla vláda o tom, že ze čtyř plánovaných výrobních bloků budou dokončeny pouze dva. Dostavba byla definitivně schválena v roce 1993. Toto rozhodnutí vycházelo z reálného odhadu energetických potřeb České republiky.

Investorem výstavby byla akciová společnost ČEZ, generálním dodavatelem stavby byly VSB, a. s., generálním dodavatelem technologické části byla Škoda Praha, a. s., generálním projektantem byl Energoprojekt Praha, a. s.(34)

Pro jadernou elektrárnu bylo vybráno území v jižních Čechách, 25 km severně od Českých Budějovic, 5 km jihozápadně od Týna nad Vltavou. Volba vhodného místa pro jadernou elektrárnu musí vyhovovat mnoha legislativním kritériím (mezi ně patří např. geologie, seismicita, hydrologie a meteorologie), které vychází z předpisů Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE). Temelínská lokalita nejen že zbytku těmto podmínkám vyhovuje, ale její umístění je vhodné i z hlediska energizační soustavy. V jižních Čechách žádná větší elektrárna nestojí a dodávka elektřiny z jiných českých regionů způsobuje vysoké ztráty při přenosu. (4) V blízkosti se nenacházejí žádná velká průmyslová zařízení ani frekventované transportní trasy. 8 km od elektrárny vede tranzitní plynovod zemního plynu.

Elektrárna se nachází na pozemcích o rozloze 143 ha, v nadmořské výšce 510 m n. m. Nejbližší obec je 2 km severozápadně ležící Temelín, dále obce Všemyslice, Bohunice, Záluží, Zvěrkovice, Hněvkovice, Lhota pod Horami, Sedlec, Litoradlice, Malešice, Kočín, Dříteň, Libív a Nová Ves. 5 km je vzdáleno město Týn nad Vltavou s 8 600 obyvateli, 14 km město Bosňany s 6 500 obyvateli, 25 km krajské město České Budějovice (100 000 obyvatel). Podle sčítání lidu v roce 1991 žilo v oblasti do 30 km od JE Temelín okolo 256 000 obyvatel. (34)



**Obrázek 2 Jaderná elektrárna Temelín**

Jaderná elektrárna se nachází v pahorkatině, v okruhu 10 km se nenacházejí žádné výrazné výškové body. Nejvíce vyskytujícími se horninami jsou žuly, ruly a křemeny. Je zde skalní podklad. Severozápadně se rozprostírá rozsáhlý komplex lesů (smíšené porosty bučin) a nachází se zde některá chráněná krajinná území. Největší

přírodní rezervací je Radomilická mokřina, 10 km jihozápadně, s rozlohou 47 ha a Velký a Malý Kamýk (9 km severozápadně, 29 ha). Důležitou řekou v této oblasti je Vltava se svou kaskádou vodních nádrží. Pro JE je důležitá především vodní nádrž Kořensko, které bylo vybudováno pro mísení odpadních vod z elektrárny s vodou Vltavy a nádrž Hněvkovice.

Vodní dílo Hněvkovice bylo vybudováno v letech 1986 – 1991. Nachází se ve vzdálenosti 5 km od Týna nad Vltavou proti proudu řeky. Je hlavní zásobárnou technologické vody pro Jadernou elektrárnu Temelín. Rozkládá se na ploše 276 hektarů a objem nádrže je 21,1 miliónů m<sup>3</sup>. Odběr vody je zajišťován čerpací stanicí, která se nachází v bezprostřední blízkosti hráze na levém břehu. Voda je vedena dvěma potrubními trasami o průměru 1600 mm do vodojemu v areálu elektrárny o objemu 2 x 15 000 m<sup>3</sup>. (3)

V původním projektu elektrárny byla za dobu výstavby provedena celá řada zlepšení, které posunuly JE Temelín na úroveň srovnatelnou s obdobnými jadernými elektrárnami ve světě. Dvě nejdůležitější změny představovaly náhradu původního systému kontroly a řízení za moderní digitální systém a také vývoj nového jaderného paliva s cílem zvýšit jeho využití a umožnit dosažení lepší regulace výkonu reaktoru.

Elektrárna je vybavena dvěma tlakovodními energetickými reaktory VVER 1000 typu V 320 o tepelném výkonu 3000 MW, umístěnými ve dvou výrobních blocích. Každý reaktor má výkon 81 MW. Zkušební provoz prvního bloku byl zahájen 10. června 2002, druhého bloku 10. dubna 2003. Nainstalovaný výkon se uvádí 2 x 1000 MW. V roce 2003 vyrobila 12,11 TWh elektřiny. Palivem je oxid uraničitý UO<sub>2</sub> s průměrně 3,5% obohacením uranu o štěpitelný izotop uranu 235. Palivo je dodáváno americkou společností Westinghouse. (34)

Primární okruh, tedy soubor zařízení, ve kterém se jaderná energie mění na tepelnou, je tvořen jaderným reaktorem, parogenerátorem, hlavním cirkulačním čerpadlem, primárním potrubím a kompenzátozem objemu. Aktivní zóna se nachází ve spodní části tlakové nádoby. Má výšku 3530 mm a průměr 3160 mm. Tvoří ji 163 palivových souborů a 61 regulačních tyčí (klastřů). Palivové soubory jsou uspořádány v hexagonální mříži. Každý palivový soubor sestává z 312 palivových proutků, 18

vodících trubek a z jedné centrální měřicí trubky.(3) V celé vsázce je 92 tun paliva. Při každoroční výměně paliva se obmění asi ¼ palivových souborů.

Tlaková nádoba reaktoru je vysoká 10,9 m a vnější průměr měří 4,5 m. Slouží k umístění vnitřních částí reaktoru. Tloušťka stěny její válcové části je 193 mm. Nádoba je navržena na tlak 17,6 MPa při teplotě 350°C. Provozní tlak je 15,7 MPa při teplotách 290 – 320°C. Vyrobená byla ve ŠKODA JS, a. s. (3)

V sekundárním okruhu se přeměňuje tepelná energie páry na energii elektrickou. Je tvořen turbogenerátorem o elektrickém výkonu 1000 MW.

## 2.6 Veličiny a jednotky

### 2.6.1 Aktivita

*Aktivita* charakterizuje množství radioaktivní látky. *Aktivita* je určena jako poměr středního počtu samovolných jaderných přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radioaktivní látky za časový interval. Počet jader, který se přeměňuje za jednotku času, nebo ekvivalentně jako úbytek počtu jader (dosud nepřeměněných) za jednotku času. Aktivita vzorku klesá exponenciálně s časem.

Okamžitá hodnota  $A(t)$  aktivity v čase  $t$  je tedy:

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt}$$

kde  $N(t)$  je počet dosud nepřeměněných jader v daném čase  $t$ .

Této aktivitě je pak úměrný i počet emitovaných částic za jednotku času, tj. intenzita radioaktivního záření.

Jednotku aktivity je **becquerel** (Bq).

### 2.6.2 Měrná aktivita

*Měrná aktivita* je aktivita vztažená na jednotku hmotnosti. Jednotkou je **Bq.kg<sup>-1</sup>**. Nazývána také hmotnostní aktivitou a rozumí se jí podíl aktivity a celkové hmotnosti odebraného vzorku. (32)

### 2.6.3 Plošná aktivita

Používá se u plošných zdrojů záření. *Plošná aktivita* je aktivita vztažená na jednotku plochy. Jednotkou je **Bq.m<sup>-2</sup>**.

### 2.6.4 Objemová aktivita

*Objemová aktivita* je používána u objemových zdrojů. Jednotkou je **Bq.m<sup>-3</sup>**. Objemovou aktivitou se rozumí podíl aktivity a celkového objemu odebraného vzorku. (32)

### **3 Cíl práce**

Potvrdit nebo vyvrátit hypotézu



#### **4 Hypotéza**

Provoz ETE nemá významný vliv na životní prostředí.

Soubory výsledků měření před a po spuštění ETE se statisticky neliší.

## 5 Metodika

### 5.1 *Sběr a zpracování dat*

Ke splnění cílů práce a ověření stanovených hypotéz byly statisticky zpracovány a analyzovány údaje o pozorovaných objemových a hmotnostních aktivitách nuklidů záření gama ve vzorcích životního prostředí.

Data byla zpracována převážně s využitím MS Excel 2003. Statistická analýza byla v některých případech provedena pomocí software PAST (16)

V případech, že se změřená hodnota nachází pod mezí významnosti metody stanovení, nahrazuje se pro další zpracování takový údaj hodnotou jedné poloviny uvedené meze významnosti (je zaveden předpoklad rovnoměrného rozdělení hodnot v oblasti pod mezí významnosti). Tím mohou být získané výsledky nadhodnoceny, vyjadřují však vyšší míru bezpečnosti než v případě, že by byly považovány za nulové.(20)

### 5.2 *Popisná statistika*

Popisná (deskriptivní) statistika je soubor statistických ukazatelů (charakteristik), které poskytují zhuštěné informace o příslušném znaku souboru. Mezi nejpoužívanější charakteristiky náhodné veličiny patří charakteristiky polohy, variability, šikmosti a špičatosti. Charakteristiky polohy – střední hodnota, modus, medián – určují střed celého rozdělení, kolem kterého budou pozorované hodnoty náhodné veličiny při opakování pokusu náhodně kolísat. Základní charakteristikou polohy je aritmetický průměr (střední hodnota). Charakteristiky variability vyjadřují rozsah kolísání hodnot náhodných veličin, jejich rozptýlení při opakování pokusu. Nejpoužívanější charakteristikou variability je rozptyl, či jeho druhá odmocnina, směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka má proti rozptylu výhodu v tom, že vyjadřuje variabilitu v měrových jednotkách sledovaného znaku náhodné veličiny

Uváděné popisné charakteristiky tvoří:

- *Střední hodnota*, je dána vzorcem

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- *Chyba střední hodnoty* (střední chyba, tj. odhad směrodatné odchylky výběrového průměru podle vzorce

$$S_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

kde n je počet hodnot a s odhad směrodatné odchylky statistického souboru)

- *Medián* – pro lichý rozsah výběru prostřední hodnota v pořadí, pro sudý rozsah není v MS Excel definován, zobrazí se #N/A
- *Modus* – nejčastěji se vyskytující hodnota
- *Směr. odchylka* – odhad směrodatné odchylky s, dána jako  $\sqrt{s^2}$
- *Rozptyl výběru* – odhad výběrového rozptylu  $s^2$ , je dán vzorcem

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$$

- *Špičatost* (Fischerovo  $g_1$ , odhad rozdílu špičatosti oproti špičatosti normálního rozdělení, jež je rovna 3. Pokud je hodnota tohoto parametru menší než nula, hovoříme o plošším rozdělení, v případě, že je jeho hodnota větší než nula, o špičatějším rozdělení, než je normální). Koeficient je počítán podle vzorce:

$$g_1 = \left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

- *Šikmost* (Fischerovo  $g_2$  – odhad šikmosti, tento parametr charakterizuje asymetrii rozdělení, v případě symetrického rozdělení je jeho hodnota rovna nule. V případě záporné hodnoty ukazuje na zešikmení doprava, tj.

nejčastější výskyt větších hodnot v porovnání s koncentrací nízkých hodnot, pokud je hodnota koeficientu šikmosti kladná, poukazuje to na zešikmení doleva, tj. nejčastější výskyt menších hodnot v porovnání s koncentrací vysokých hodnot). Je počítána podle vzorce:

$$g_2 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3$$

- *Rozdíl max-min* – rozpětí
- *Minimum* – nejmenší hodnota
- *Maximum* – největší hodnota
- *Součet* - součet hodnot
- *Počet* – počet hodnot
- *Hladina spolehlivosti (z)* – kritická hodnota zamítnutí nulové hypotézy  $H_0$ , že střední hodnota výběru je nulová (oproti alternativě  $H_A$ , že je nenulová). Na hladině významnosti  $z$ . Hypotéza se zamítne, pokud absolutní hodnota výběrového průměru překročí kritickou hodnotu ( $z$  se zadává v okně parametrů analýzy, obvykle 0,95).

### 5.3 Grafická analýza dat

V experimentální části jsou použity tři typy grafů: kvantilový graf, histogram a krabicový graf

#### 5.3.1 Kvantilový graf

V kvantilovém grafu se na osu x vynášejí pořadová pravděpodobnost  $P_i$  a na ose y pořadová statistika  $x_i$  (hodnoty srovnané podle velikosti). Graf umožňuje přehledně znázornit data a snadněji rozlišit tvar rozdělení, který může být symetrický nebo zešikmený k vyšším, či nižším hodnotám. K porovnání s normálním rozdělením je do

grafů zakreslena i kvantilová funkce normálního rozdělení jak u klasických, tak u robustních parametrů polohy a rozptýlení. (23)

### 5.3.1.1 Kvantil – kvantilový (Q-Q) graf

V Q-Q grafu se na osu x vynáší kvantilová funkce teoretického rozdělení  $Q_T(P_i)$  a na ose y pořadová statistika  $x_i$ . Graf umožňuje posoudit shodu výběrového rozdělení, jež je charakterizováno kvantilovou funkcí  $Q_E(P)$ , pro jejíž odhad se používá pořádkové statistiky  $x_i$  s kvantilovou funkcí teoretického (v našem případě normálního) rozdělení  $Q_T(P_i)$ . Při shodě výběrového rozdělení se zvoleným rozdělením teoretickým je závislost přibližně lineární. Korelační koeficient  $r_{xy}$  je pak kritériem těsnosti proložení této přímky. Pro porovnání rozdělení výběru s rozdělením normálním, kdy na osu x se vynáší kvantily normované normálního rozdělení  $u(P_i)$  se Q-Q graf nazývá grafem rankitovým. (23)

Př. Pořadová pravděpodobnost  $P_i$  se obvykle vypočítá jako:

$$P_i = \frac{i}{n+1}$$

Nebo pro porovnání s normálním rozdělením vhodněji ze vztahu:

$$P_i = \frac{i - \frac{3}{8}}{n + \frac{1}{4}}$$

### 5.3.2 Histogram

Jde o obrys sloupcového grafu, kde jsou na ose x jednotlivé třídy, definující šířky sloupců. Výšky sloupců odpovídají empirickým hustotám pravděpodobnosti. Kvalitu histogramu ovlivňuje ve značné míře volba počtu tříd  $L$ . (23)

$$L = \text{int}(2\sqrt{n})$$

int...funkce  $\text{int}(x)$  označuje celočíselnou část čísla  $x$

$$L = \text{int}(2,46(n-1)^{0,4})$$

h...šířka sloupce, určuje stupeň vyhlazení

Pomocí histogramu lze rovněž opticky posoudit, zda lze data považovat za realizaci náhodného výběru z normálního rozdělení. Právě normalita dat je předpokladem pro užití klasických statistických metod.

### 5.3.3 *Krabicový graf*

Krabicový graf (box plot) je grafickým znázorněním výběrových kvantilů. Vodorovné ohraničení obdélníku (krabičky) představuje dolní a horní kvartil, dělící čára uvnitř krabičky medián. Výška krabičky je rovna mezikvartilovému rozpětí (IQR), je to interval, v němž se nachází prostředních 50 % v uspořádaných datech. Konce vyčnívajících úseček označují minimální a maximální pozorování, případně interval, kde D je nejmenší měření větší nebo rovné dolnímu kvartilu zmenšenému o 1,5-násobek IQR a H je největší měření menší nebo rovné hornímu kvartilu zvětšenému o 1,5-násobek IQR. Čísla D a H lze považovat za hranice pro odlehlá pozorování. Při absenci odlehlých pozorování jsou si hodnoty průměru a mediánu blízké. Výběrový  $\alpha$ -kvantil je odhad hodnoty kvantilové funkce  $F^{-1}(\alpha)$ ,  $0 < \alpha < 1$ . Je to takové číslo, že 100 % dat leží pod ním. Speciálními případy jsou výběrový dolní a horní kvartil pro  $\alpha = 0,25$  a  $\alpha = 0,75$  a výběrový medián pro  $\alpha = 0,5$ .

### 5.4 *Testování statistických hypotéz*

Statistická hypotéza je domněnka o typu pravděpodobnostního rozdělení, neznámém parametru (např. střední hodnotě) v uvažovaném statistickém modelu. Rozhodnutí o tom, zda hypotézu zamítneme nebo naopak přijmeme, činíme na základě dat. Proces rozhodování se nazývá test nulové hypotézy  $H_0$ . Nulovou hypotézu

testujeme proti alternativní hypotéze, krátce alternativě,  $H_A$ . Alternativa může být jednostranná nebo oboustranná.

Při testování nulové hypotézy se můžeme dopustit několika chyb. Chyba prvního řádu nastane, když zamítneme hypotézu, která platí. Chyba druhého řádu znamená nezamítnutí hypotézy, která neplatí. Pravděpodobnosti obou druhů chyb se snažíme minimalizovat.

Hladina testu  $\alpha$  je pravděpodobnost chyby prvního řádu. Jelikož při zmenšování pravděpodobnosti chyby prvního řádu směrem k nule roste pravděpodobnost chyby druhého řádu, volíme nejčastěji  $\alpha = 0,05$ , někdy  $\alpha = 0,01$  nebo  $\alpha = 0,1$ . Tyto hladiny testu zaručují dostatečně malou pravděpodobnost chyby druhého řádu.

Testová statistika  $S(X_1, X_2, \dots, X_n)$  je funkce náhodného výběru, kterou používáme k rozhodování o zamítnutí hypotézy. Známe-li její pravděpodobnostní rozdělení, porovnáváme funkci dat  $S(X_1, X_2, \dots, X_n)$  s kritickou hodnotou tohoto rozdělení a odtud činíme závěr, zda zamítneme, či přijmeme nulovou hypotézu.

Kritický obor testu je množina souborů dat, pro něž zamítáme nulovou hypotézu.

Intervalový odhad parametru  $\Theta$  na hladině významnosti  $\alpha$  je interval s náhodnými mezemi, jenž s pravděpodobností  $1 - \alpha$  pokryje skutečnou neznámou hodnotu parametru. Používají se také názvy interval spolehlivosti a konfidenční interval. Při testování statistických hypotéz je třeba mít k dispozici tabulky kritických hodnot normálního, či jiných rozdělení. Použijeme-li k provedení testu statistický software, je nám na výstupu z testovací procedury nabídnuta namísto kritické hodnoty tzv. p-hodnota (Probability Level) a o zamítnutí hypotézy se rozhodujeme na jejím základě.

P-hodnota (p-value, p) je nejmenší hladina, na které zamítáme hypotézu, Jelikož běžně testujeme hypotézy na hladině významnosti 5 %, porovnáváme p-hodnotu s číslem 0,05. Je-li  $p < 0,05$ , nulovou hypotézu zamítneme, je-li  $p > 0,05$ , nulovou hypotézu na hladině 5 % nezamítáme.

### 5.4.1 Pomůcka pro výběr vhodného statistického testu

#### 5.4.1.1 Parametrické testy

tabulka 8 Pomůcka pro výběr parametrických testů

Účel testu		Možnosti	Předpoklady
Srovnání (shodnost) rozptylů dvou nezávislých výběrů		<b>F test</b>	Normální rozdělení
Srovnání středních hodnot (shodnost) dvou nezávislých výběrů	se shodným rozptylem	<b>T test</b>	Normální rozdělení
	s různými rozptyly		
	spárované hodnoty	<b>párový T test</b>	Normální rozdělení
Srovnání (shodnost) rozptylů více nezávislých výběrů		<b>Cochranův test</b>	Normální rozdělení
		<b>Hartleyův test</b>	
		<b>Bartletův test</b>	
Srovnání středních hodnot (shodnost) více nezávislých výběrů		<b>ANOVA</b>	Normální rozdělení, ale na malá porušení normality není ANOVA citlivá, i v případě, nepotvrzení normality jsou závěry ANOVA přibližně platné, pokud jsou přibližně stejné rozsahy výběrů
Korelační analýza		<b>Pearsonův korelační koeficient</b>	Normální rozdělení



### 5.4.1.2 Neparametrické testy

tabulka 9 Pomůcka pro výběr neparametrických testů

Účel testu	Možnosti	Předpoklady
Srovnání dvou nezávislých výběrů	Mann Whitney U test	
	Kolmogorovo-Smirnofův test	
Srovnání více nezávislých výběrů	Kruskal-Wallis ANOVA	
	Mediánový test	
Srovnání dvou závislých výběrů	Wilcoxonův test	
	Znaménkový test	
Srovnání více závislých výběrů	Friedman ANOVA	
Korelační analýza	Spearmanův korelační koeficient (neparametrická alternativa Pearsonovu korel.koef.)	

## 5.5 Charakteristika použitých testů

### 5.5.1 Test normality (test korelačního koeficientu z Q-Q grafu pro normální rozdělení)

Testujeme linearitu bodu Q-Q grafu pomocí korelačního koeficientu mezi daty (pořadovou statistikou  $x_i$ ) a odpovídajícími kvantily. Vypočteme hodnotu Pearsonova párového korelačního koeficientu, pro daný případ:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(Q_T(P_i) - \bar{Q}_T(\bar{P}_1))}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (Q_T(P_i) - \bar{Q}_T(\bar{P}_1))^2}}$$

Pro výpočet se použije vestavěná funkce MS Excel CORREL.

Test spočívá v porovnání hodnoty  $r$  s asymptotickou kritickou hodnotou testu  $c_v$ , tj. zjišťujeme, zda je hodnota korelačního koeficientu signifikantně menší než jedna (26).

Pro zvolenou hladinu významnosti vypočteme asymptotické kritické hodnoty ze vztahů:

$$cv(n) \approx 1,0071 - \frac{0,1371}{\sqrt{n}} - \frac{0,3682}{n} + \frac{0,7780}{n^2}$$

pro hladinu významnosti testu  $\alpha = 0,1$  (hladina spolehlivosti 90 %).

$$cv(n) \approx 1,0063 - \frac{0,1288}{\sqrt{n}} - \frac{0,6118}{n} + \frac{0,3505}{n^2}$$

pro hladinu významnosti testu  $\alpha = 0,05$  (hladina spolehlivosti 95 %).

$$cv(n) \approx 0,9963 - \frac{0,0211}{\sqrt{n}} - \frac{1,4106}{n} + \frac{3,1791}{n^2}$$

pro hladinu významnosti testu  $\alpha = 0,01$  (hladina spolehlivosti 99 %).

Je-li hodnota Pearsonova korelačního koeficientu menší než vypočtená kritická hodnota, zamítáme hypotézu o normalitě na příslušné hladině významnosti (obvykle volíme  $\alpha = 0,05$ ). Pokud není splněn předpoklad normality, používáme pro případné další zpracování a hodnocení tzv. neparametrické metody, které nevyžadují konkrétní pravděpodobnostní rozdělení dat. Neparametrické metody pracují s uspořádanými daty a s pořadími pozorování v uspořádaném výběru.

### 5.5.2 *F-test (dvouvýběrový test rozptylů)*

Jedná se snad o nejvýznamnější statistický test, krom samostatného používání je totiž koncovkou velkého počtu jiných testů. Testuje shodnost rozptylů, tedy vlastně směrodatných odchylek, dvou základních souborů, které mají normální rozdělení. Srovnáváme směrodatné odchylky ( $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ ) dvou základních souborů (přesněji, srovnáváme jejich kvadráty – rozptyly). Máme k dispozici dva výběry naměřených hodnot s  $n_1$  a  $n_2$  prvky. Měřením byly vlastně náhodně vybrány ze sledovaných základních souborů. Celé základní soubory nelze nikdy proměřit, takže nelze zjistit

jejich směrodatné odchyly  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ . Nemůžeme tedy prostým porovnáním určit, zda jsou tyto směrodatné odchyly shodné. Místo hodnot  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  použijeme jako jejich odhady směrodatné odchyly výběrů  $s_1$  a  $s_2$ , ty se liší. Testujeme, zda je přesto ještě možné, že se směrodatné odchyly  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  shodují ( $H_0$ ), nebo zda je pravděpodobnost, že se  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  shodují jen nepatrná (menší než  $\alpha$ ), takže učiníme raději závěr, že jsou vzájemně odlišné ( $H_A$ ).

Nulová hypotéza  $H_0$ : předpokládáme, že rozptyly dvou rozdělení  $\sigma_1^2$  a  $\sigma_2^2$  jsou shodné, tj.  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ .

Alternativní hypotéza  $H_A$ : rozptyly jsou různé, tj.  $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ . Takto formulovaný test je oboustranný. Jednostranný test předpokládá, že jeden rozptyl je jen větší a druhý jen menší.

Ze sledovaných základních souborů vybereme po jednom výběru. Jejich rozsahy jsou  $n_1$  a  $n_2$ . Vypočtené výběrové rozptyly  $s_1^2$  a  $s_2^2$  (obvykle počítáme směrodatné odchyly a pak je při dosazování umocňujeme). Ty odhadují rozptyly základních souborů  $\sigma_1^2$  a  $\sigma_2^2$ . Větší z výběrových rozptylů označíme  $s_{\max}^2$ , menší označíme  $s_{\min}^2$ .

*Testovací statistika má tvar*

$$F = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2}$$

Pokud platí hypotéza  $H_0$ , řídí se hodnoty vypočtené z výběrů rozdělením F (Fischerovo-Snedecorovo). Toto rozdělení má dva parametry, a to stupně volnosti, se kterými byly určeny rozptyly. Počty stupňů volnosti pro maximální rozptyl označíme  $v_1$  a pro minimální  $v_2$ , (stupně volnosti počítáme  $v = n-1$ ). Pozor, na označení záleží, index 1 označuje počet stupně volnosti pro větší hodnotu směrodatné odchyly, nikoliv tedy pro ten výběr, který je první v pořadí nebo který má největší počet hodnot  $n$ .

*Kritérium zamítající hypotézu  $H_0$ :  $F > F_k$*

Kritická hodnota je příslušný kvantil rozdělení F pro  $v_1$  a  $v_2$ . Pokud jsou  $v_1$  a  $v_2$  různé, záleží při hledání v tabulce na jejich pořadí – viz předchozí poznámka. Pro výše uvedenou formulaci  $H_0$  a na zvolené hladině významnosti  $\alpha$  je to kvantil  $(1 - \alpha/2)$  100 %, protože jde o oboustranný test (např. pro  $\alpha = 5$  % hledáme 97,5 procentní kvantil):

$$F_k = F_{1-\alpha/2}[v_1, v_2]$$

Rozdělení F je asymetrické, horní a dolní kvantily se zcela liší (tedy neliší se pouze znaménkem, jako je tomu u t-rozdělení). Při uvedeném postupu a tvaru kritéria, kde  $s_{\max}^2$  je vždy ve zlomku nahoře, pracujeme pouze s horními kvantily, takže nemusíme uvažovat, zda hledat horní nebo dolní kvantil; obvykle jsou také tabelovány pouze horní kvantily.

F statistika ukazuje kolikrát je větší z výběrových rozptylů větší než druhý. Pokud je tento poměr ještě blízký 1, existuje pro nás přijatelná pravděpodobnost, že obě výběrové směrodatné odchylky, ač rozdílné, odhadují stejnou hodnotu směrodatných odchylek základních souborů. Pokud tento poměr překročí kritickou hodnotu, je tato pravděpodobnost již nepříjemně malá ( $\alpha$  %) a my se přikloníme k hypotéze, že směrodatné odchylky základních souborů jsou různé. Před měřením, než je již jasné, která směrodatná odchylka je větší a která je menší, dává náš postup stejnou možnost, že v čitateli statistiky bude kterýkoliv z rozptylů. Rozhodujeme proto na základě kvantilu F pro  $(1-\alpha/2)$  100 %. Pokud by nás zajímal jen případ, kdy pouze rozptyl z jednoho ZS je větší a vždy bychom tedy umisťovali jemu příslušející výběrový rozptyl do čitatele, test by byl jednostranný a museli bychom rozhodovat podle kvantitu F pro  $(1-\alpha)$  100 %. F test je nutnou součástí dvouvýběrového t-testu; F-test musíme provést hned na počátku, abychom rozhodli, které vztahy při výpočtu kritéria t máme použít.

(23)

### 5.5.3 Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů (pro nezávislé výběry)

Je to test o středních hodnotách dvou základních souborů, které neznáme, ale máme výběry z těchto základních souborů. Testem určíme, zda je možné předpokládat, že střední hodnoty obou souborů jsou stejné, nebo zda je to již prakticky nemožné. Tímto testem např. srovnáváme výsledky, tj. průměry, dvou měření stejného vzorku, chceme-li určit, zda jsou statisticky významně odlišné, nebo zda je jejich odchylka dána jen náhodnými chybami, tedy je možné je považovat za stejné.

Srovnáváme střední hodnoty ( $\mu_1$  a  $\mu_2$ ) dvou základních souborů. Máme k dispozici dva výběry naměřených hodnot s  $n_1$  a  $n_2$  prvky. Měřením byly vlastně náhodně vybrány ze sledovaných základních souborů. Celé základní soubory nelze nikdy proměřit, takže nelze zjistit jejich střední hodnoty  $\mu_1$  a  $\mu_2$ . Nemůžeme tedy prostým porovnáním zjistit, zda jsou tyto střední hodnoty shodné. Místo hodnot  $\mu_1$  a  $\mu_2$  použijeme jako jejich odhady průměry z obou výběrů  $\bar{x}_1$  a  $\bar{x}_2$  a ty se liší. Testujeme, zda je přesto ještě možné, že se střední hodnoty  $\mu_1$  a  $\mu_2$  shodují ( $H_0$ ), nebo je pravděpodobnost, že se  $\mu_1$  a  $\mu_2$  shodují jen nepatrně (menší než  $\alpha$ ), takže učiníme raději závěr, že jsou vzájemně odlišné ( $H_A$ ).

*Nulová hypotéza  $H_0$* : předpokládáme, že střední hodnoty dvou rozdělení  $\mu_1$  a  $\mu_2$  jsou shodné, tj.  $\mu_1 = \mu_2$ .

*Alternativní hypotéza  $H_A$* : střední hodnoty jsou různé, tj.  $\mu_1 \neq \mu_2$  (test formulován oboustranně).

Ze dvou sledovaných základních souborů vybereme po jednom výběru (tj. na každém souboru proměříme několik prvků). Výběry musí být vzájemně nezávislé (tj. např. nesmí docházet k jevu, že když vybereme z jednoho souboru hodnotu vysokou, k tomu vybraná hodnota z druhého souboru bude rovněž vysoká). Jejich rozsahy jsou  $n_1$  a  $n_2$ . Výběrové průměry  $\bar{x}_1$  a  $\bar{x}_2$  odhadují střední hodnoty  $\mu_1$  a  $\mu_2$ . Výběrové směrodatné odchylky  $s_1$  a  $s_2$  odhadují směrodatné odchylky základních souborů  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ .

Test má dvě varianty, které volíme podle toho, zda směrodatné odchylky obou základních souborů jsou stejné nebo různé (zjišťuje se F).

Postup, pokud předpokládáme  $\sigma_1 = \sigma_2$ :

Testovací statistika má tvar:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_{1,2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}$$

Kde  $s_{1,2}$  je vypočtena z váženého průměru rozptylů (vahou je počet stupňů volnosti)

$$S_{1,2} = \sqrt{\frac{S_1^2(n_1 - 1) + S_2^2(n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Když  $n_1 = n_2 = n$ , dostáváme jednoduchý tvar

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \sqrt{n}$$

Tato statistika má při platnosti hypotézy  $H_0$  t-rozdělení se stupni volnosti  $v = n_1 + n_2 - 2$ .

*Kritérium zamítající hypotézu  $H_0$ :*  $t > t_k$

Kritická hodnota je příslušný kvantil t-rozdělení se stupni volnosti  $v$ . Pro hladinu významnosti  $\alpha$  je to kvantil  $(1 - \alpha/2)$  100 %, protože jde o oboustranný test ( $t_{1 - \alpha/2; v}$ ). (23).

#### 5.5.4 Mannův-Whitneyův test

Jedná se o neparametrický test, který může řešit otázky podobné těm, jež jsou testovány dvouvýběrovým t-testem o středních hodnotách dvou výběrů. Základem pro testovou statistiku jsou součty pořadí pozorování prvního a druhého výběru ve spojeném souboru dat uspořádaném podle velikosti. Máme dva nezávislé výběry pocházející ze základních souborů. Testujeme nulovou hypotézu:

$H_0$ : základní soubory, ze kterých pocházejí oba výběry, mají stejné rozdělení;  
proti hypotéze alternativní:

$H_A$ : základní soubory nemají stejné rozdělení.

Vypočteme testové statistiky (35)  $U_1$  a  $U_2$ , kde

$$U_1 = \frac{n_1(n_1 + 1)}{2}$$

a

$$U_2 = \frac{n_2(n_2 + 1)}{2}$$

Mezi těmito dvěma statistikami existuje vzájemný vztah. Stačí proto spočítat pouze jednu z nich, např.  $U_1$  a druhou vypočteme ze vzorce

$$U_2 = n_1 n_2 - U_1$$

Nyní zvolíme hladinu významnosti a ve statistických tabulkách nalezneme kritickou hodnotu pro rozsahy výběrů  $n_1$  a  $n_2$ . Nulovou hypotézu zamítneme, pokud menší z čísel  $U_1$  a  $U_2$  je menší než kritická hodnota.

Pro větší hodnoty  $n_1$  a  $n_2$  můžeme použít normální aproximaci

$$Z = \frac{U_1 - \frac{1}{2}n_1n_2}{\sqrt{\frac{1}{12}n_1n_2(n_1 + n_2 + 1)}}$$

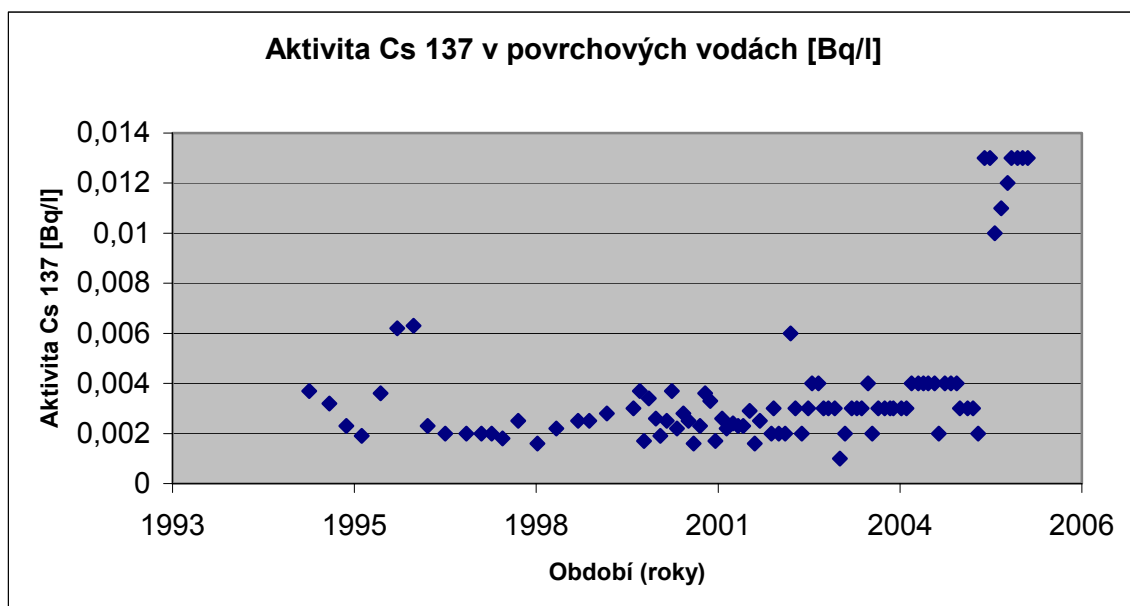
Pro zvolenou hladinu významnosti  $\alpha$  je kritickou hodnotou kvantit  $Z_{1-\alpha/2}$  normovaného normálního rozdělení.

## 5.6 Výběr vzorků životního prostředí

K prokázání vlivu provozu Jaderné elektrárny Temelín na životní prostředí bylo vybráno 5 vzorků, aerosoly, neobdělávané půdy, říční aerosoly, povrchové vody a mléko. Sledováno bylo období od roku 1995 do roku 2005.

### 5.6.1 Povrchové vody

Vzorky povrchových vod z lokality Hladná byly do roku 2000 odebírány kvartálně, poté jednou za měsíc. Sledována byla objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$ , v  $\text{Bq.l}^{-1}$ . Do 22. března 2005 se odebíral tzv. srážený vzorek o objemu 45 litrů, od 12. dubna 2005 se zpracovávalo již jen 10 litrů. Díky tomu jsou naměřené hodnoty od dubna 2005 o řád vyšší, jak je vidět v grafu 1. Ke statistickému zpracování tudíž pro zachování větší objektivitu použijí jen výsledky do března roku 2005.

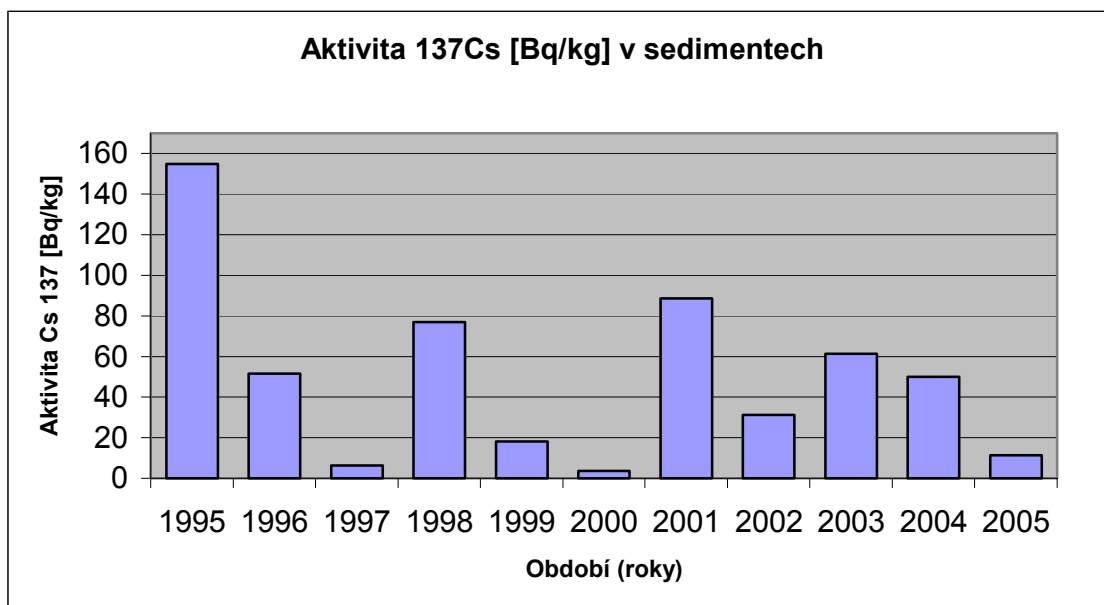


graf 1 Objemová aktivita Cs 137 v povrchových vodách

### 5.6.2 Sedimenty

Vzorky říčních sedimentů byly odebírány v lokalitě Hladná jednou ročně. Byla zjišťována hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v  $\text{Bq.kg}^{-1}$ .

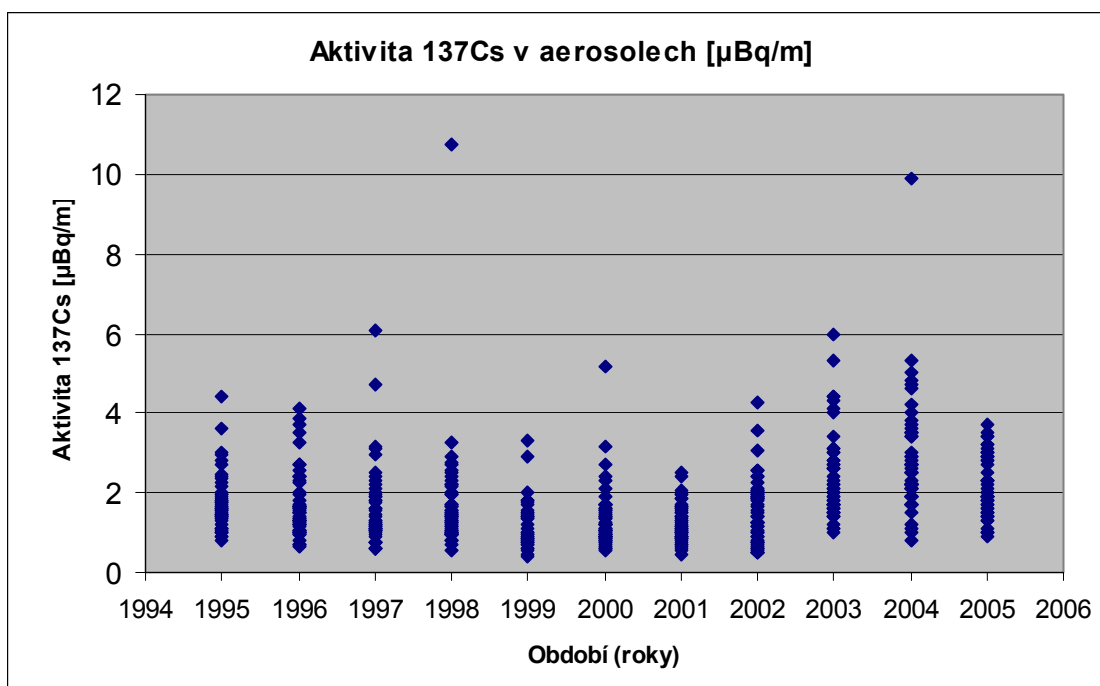




graf 2 Hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v říčních sedimentech

### 5.6.3 Aerosoly

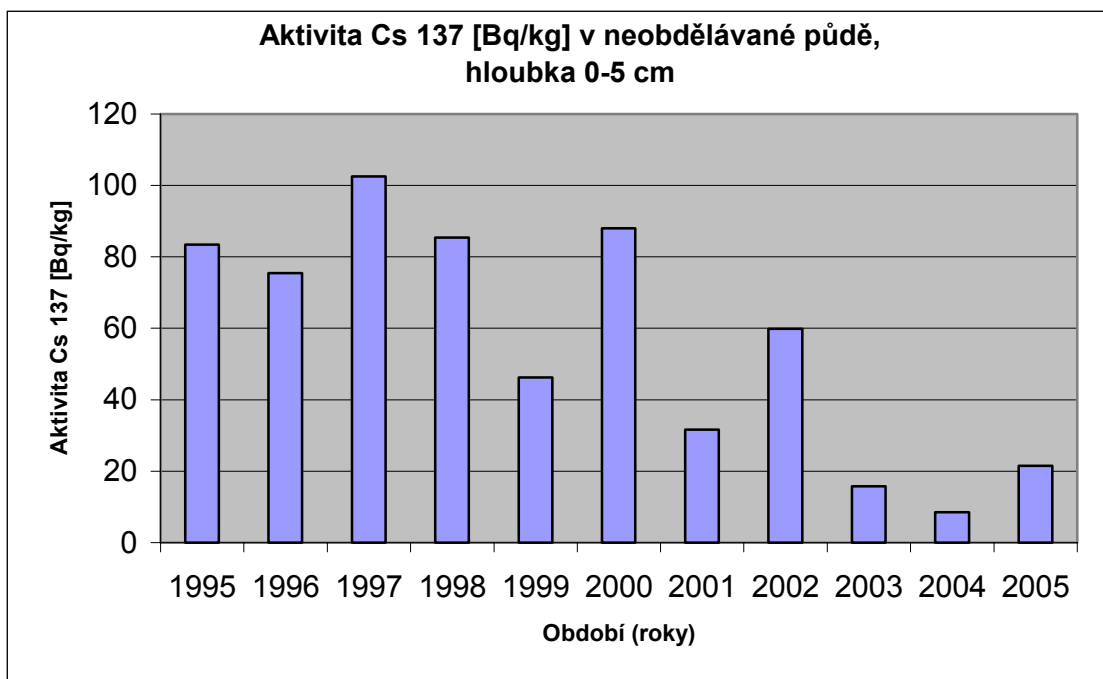
Vzorky aerosolů byly sbírány v lokalitě Zvěrkovice každý druhý týden. Měření bylo spojené vzorky a zjišťována objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v  $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ .



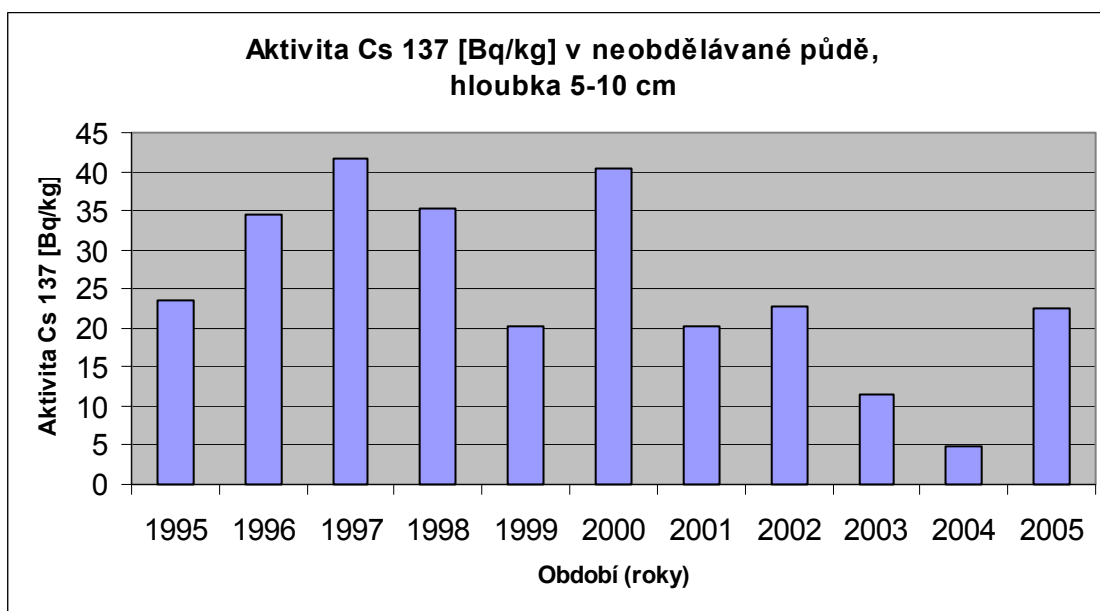
graf 3 Objemová aktivita Cs 137 v aerosolech

#### 5.6.4 Neobdělávané půdy

Vzorky neobdělávaných půd byly odebírány v lokalitě Litoradlice jednou ročně, z hloubky 0 – 5 cm a 5 – 10 cm a měřeny na přítomnost radionuklidů  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ .



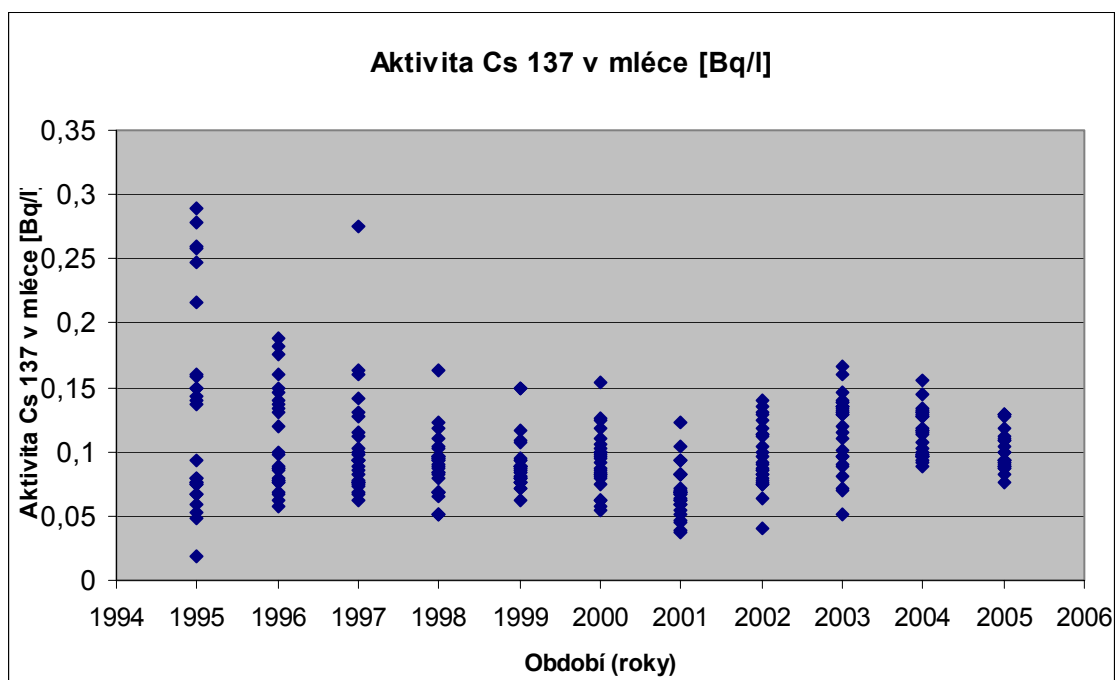
graf 4 Hmotnostní aktivita <sup>137</sup>Cs v neobdělávané půdě, hloubka 0 - 5 cm



graf 5 Hmotnostní aktivita Cs 137, v neobdělávané půdě, hloubka 5 - 10 cm

### 5.6.5 Mléko

Vzorky mléka byly získávány ve Výrobně obchodním družstvu Všemyslice s periodou 14 dní a měřena objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$ .



graf 6 Objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v mléce

## **6 Výsledky**

V experimentální části byla provedena statistická analýza výsledků měření nuklidů záření gama v životním prostředí pomocí gamaspektrometrie ve vybraných lokalitách v okolí ETE a testování statistických hypotéz o shodě parametrů polohy souborů dat z období předprovozního a provozního monitorování.

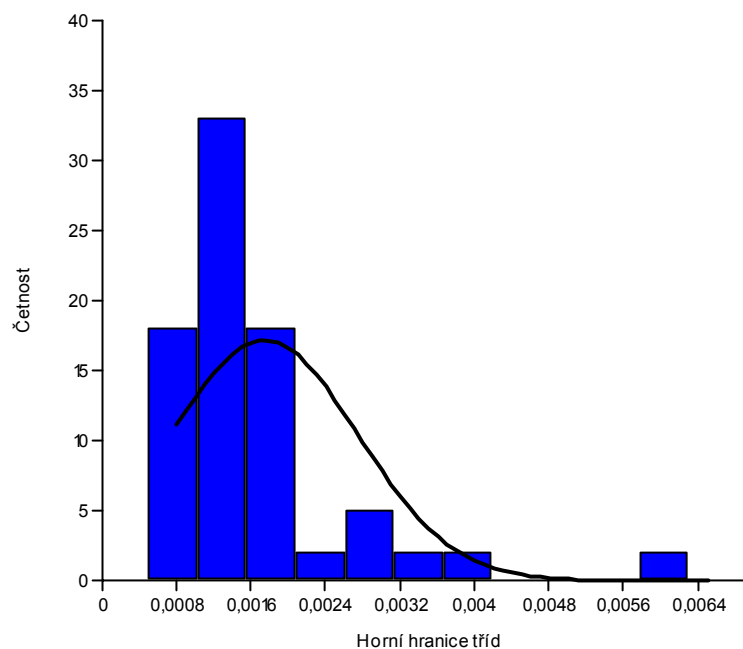
### **6.1 Exploratorní analýza**

#### *6.1.1 Povrchové vody*

Výsledky měření nuklidů gamazáření v povrchových vodách byly převzaty z Výsledků monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín. Z let 1995 – 2005. Z těchto dat byla pomocí software MS Excel získána popisná statistika, která je prvním krokem explorativní analýzy dat (tabulka 10). Význam jednotlivých ukazatelů je popsán v kapitole 5.2. Dále následuje grafické vyjádření výsledků v podobě statistických diagnostických grafů, které byly většinou zpracovány v software PAST(17

**tabulka 10 Základní statistické údaje pro  $^{137}\text{Cs}$  v povrchových vodách**

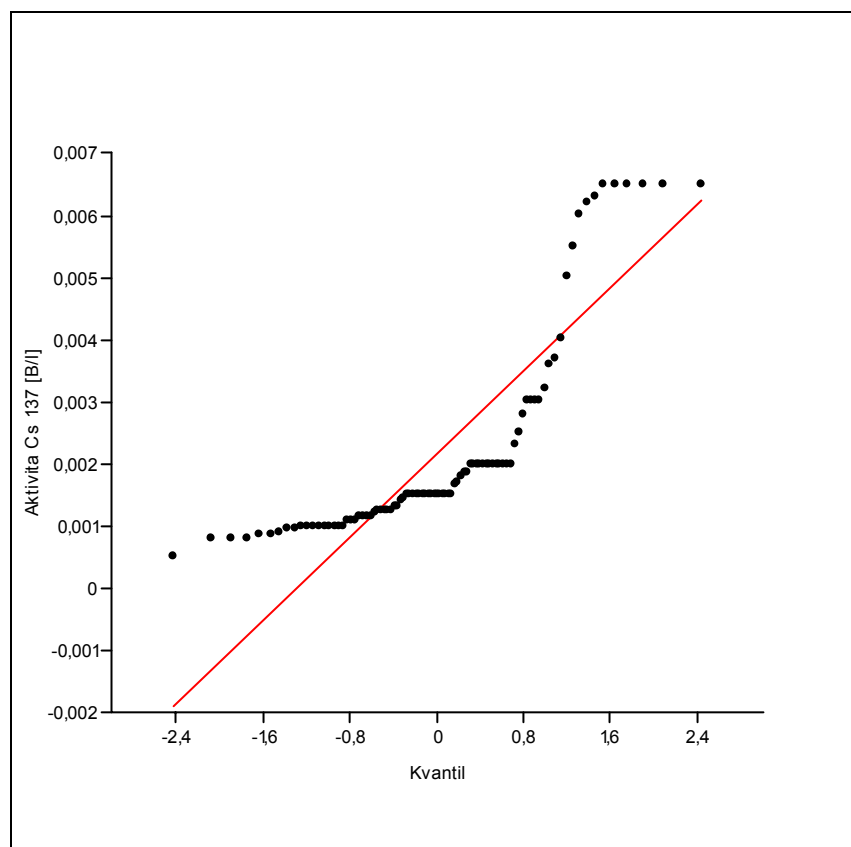
Stř. hodnota	0,00174
Chyba stř. hodnoty	0,000112
Medián	0,0015
Modus	0,0015
Směr. odchylka	0,001011
Rozptyl výběru	1,02E-06
Špičatost	8,455565
Šikmost	2,552886
Rozdíl max-min	0,0058
Minimum	0,0005
Maximum	0,0063
Součet	0,14265
Počet	82
Hladina spolehlivosti (95,0%)	0,000222



**graf 7 Histogram pro povrchové vody**

V histogramu pro povrchové vody (graf 7) vidíme asymetrické rozložení a přítomnost odlehlých bodů.

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu je nutno zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 8. v něm jsou patrné odchylky od normálního rozdělení (červená přímka) a odlehlé hodnoty.



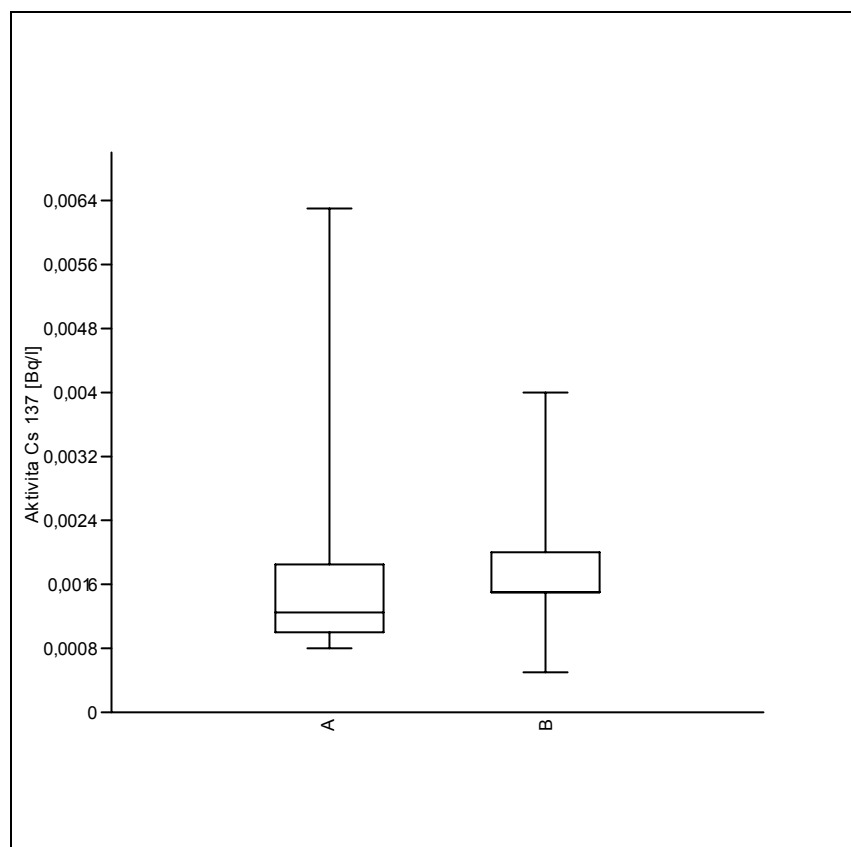
**graf 8 Q-Q graf pro povrchové vody**

V dalším postupu testování statistických hypotéz nelze tedy u souboru povrchových vod použít parametrické testy. Pro srovnání shody rozdělení (mediánů) předprovozního a provozního monitorování byl zvolen neparametrický Mann-Whitneyův test.

Mann-Whitneyův test, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy o shodě rozdělení (rovnosti mediánů) na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ . ( $p_{\text{same}} = 0,0191$ )

Závěr: Rozdíl mediánů souborů dat z předprovozního a provozního monitorování ETE povrchových vod je statisticky nevýznamný. Grafické znázornění na krabicovém grafu (graf 9).





**graf 9** Krabicový graf pro povrchové vody. A - před spuštěním, B - po spuštění

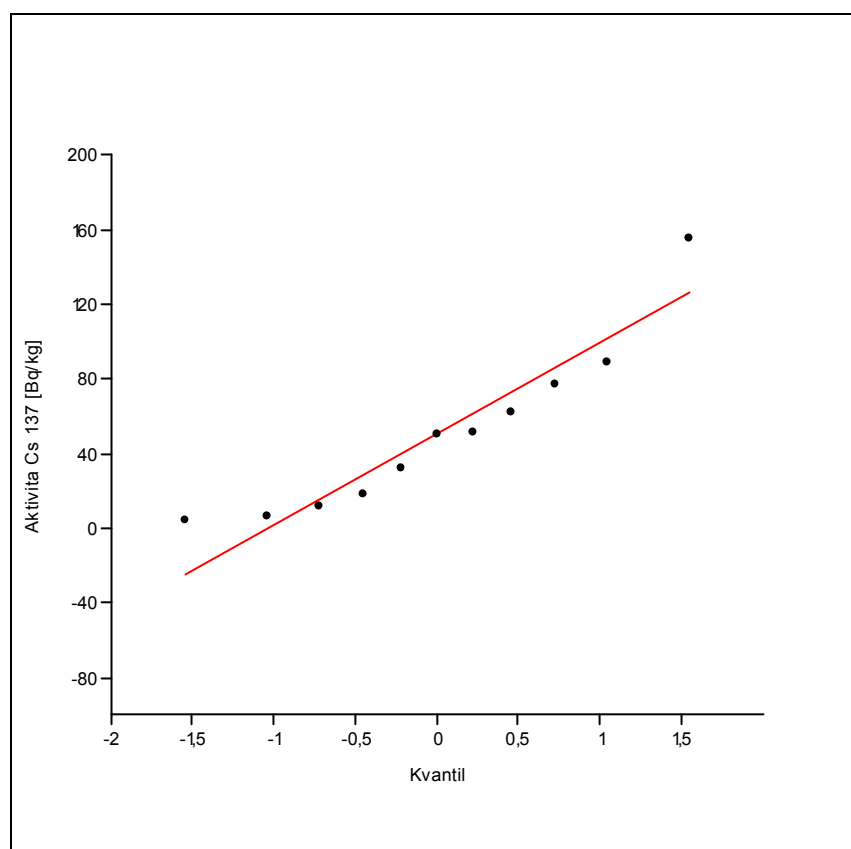
### 6.1.2 Sedimenty

V tabulce 11 jsou znázorněny prvky popisné statistiky pro výsledky měření  $^{137}\text{Cs}$  v sedimentech.

**tabulka 11 Popisná statistika pro sedimenty**

Stř. hodnota	39,9005
Chyba stř. hodnoty	9,567435813
Medián	40,65
Modus	#N/A
Směr. odchylka	30,25488854
Rozptyl výběru	915,3582803
Špičatost	-1,313566203
Šikmost	0,293027955
Rozdíl max-min	84,89
Minimum	3,68
Maximum	88,57
Součet	399,005
Počet	10
Největší (1)	88,57
Nejmenší (1)	3,68
Hladina spolehlivosti (95,0%)	21,64305995

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu nelze zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 10.



**graf 10 Q-Q graf pro sedimenty**

V dalším postupu testování statistických hypotéz lze u souboru dat vzorků sedimentů použít parametrické testy. Pro testování shody středních hodnot dat z období před a po zahájení provozu ETE byl zvolen dvouvýběrový Studentův t-test. Tomuto parametrickému testu musí předcházet porovnání rozptylů dvou nezávislých výběrů F-testem.

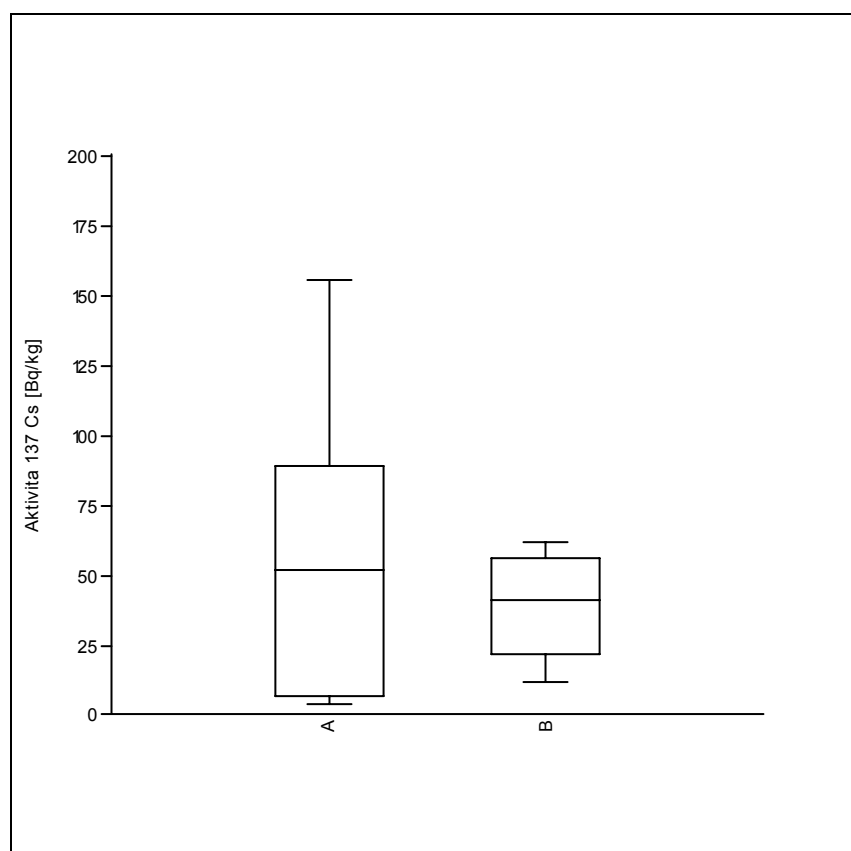
Dvouvýběrový F-test shodnosti rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,161$ )

**Závěr:** Rozdíl mezi rozptyly souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování je statisticky nevýznamný.

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,538$ )

Závěr: Rozdíl mezi středními hodnotami souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování je statisticky nevýznamný.

Grafické znázornění viz graf 11



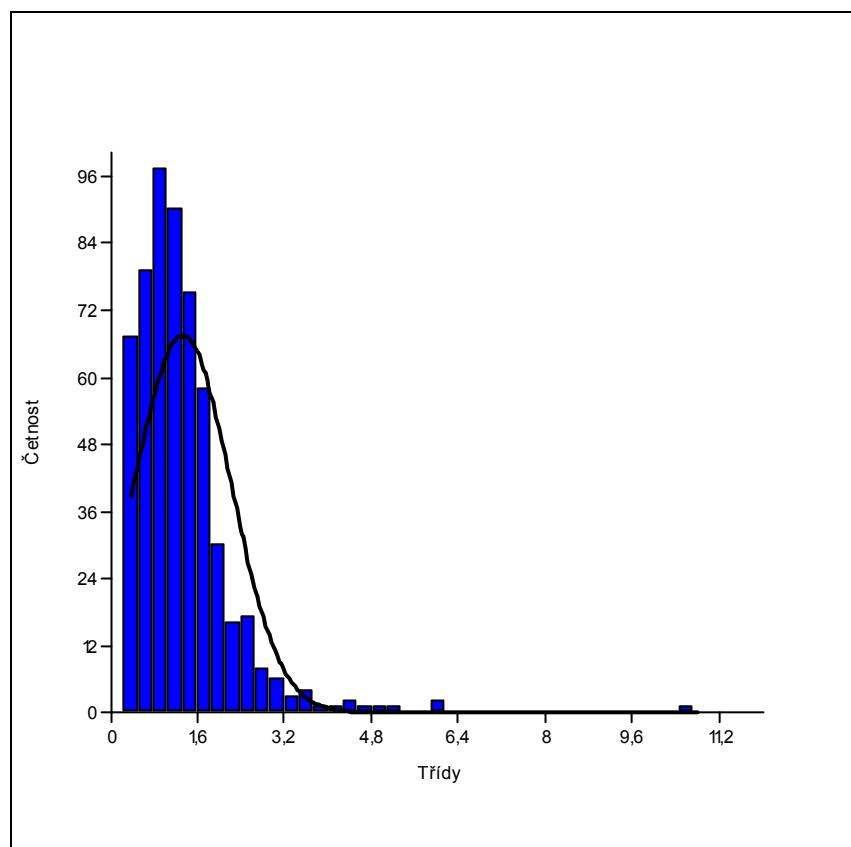
graf 11 Krabicový graf pro sedimenty. A - před spuštěním, B - po spuštění

### 6.1.3 Aerosoly

V tabulce 9 jsou znázorněny prvky popisné statistiky pro výsledky měření  $^{137}\text{Cs}$  v aerosolech.

**tabulka 12** popisná statistika pro aerosoly

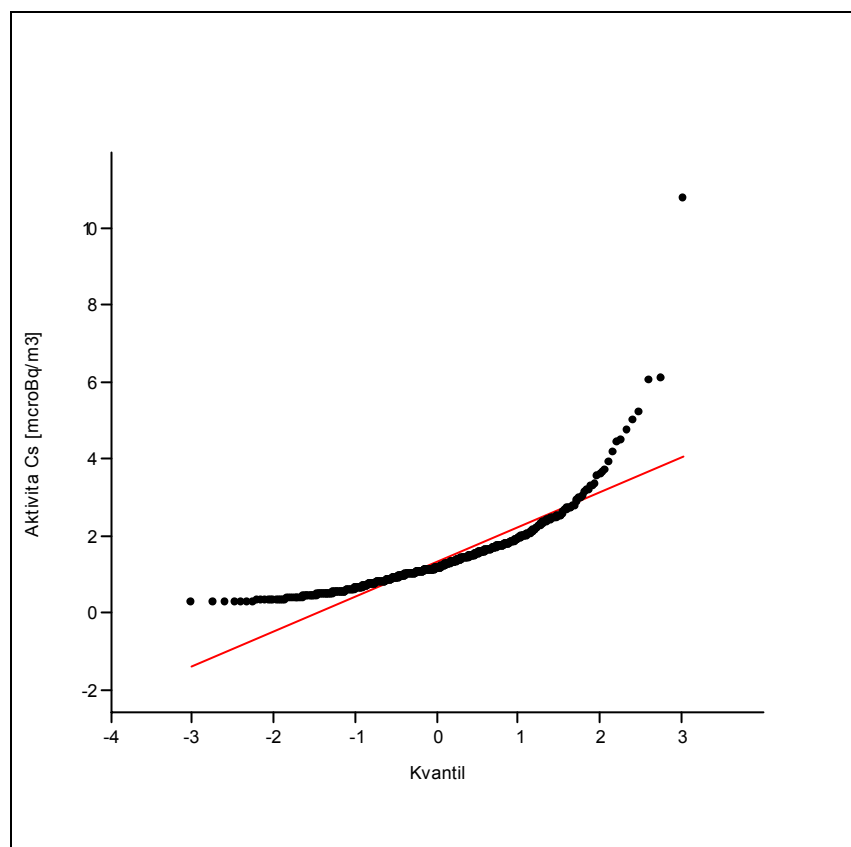
Stř. hodnota	1,310579464
Chyba stř. hodnoty	0,037736492
Medián	1,121
Modus	0,95
Směr. odchylka	0,893008391
Rozptyl výběru	0,797463987
Špičatost	25,49516237
Šikmost	3,490650425
Rozdíl max-min	10,48675
Minimum	0,23325
Maximum	10,72
Součet	733,9245
Počet	560
Hladina spolehlivosti (95,0%)	0,074122679



**graf 12 histogram pro aerosoly**

V histogramu pro aerosoly (graf 12) vidíme asymetrické rozložení, sešikmení k vyšším hodnotám a přítomnost odlehlých bodů.

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu je nutno zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 14. V něm jsou patrné odchylky od normálního rozdělení (červená přímka) a odlehlé hodnoty.

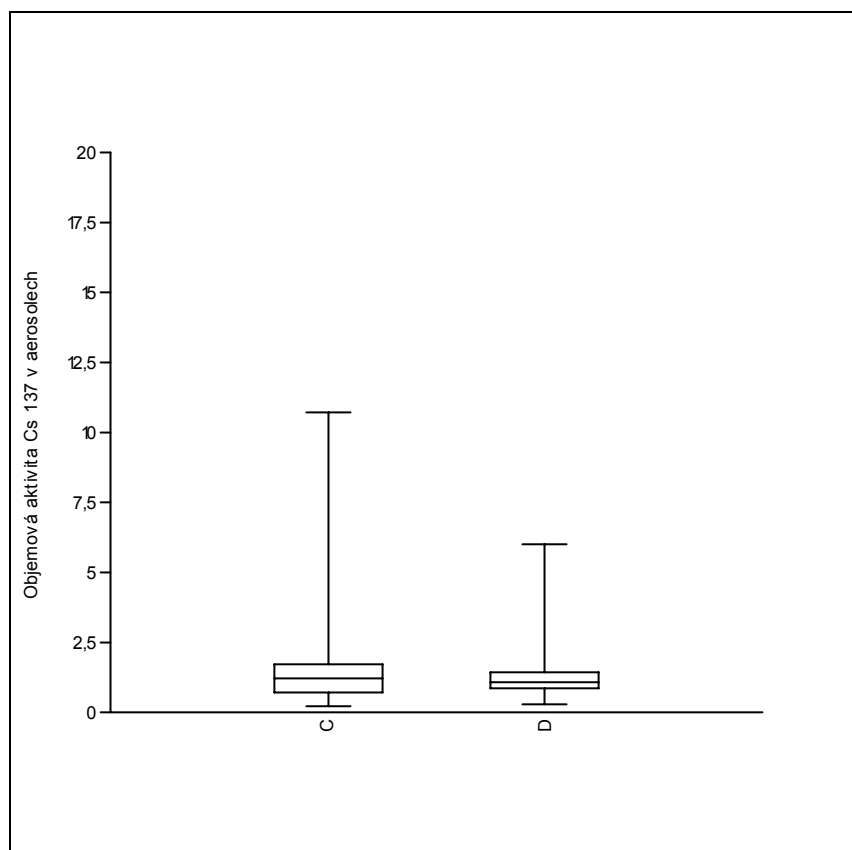


graf 13 Q-Q graf pro aerosoly

V dalším postupu testování statistických hypotéz nelze tedy u souboru výsledků měření aerosolů použít parametrické testy. Pro srovnání shody rozdělení (mediánů) předprovozního a provozního monitorování byl zvolen neparametrický Mann-Whitneyův test.

Mann-Whitneyův test, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy o shodě rozdělení (rovnosti mediánů) na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,103$ )

Závěr: Rozdíl mediánů souborů dat z předprovozního období a z období po zahájení provozu ETE je statisticky nevýznamný. Graficky znázorněno na krabicovém grafu pro aerosoly (graf 14).



**graf 14 Krabicový graf pro aerosoly, C před spuštěním, D po spuštění**

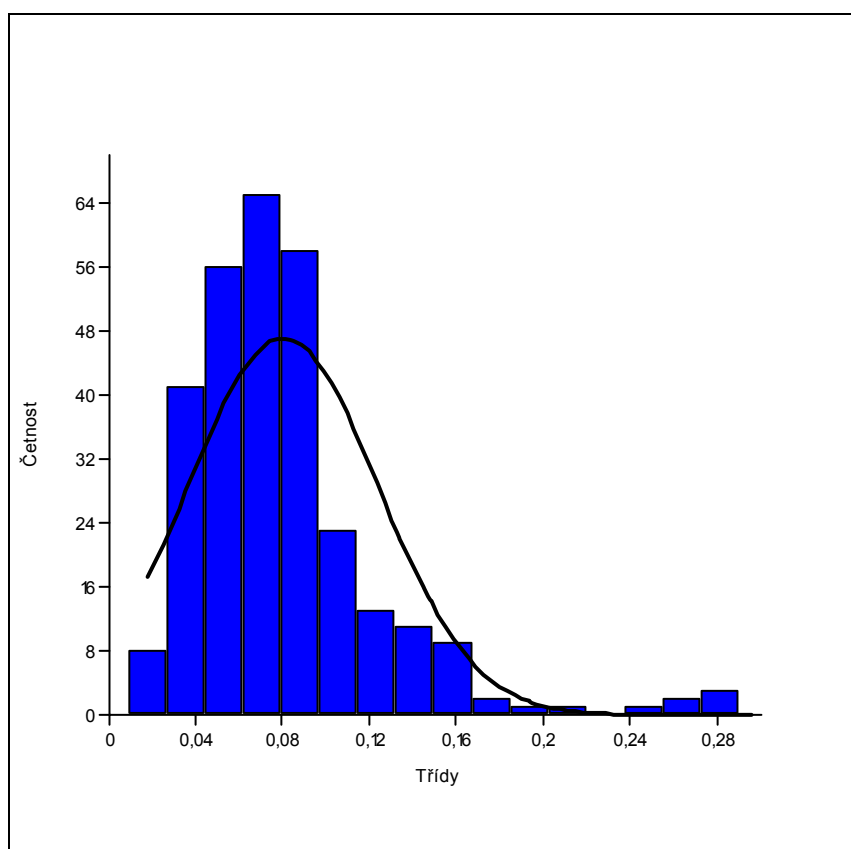
#### 6.1.4 *Mléko*

V tabulce 13 jsou znázorněny prvky popisné statistiky pro výsledky měření  $^{137}\text{Cs}$  v mléce.



tabulka 13 popisná statistika pro mléko

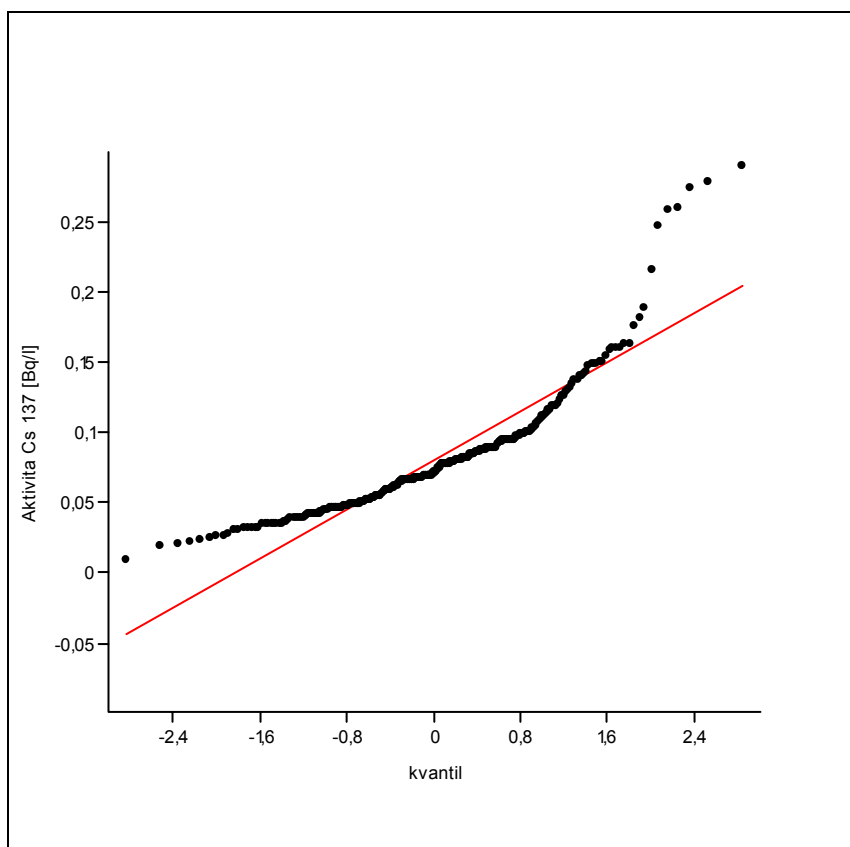
Stř. hodnota	0,079671
Chyba stř. hodnoty	0,00256
Medián	0,07
Modus	0,065
Směr. odchylka	0,043969
Rozptyl výběru	0,001933
Špičatost	5,717006
Šikmost	1,950547
Rozdíl max-min	0,29
Minimum	0
Maximum	0,29
Součet	23,503
Počet	295
Hladina spolehlivosti (95,0%)	0,005038



graf 15 Histogram mléko

V histogramu pro mléko (graf 15) vidíme asymetrické rozložení a přítomnost odlehlých bodů. Graf je sešikmen více k vyšším hodnotám.

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu je nutno zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 15. v něm jsou patrné odchylky od normálního rozdělení (červená přímka) a odlehlé hodnoty. Odlehlé hodnoty pocházejí z období před spuštěním elektrárny a pravděpodobně souvisí s Černobylem a testy jaderných zbraní.

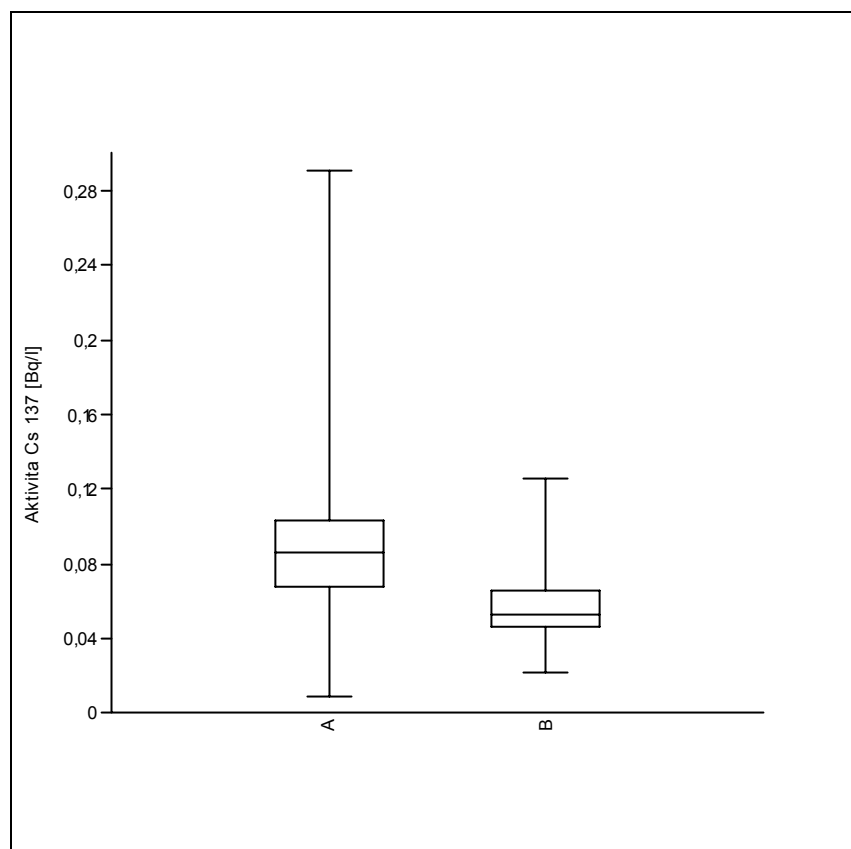


graf 16 Q-Q graf mléko

V dalším postupu testování statistických hypotéz nelze tedy u souboru mléka použít parametrické testy. Pro srovnání shody rozdělení (mediánů) předprovozního a provozního monitorování byl zvolen neparametrický Mann-Whitneyův test.

Mann-Whitneyův test, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy o shodě rozdělení (rovnosti mediánů) na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,0609$ )

Závěr: Rozdíl mediánů souborů dat z předprovozního a provozního monitorování ETE mléka je statisticky nevýznamný. Graficky znázorněno na krabicovém grafu pro aerosoly (graf 17).



graf 17 krabicový graf pro mléko, A - před spuštěním, B - po spuštění

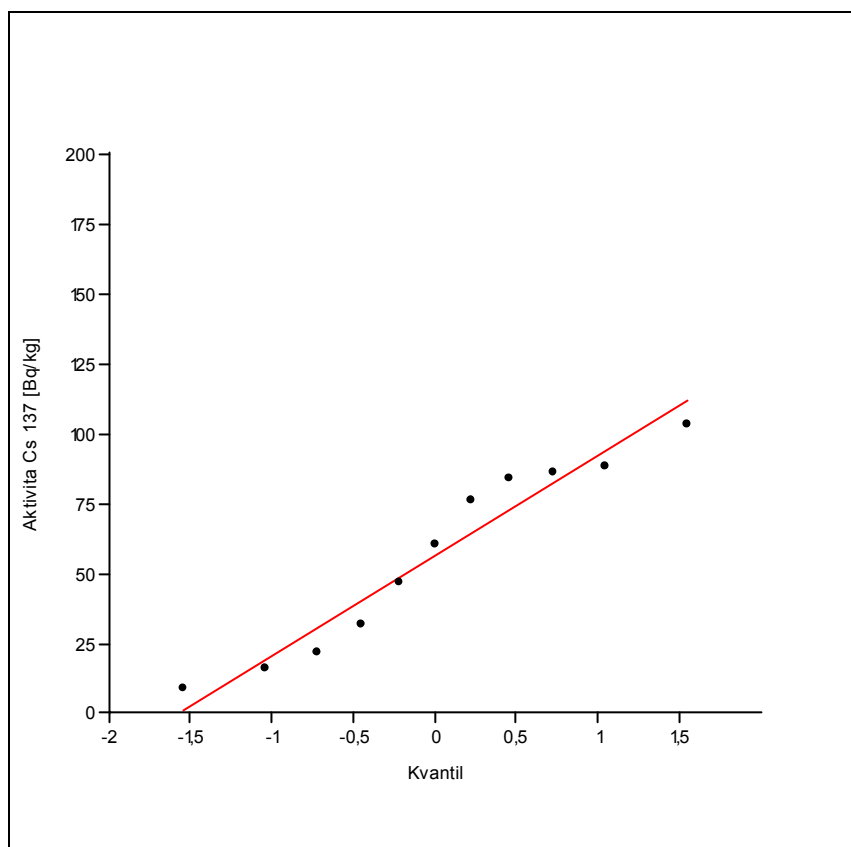
#### 6.1.4.1 Neobdělávané půdy odebrané z hloubky 0 – 5 cm

V tabulce 12 jsou znázorněny prvky popisné statistiky pro výsledky měření  $^{137}\text{Cs}$  v půdách.

**tabulka 14 Popisná statistika, půdy 0 - 5 cm**

Stř. hodnota	56,20909
Chyba stř. hodnoty	9,973656
Medián	59,8
Modus	#N/A
Směr. odchylka	33,07888
Rozptyl výběru	1094,212
Špičatost	-1,61051
Šikmost	-0,16423
Rozdíl max-min	94
Minimum	8,5
Maximum	102,5
Součet	618,3
Počet	11
Hladina spolehlivosti (95,0%)	22,22269

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu nelze zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 19.



**graf 18 Q-Q graf, neobdělávané půdy, hloubka 0 - 5 cm**

V dalším postupu testování statistických hypotéz lze u souboru dat vzorků půd použít parametrické testy. Pro testování shody středních hodnot dat z období před a po zahájení provozu ETE byl zvolen dvouvýběrový Studentův t-test. Tomuto parametrickému testu musí předcházet porovnání rozptylů dvou nezávislých výběrů F-testem.

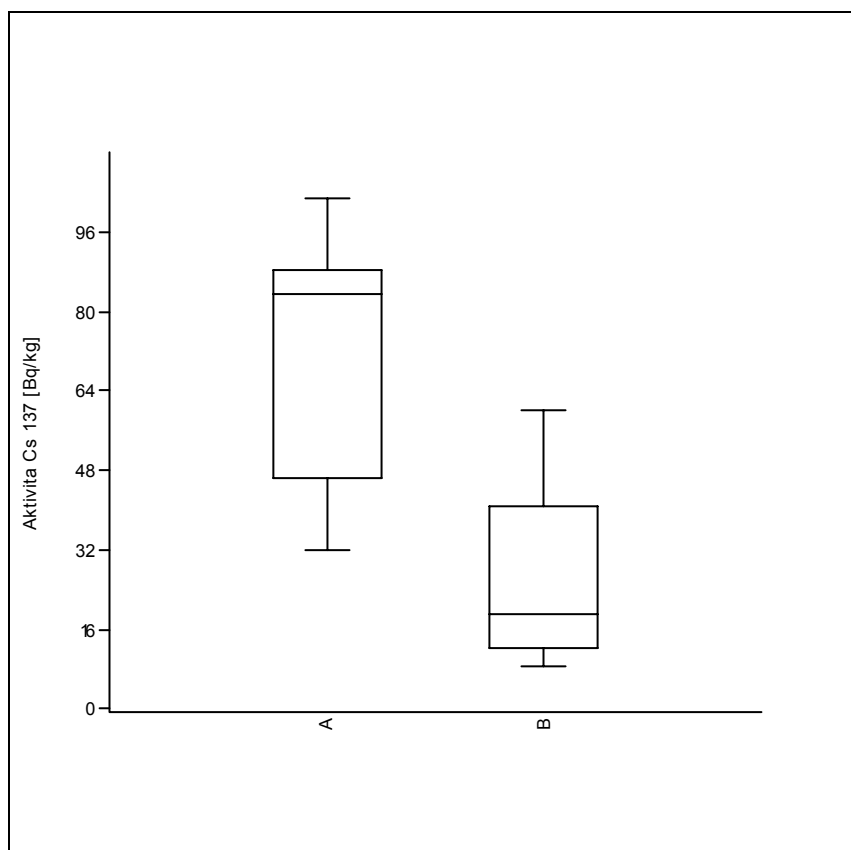
Dvouvýběrový F-test shodnosti rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,952$ )

Závěr: Rozdíl mezi rozptyly souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování je statisticky nevýznamný.

Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ . ( $p_{\text{same}} = 0,0134$ )

Závěr: Rozdíl mezi středními hodnotami souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování neobdělávaných půd v hloubce 0 – 5 cm je statisticky nevýznamný.

Grafické znázornění viz graf 18



graf 18 Krabicový graf, neobdělávané půdy, hloubka 0 - 5 cm, A – před spuštěním, B – po spuštění

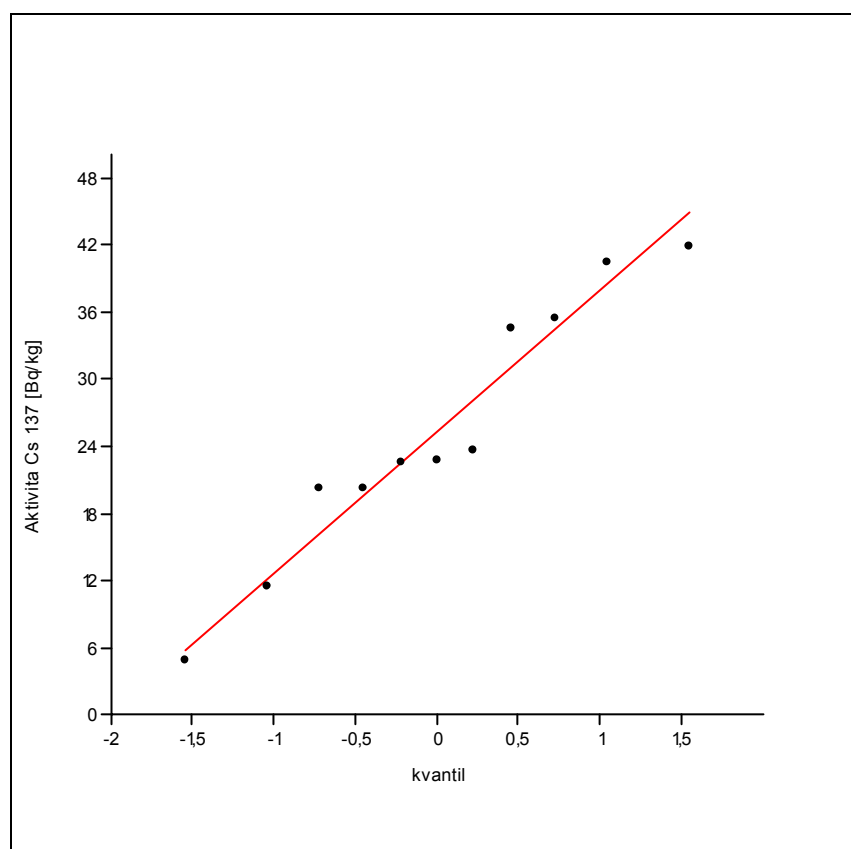
#### 6.1.4.2 Neobdělávané půdy, hloubka 5 – 10 cm

V tabulce 13 jsou znázorněny prvky popisné statistiky pro výsledky měření  $^{137}\text{Cs}$  v půdách.

**tabulka 15 Popisná statistika, neobdělávané půdy, hloubka 5 - 10 cm**

Stř. hodnota	25,20727
Chyba stř. hodnoty	3,521591
Medián	22,7
Modus	#N/A
Směr. odchylka	11,6798
Rozptyl výběru	136,4177
Špičatost	-0,65843
Šikmost	-0,12335
Rozdíl max-min	36,96
Minimum	4,8
Maximum	41,76
Součet	277,28
Počet	11
Hladina spolehlivosti (95,0%)	7,846596

V dalším kroku explorativní analýzy je ověření předpokladů o datech, zejména normality rozdělení souboru hodnot. Na základě testu korelačního koeficientu Q-Q diagramu nelze zamítnout nulovou hypotézu o normálním rozdělení výběru na hladině významnosti 95 %. Graficky je to znázorněno v grafu 22.



**graf 19 Q-Q graf, neobdělávané půdy, hloubka 5 - 10 cm**

V dalším postupu testování statistických hypotéz lze u souboru dat vzorků neobdělávaných půd použít parametrické testy. Pro testování shody středních hodnot dat z období před a po zahájení provozu ETE byl zvolen dvouvýběrový Studentův t-test. Tomuto parametrickému testu musí předcházet porovnání rozptylů dvou nezávislých výběrů F-testem.

Dvouvýběrový F-test shodnosti rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . ( $p_{\text{same}} = 0,996$ )

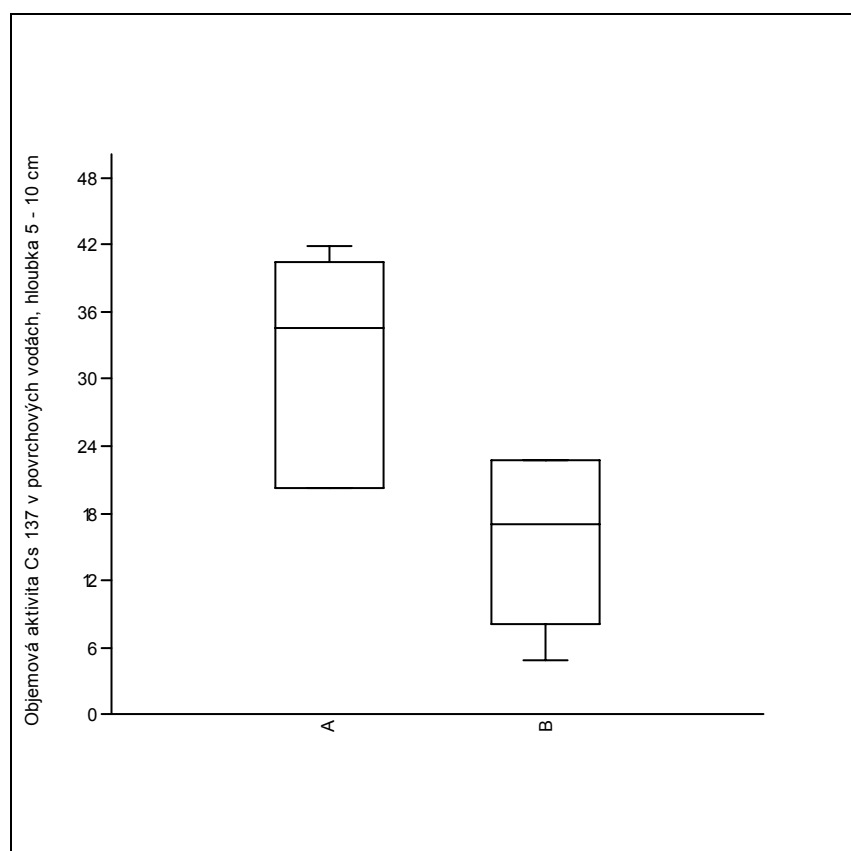
**Závěr:** Rozdíl mezi rozptyly souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování je statisticky nevýznamný.



Dvouvýběrový t-test s rovností rozptylů, oboustranná alternativa (two tailed) neposkytl dostatek evidence k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti  $\alpha = 0,01$ . ( $p_{\text{same}} = 0,029$ )

Závěr: Rozdíl mezi středními hodnotami souborů hodnot naměřených v průběhu předprovozního a provozního monitorování neobdělávaných půd v hloubce 0 – 5 cm je statisticky nevýznamný.

Grafické znázornění viz graf 23.



graf 20 Krabicový graf, půdy, hloubka 5 - 10 cm, A – před spuštěním, B – po spuštění

## 7 Diskuze

K posouzení vlivu provozu Jaderné elektrárny Temelín byly shromážděny údaje z různých vzorků životního prostředí z let 1995 až 2005. Tyto vzorky byly odebírány a měřeny v souladu s Programem monitorování okolí vyžadovaným vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. Vzorky byly voleny s ohledem na to, aby pokryly celou oblast monitorování životního prostředí, aby byly zastoupeny voda, země, vzduch i potraviny, a zároveň s přihlédnutím k dostatečnému množství dat potřebných ke statistickému zpracování

a posouzení vlivu na životní prostředí. Časové rozmezí rovněž umožnilo zpracovat potřebný počet hodnot, ať už před spuštěním elektrárny, tak také po spuštění (data byla shromažďována v průběhu roku 2006, ten tudíž nemohl být zařazen do zpracování). Jako první rok, kdy byl uvažován možný vliv provozu JE Temelín na životní prostředí, byl zvolen rok 2002, ve kterém byl oficiálně zahájen provoz prvního výrobního bloku.

Pro posouzení vlivu na životní prostředí byly zvoleny následující složky životního prostředí či zemědělské produkty, které byly monitorovány Laboratoří radiační kontroly okolí JE Temelín:

- povrchové vody z lokality Hladná
- týdenní vzorky aerosolů (spojený vzorek)
- říčních sedimentů z lokality Hladná
- neobdělávané půdy z lokality Litoradlice (2 různé vrstvy půdy)
- vzorky mléka ze zemědělského družstva v zóně havarijního plánování JE Temelín

U těchto složek byly posuzovány gamaspektrometricky měřitelné  $^{137}\text{Cs}$ .

Vzorky povrchových vod z lokality Hladná byly od roku 1995 do roku 2000 odebírány kvartálně, poté jednou za měsíc. Sledována byla objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$ , v  $\text{Bq.l}^{-1}$ . Od dubna roku 2005 se při vyhodnocení použilo jiné metodiky, díky které došlo ke zvýšení detekčních mezí. Ke statistickému zpracování jsem použila jen výsledky do března roku 2005 z důvodu zachování větší objektivity. V případech, že se

změřená hodnota nacházela pod minimální detekovatelnou aktivitou metody stanovení, nahradil se pro další zpracování takový údaj hodnotou jedné poloviny uvedené minimální detekovatelné aktivity, což přibližně odpovídá minimální významné aktivitě. Tím mohly být získané výsledky nadhodnoceny, vyjadřovaly však vyšší míru bezpečnosti než v případě, že by byly považovány za nulové.

U souboru dat byla nejdříve provedena popisná statistika, která poskytuje základní informace o příslušném znaku souboru. Poté byl proveden test normality rozdělení jako předpoklad pro výběr statistického testu. U souboru dat povrchových vod nebylo možno potvrdit, že rozdělení hodnot souboru je normální a bylo tudíž ke zpracování nutno zvolit neparametrický Mann – Whitneyův test. Ten prokázal, na hladině významnosti  $\alpha = 99 \%$ , že oba soubory, před i po spuštění, se statisticky neliší, což bylo zřejmé i z příslušného krabicového grafu. Odlehlé hodnoty souvisejí s kolísajícími hodnotami MDA mezi jednotlivými měřeními.

Vzorky aerosolů byly měřeny jako spojený vzorek ze stabilních stanic radiační kontroly okolí JE Temelín s periodou 1 týden posuzována byla objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách  $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nejdříve byla vypracována popisná statistika. Poté byl proveden test normality rozdělení jako předpoklad pro výběr statistického testu. U souboru výsledků měření aerosolů nebylo možno potvrdit, že soubor dat má normální rozdělení a bylo tedy nutno zvolit neparametrický Mann – Whitneyův test. Ten prokázal, na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ , že oba soubory, před i po spuštění, se statisticky neliší a toto bylo možno ověřit i na příslušném krabicovém grafu. I v souboru dat aerosolů se vyskytovaly dvě odlehlé hodnoty, které mohly ovlivnit výsledky testování. Ve 24. týdnu roku 1998 bylo změřena objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$   $10,72 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , která byla způsobena radiační nehodou ve Španělsku, kdy došlo v hutích k roztavení césiového zářiče. Ve 45. týdnu roku 2004 byla naměřena objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$   $<9,9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ , jejíž příčinou byla vysoká mez detekce, způsobená přítomností rozpadových produktů uranové a thoriové řady, konkrétně  $^{212}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Bi}$ .

Vzorky říčních sedimentů byly odebírány v lokalitě Hladná jednou ročně. Byla zjišťována hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Po vypracování popisné statistiky byl proveden test normality, který ukázal, že sledovaný soubor dat má

normální rozdělení. Ke statistickému zpracování byl proto zvolen parametrický dvouvýběrový Studentův t-test o shodě středních hodnot s rovností rozptylů. Tomu ale musel předcházet F-test, dvouvýběrový test shodnosti rozptylů. U obou těchto testů byla přijata nulová hypotéza, že rozdíly rozptylů i středních hodnot dvou nezávislých výběrů jsou statisticky nevýznamné na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ . Vzhledem k velmi malému počtu dat (11), však mají testy velmi malou vypovídací hodnotu a musíme se spolehnout na příslušný krabicový graf. Ten neukazuje žádné navýšení hodnot po spuštění elektrárny.

Vzorky mléka byly získávány ve Výrobně obchodním družstvu Všemyslice s periodou 14 dní a měřena objemová aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách  $\text{Bq.l}^{-1}$ . Po vypracování popisné statistiky a testu normality byl k testování vybrán neparametrický Mann – Whitneyův test, protože soubor nevykazoval normální rozdělení. Ten prokázal, na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ , že oba soubory, před i po spuštění, se statisticky neliší a toto bylo možno ověřit i na příslušném krabicovém grafu. Odlehlé hodnoty z let 1995 a 1997 mohou souviset s následkyhavárie elektrárny Černobyl.

Vzorky neobdělávaných půd byly odebírány v lokalitě Litoradlice jednou ročně, z hloubky 0 – 5 cm a 5 – 10 cm a měřeny na přítomnost radionuklidů  $^{137}\text{Cs}$  v jednotkách plošné aktivity ( $\text{Bq.m}^{-2}$ ). U obou těchto souborů byla provedena popisná statistika a test normality rozdělení. Oba soubory vykazují normální rozdělení a bylo proto možno u obou použít k testování statistických hypotéz Studentova t-testu o shodě středních hodnot s rovností rozptylů. Tomu ale musel předcházet F-test, dvouvýběrový test shodnosti rozptylů. U obou těchto testů obou souborů (neobdělávaných půd s hloubkou 0 – 5 cm i 5 – 10 cm) byla přijata nulová hypotéza, že rozdíly rozptylů i středních hodnot dvou nezávislých výběrů jsou statisticky nevýznamné, na hladině významnosti  $\alpha = 95 \%$ . Vzhledem k velmi malému počtu dat (11) v obou hloubkách, však mají testy velmi malou vypovídací hodnotu a musíme se spolehnout na příslušné krabicové grafy. Ty neukazují žádné navýšení hodnot po spuštění elektrárny.

Cílem práce bylo potvrdit nebo vyvrátit hypotézy, že soubory naměřených hodnot před a po spuštění se statisticky neliší a Jaderná elektrárna Temelín nemá

významný vliv na životní prostředí. Z uvedených výsledků vyplývá, že došlo k potvrzení obou hypotéz, v čemž se shodují s většinou odborných článků (34, 25, 30).

Jaderná elektrárna se snaží pracovat bezpečně, aby minimálně ohrožovala své zaměstnance a okolí především negativními produkty své činnosti jako jsou odpadní vody, odpady aktivní i neaktivní, emise do ovzduší a zásahy do fauny a flóry vně i uvnitř podniku. Jsou preventivně řízena specifikovaná rizika, jsou stanoveny cíle a programy na minimalizaci těchto rizik, jsou monitorovány a vyhodnocovány případné odchylky. (1)

V této práci nebyl hodnocen vliv radiačních mimořádných událostí na životní prostředí (ty byly pracovány v jiných pracích, např. (34)), pouze vliv běžného provozu a ten se ukázal jako statisticky nevýznamný.

Výše uvedené výsledky posouzení vlivu JE Temelín na životní prostředí korespondují s výsledky monitorování výpustí z této elektrárny. Výsledky monitorování plyných i kapalných výpustí v období 2002 až 2005 a jejich konzervativní přepočty na ozáření kritického jedince v okolí JE Temelín prokazují, že jsou dodržovány autorizované limity pro plyné i kapalně výpusti dané příslušnými rozhodnutími Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

Pokud jde o vlivy elektrárny jako celku, znečištění kapalných či plyných výpustí radionuklidy ani jejich působení na okolí nepřekračuje míru stanovenou příslušnými zákonnými předpisy. Prakticky je lze hodnotit jako velmi nízké, hluboko v pásmu kolísání přirozeného pozadí. (30)

## 8 Závěr

Ve své práci jsem provedla statistickou analýzu dat získaných při předprovozním a provozním monitorování obsahu nuklidů záření gama ve vybraných vzorcích životního prostředí v okolí ETE.

U monitorovaných složek jako jsou povrchové vody, aerosoly a mléko, kde byla statistická analýza vzhledem k dostačujícímu počtu dat relevantní, bylo prokázáno (pomocí neparametrického Mann – Whitneyova testu), že hodnoty před a po spuštění se statisticky významně neliší. Nebyl tedy prokázán vliv JE Temelín na životní prostředí.

U monitorovaných složek jako jsou sedimenty či neobdělávané půdy bylo také prováděno statistické testování a to pomocí parametrického Studentova t-testu. Jeho výsledkem bylo potvrzení nulové hypotézy, že střední hodnoty měrných aktivit před spuštěním a po spuštění JE Temelín se statisticky významně neliší. Vzhledem k malému množství dat, danému ročním periodou odběru vzorků, je vypovídací hodnota t-testu nízká a proto byly pro posouzení vlivu na životní prostředí u těchto složek použity příslušné krabicové grafy. Z nich vyplývá, že ani u těchto složek nebyl prokázán vliv JE Temelín na životní prostředí.

Uvedené závěry nejsou nijak překvapivé a potvrzují jen další studie vlivu ETE na životní prostředí.

## 9 Seznam použité literatury

1. Bezpečnost jaderné energie. Praha. 2005. 13(51). ½. 6 - 55
2. ČECHÁK, T., KLUSOŇ, J. - Biomonitoring atmosférické depozice radionuklidů v okolí Jaderné elektrárny Temelín v roce 2000. ČVUT Praha. 2001
3. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín. Odbor komunikace JE Temelín. 1998
4. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín – Energie z jižních Čech. Informační středisko jaderné elektrárny Temelín
5. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 1995.
6. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 1996.
7. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 1997.
8. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 1998
9. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 1999
10. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2000

11. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2001
12. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2002
13. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2003
14. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2004
15. ČEZ - Jaderná elektrárna Temelín - Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2005.
16. HAMMER, O., HARPER D. A. T. *PAST* [počítačový program]. Ver.1.67, 2007
17. HAMMER, O., HARPER, D. A. T., RYAN P. D. *PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, no.1, s. 9.
18. <http://AstroNuklFyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>
19. <http://kostelec.czu.cz/temelin/>
20. JANOVSKEJ, D. Plynné výpusti  $^{14}\text{C}$  z ETE. České Budějovice. 2007.
21. KLENER, V. et al. - Principy a praxe radiační ochrany. Azin CZ, Praha. 2000. 619s.  
ISBN 80-238-3703-6



22. LUKÁŠOVÁ, K. - Kinetika  $^{137}\text{Cs}$  v životním prostředí. České Budějovice. 2005.  
91 s.
23. MELOUN, M., MILITKÝ, J. – Kompendium statistického zpracování dat.  
Academia Praha. 2000.  
ISBN 80-200-1008-4
24. OHERA, M. – Úvod do polovodičové gamaspektrometrie
25. PECHAROVÁ, E., BROUMOVÁ, H. - Hodnocení vlivů jaderné elektrárny  
Temelín na životní prostředí. České Budějovice. 2004  
ISBN 80-7040-710-7
26. RYAN, T. A., JOINER, B. L. – Normal probability plots and tests for normality.  
Minitab Statistical Software: technical Reports, November, 1 – 1 to 1 – 14. 1990.
27. SVOBODA, E. – Přehled středoškolské fyziky. Prométheus. Praha. 2001. 3. vyd.  
497 s.  
ISBN 80-7196-116-7
28. ŠTOLL, I. Fyzika mikrosvěta. Prométheus. Praha. 2003. 3. vyd. 190 s.  
ISBN 80-7196-241-4
29. Vyhláška SÚJB č. 184/1997 Sb., o požadavcích na zajištění radiační ochrany
30. [www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/ekonomika/je\\_cast\\_c01.html](http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/ekonomika/je_cast_c01.html)
31. [www.suro.cz/prirodnimapy/geolprogncr.html](http://www.suro.cz/prirodnimapy/geolprogncr.html)
32. [www.podnikame.cz/zakony99/index.php3?co=Z1999011](http://www.podnikame.cz/zakony99/index.php3?co=Z1999011)

33. Zákon č.18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon)
34. ZELENÁ, L. – Rizika provozu jaderných elektráren z hlediska životního prostředí. České Budějovice. 2005. 118 s.
35. ZVÁROVÁ, J. – Základy statistiky pro biomedicínké obory. Karolinum. Praha. 1998. 218s.  
ISBN 80-7184-786-0

### **9.1 Seznam legislativy související s radiační ochranou**

- Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon)
- 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, ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška SÚJB č. 144/1997 Sb., o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií
- Vyhláška SÚJB č. 145/1997 Sb., o evidenci a kontrole jaderných materiálů a o jejich bližším vymezení
- 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

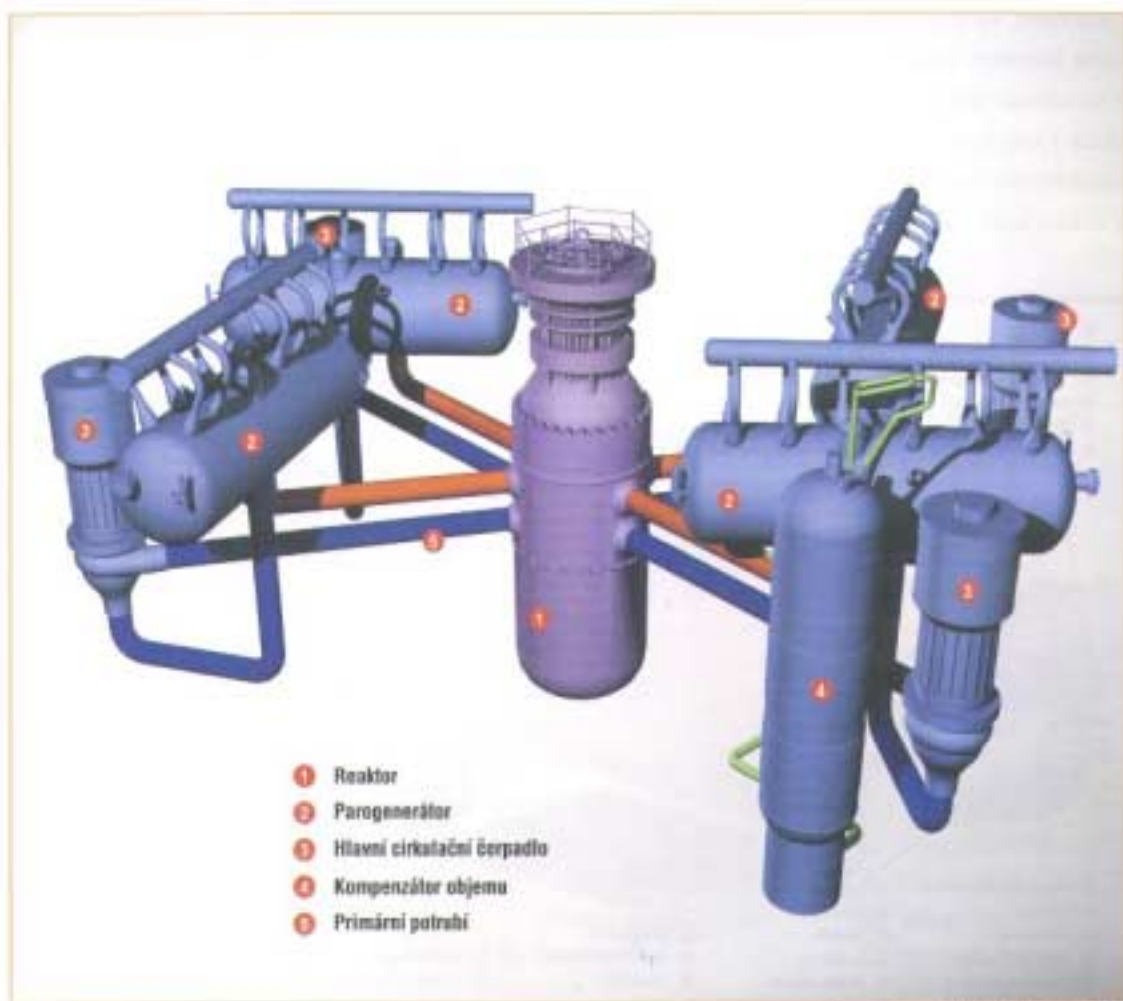
ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků

- Vyhláška SÚJB č. 184/1997 Sb., o požadavcích na zajištění radiační ochrany
- 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 na umístování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření
- Vyhláška SÚJB č. 219/1997 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. 106/1998 Sb., o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu
- Nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování
- Vyhláška SÚJB č. 195/1999 Sb., o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti
- Vyhláška Ministerstva vnitra č. 25/2000 Sb., kterou se stanoví podrobnosti ke zpracování havarijního plánu okresu a vnějšího havarijního plánu
- Zákon ČNR č. 244/1992 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí

## **10 Klíčová slova**

Záření gama - objemová aktivita - Jaderná elektrárna Temelín – radionuklid –  $^{137}\text{Cs}$

## 11 Přílohy



**Obrázek 3 Prostorové uspořádání primárního okruhu JE Temelín (4)**

<b>Počet reaktorových bloků</b>	2
<b>Instalovaný výkon 1 bloku</b>	981 MWe
<b>Reaktor</b>	tlakovodní VVER 1000, typ V 320
• tepelný výkon reaktoru	3000 MWt
<b>Aktivní zóna</b>	
• počet palivových souborů	163
• počet palivových proutků v 1 souboru	312
• obohacení paliva	max 5% <sup>235</sup> U
• palivová vsázka ( UO <sub>2</sub> )	92 t
• cyklus výměny paliva	čtyřletý
<b>Systém chlazení reaktoru</b>	
• počet chladicích smyček	4
• objem chladiva v primárním okruhu	337 m <sup>3</sup>
• pracovní tlak	15,7 MPa
• teplota chladiva na vstupu	cca 290 °C
• teplota chladiva na výstupu	cca 320 °C
• průtok chladiva reaktorem	23,5 m <sup>3</sup> /s
<b>Parogenerátor</b>	
• počet na blok	4
• odběr páry z 1 parogenerátoru	1470 t/hod
• odběr páry na výstupu	6,3 MPa
• teplota páry na výstupu	278,5 °C
<b>Ochranná obálka (kontejment)</b>	
• výška válcové části	38 m
• vnitřní průměr válcové části	45 m
• tloušťka stěny	1,2 m
• tloušťka ocelové výstelky	8 mm
<b>Turbosoustrojí</b>	
• počet na reaktorový blok	1
• počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 3 nízkotlaké
• otáčky	3000 min <sup>-1</sup>
• napětí na svorkách alternátoru	24 kV
• chlazení alternátoru	vodík - voda

Obrázek 4 Základní technické údaje JE Temelín (4)

tabulka 16 Nejčastěji se vyskytující radionuklidy (18)

Radionuklid	Poločas $T_{1/2}$	Způsob rozpadu	Energie[keV] $E_{\alpha}$ nebo $E_{\beta\max}$	Energie[keV] gama $E_{\gamma}$	Nejčastější způsob výroby	Použití
$^1_0\text{n}$	13 min	$\beta^-$	782	-	reaktor $^{235}\text{U}$ , ( $\alpha, n$ )	jaderná analýza
$^3_1\text{H}$	12,3 roku	$\beta^-$	18,6	-	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$	biologie
$^{14}_6\text{C}$	5730 roků	$\beta^-$	156	-	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$	biologie analýza
$^{18}_9\text{F}$	110 min.	$\beta^+(97\%)$ EC (3%)	633	511 (194%) (anihilace)	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	nukleární medicína
$^{32}_{15}\text{P}$	14,3 dne	$\beta^-$	1710	-	$^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$	nukleární medicína
$^{40}_{19}\text{K}$	$1,26 \cdot 10^9$ roků	$\beta^-$ (89%) EC (11%)	1314	1460 (11%)	přírodní radionuklid	
$^{51}_{24}\text{Cr}$	27,7 dne	EC	-	320 (9,8%)	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$	nukleární medicína
$^{57}_{27}\text{Co}$	271 dnů	EC	-	14 (9%) 122 (86%) 136 (11%) 692 (0,15%)	$^{56}\text{Fe}(d, n)^{57}\text{Co}$ $^{56}\text{Fe}(p, \gamma)^{57}\text{Co}$ $^{55}\text{Mn}(\alpha, 2n)^{57}\text{Co}$	zdroj gama
$^{58}_{27}\text{Co}$	70,8 dne	$\beta^+$ , EC	-	511 (30%) 810 (99%) 865 (1,5%) 1670 (0,6%)	$^{55}\text{Mn}(\alpha, n)^{58}\text{Co}$	biologie, nukleární medicína
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,271 roků	$\beta^-$	1480	1173 (100%) 1332 (100%)	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$	zdroj gama
$^{67}_{31}\text{Ga}$	48 hod.	EC	-	93 (40%) 184 (20%) 300 (17%) 393 (5%)	$^{68}\text{Zn}(p, 2n)^{67}\text{Ga}$	nukleární medicína
$^{68}_{31}\text{Ga}$	68 min.	$\beta^+(89\%)$ EC (11%)		511 (178%) (anihilace)	$^{68}\text{Zn}(p, n)^{68}\text{Ga}$	nukleární medicína
$^{81}_{37}\text{Rb}$ ↓↓↓↓↓	4,6 hod. ↓↓↓↓↓	EC ↓↓↓↓↓	-	190 (66%) 446 (19%)	$^{79}\text{Br}(\alpha, 2n)^{81}\text{Rb}$	generátor $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ↓↓↓↓↓



$^{81m}\text{Kr}_{36}$	13 sec.	IT	-	190 (67%)	$^{81}\text{Rb} \rightarrow ^{81m}\text{Kr}$	scintigrafie plic
$^{90}\text{Sr}_{38}$	28 let	$\beta^-$	546	-	$^{235}\text{U}(n,f)^{90}\text{Sr}$	
$^{90}\text{Y}_{39}$	64 hod.	$\beta^-$	2280	-	$^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y}$ $^{89}\text{Y}(n,\gamma)^{90}\text{Y}$	nukleární medicína
$^{99}\text{Mo}_{42}$ ↓↓↓↓↓	66 hod. ↓↓↓↓↓	$\beta^-$ ↓↓↓↓↓	436 (17%) 1214 (83%)	140 (6%) 181 (7%) 740 (13%) 778 (5%)	$^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ $^{235}\text{U}(n,f)^{99}\text{Mo}$	generátor $^{99m}\text{Tc}$ ↓↓↓↓↓
$^{99m}\text{Tc}_{43}$	6 hod.	IT	-	140 (90%)	$^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc}$	scintigrafie
$^{111}\text{In}_{49}$	2,8 dne	EC	-	171 (90%) 245 (94%)	$^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$	nukleární medicína
$^{123}\text{I}_{53}$	13,2 hod.	EC	-	$K_\alpha$ 27 (71%) $K_\beta$ 31 (16%) 159 (83%)	$^{121}\text{Sb}(\alpha,2n)^{123}\text{I}$	nukleární medicína
$^{125}\text{I}_{53}$	60 dní	EC	-	$K_\alpha$ 27 (112%) $K_\beta$ 31 (25%) 35 (6,5%)	$^{124}\text{Xe}(n,\gamma)^{125}\text{Xe}$ ↓ <sup>EC</sup> $^{125}\text{I}$	nukleární medicína (RIA)
$^{131}\text{I}_{53}$	8,04 dne	$\beta^-$	334 (7,5%) 606 (90%)	80 (2,5%) 284 (6%) 364 (81%) 637 (7%) 723 (2%)	$^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te}$ $^{235}\text{U}(n,f)^{131}\text{Te}$ $\beta^-$ (25min): $^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$	nukleární medicína
$^{133}\text{Xe}_{54}$	5,3 dne	$\beta^-$	346	$K_\alpha$ 31 (39%) $K_\beta$ 35 (9%) 81 (37%)	$^{235}\text{U}(n,f)^{133}\text{Xe}$	nukleární medicína
$^{137}\text{Cs}_{55}$	30 roků	$\beta^-$	1176	$K_\alpha$ 32 (6%) $K_\beta$ 36 (1,5%) $\gamma$ 662 (85%)	$^{235}\text{U}(n,f)^{137}\text{Cs}$	zdroj gama
$^{192}\text{Ir}_{77}$	74,2 dne	$\beta^-$ (95%) EC(5%)	240 (8%) 536 (41%) 672 (46%)	296 (29%) 308 (30%) 317 (81%) 468 (49%) 604 (9%) 612 (6%)	$^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$ $^{192}\text{Os}(d,2n)^{192}\text{Ir}$	zdroj gama

$^{201}\text{Tl}_{81}$	73 hod.	EC	-	$K_{\alpha}$ 70 (74%) $K_{\beta}$ 80 (21%) 135 (2,6%) 167 (9%)	$^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$ $\downarrow_{\text{EC}}$ $^{201}\text{Tl}$	nukleární medicína
$^{226}\text{Ra}_{88}$	1602 roků	$\alpha$	4782	186 (4%)	přírodní radionuklid	zdroj alfa
$^{232}\text{Th}_{90}$	$1,41 \cdot 10^{10}$ roků	$\alpha$	4011		přírodní radionuklid	potenciální jaderné palivo
$^{235}\text{U}_{92}$	$7,1 \cdot 10^8$ roků	$\alpha$	4580	143 (11%) 185 (54%) 204 (5%)	přírodní radionuklid	štěpný materiál
$^{238}\text{U}_{92}$	$4,51 \cdot 10^9$ roků	$\alpha$	4195		přírodní radionuklid	jaderný reaktor
$^{239}\text{Pu}_{94}$	$2,44 \cdot 10^4$ roků	$\alpha$	5160		$^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ $\rightarrow(\beta^-)^{239}\text{Np}_3$ $\rightarrow(\beta^- \rightarrow)^{239}\text{Pu}$	štěpný materiál
$^{241}\text{Am}_{95}$	458 roků	$\alpha$	5486	$L_{\alpha}$ 13,9 (14%) $L_{\beta}$ 17,8 (20%) $L_{\gamma}$ 20,8 ( 5%) $\gamma$ 26,4 ( 3%) $\gamma$ 59,6 (36%)	$^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu}$ $(n,\gamma)^{241}\text{Pu}$ $\downarrow\beta^-$ $^{241}\text{Am}$	zdroj alfa a gama
$^{252}\text{Cf}_{98}$	2,65 roku	$\alpha$ (97%) spont. štěpení (3%) $\rightarrow n$	$\alpha$ : 6119 (97%) + štěpné fragm. + neutrony	-	$^{238}\text{U}, ^{239}\text{Pu}$ $(n,\gamma),(n,\gamma),\dots$ $\dots,(n,\gamma),\dots\beta^- \dots$ $\downarrow$ $^{252}\text{Cf}$	zdroj neutronů

Pozn.: Barevně jsou označeny dvojice **mateřský**→**dceřinný** radionuklid používané v generátorech