

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2019

**KAROLÍNA
OSIČKOVÁ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Osičková** Jméno: **Karolína** Osobní číslo: **422806**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Rozptylová studie tritia

Název diplomové práce anglicky:

Study of tritium dispersion

Pokyny pro vypracování:

1. Shrnutí životního cyklu tritia v přírodě
2. Rešerše problematiky výпустí tritia v jaderných elektrárnách a jejich vliv na životní prostředí
3. Technická řešení plynné výпустí tritia, rozptylová studie tritia ve vzduchu pro komín BAPP na Jaderné elektrárně Temelín
4. Porovnání výsledků rozptylové studie se současným stavem, vliv změny rozložení výпустí tritia

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Zácha, Ph.D., ústav energetiky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


Ing. Pavel Zácha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

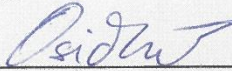

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studentky

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně, že jsem řádně citovala všechny použité prameny a literaturu a že práce nebyla využita v rámci jiného vysokoškolského studia či k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne 4. června 2019

Karolína Osíčková

ANOTAČNÍ LIST

Autor:	Bc. Karolína Osičková
Název práce:	Rozptylová studie tritia
Anglický název:	Study of tritium dispersion
Akademický rok:	2018/2019
Ústav/odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Zácha, Ph.D.
Konzultanti:	Ing. Josef Klumpar Ing. Vladimír Patera
Bibliografické údaje:	Počet stran: 72 Počet obrázků: 22 Počet tabulek: 13 Počet příloh: 4
Klíčová slova:	tritium, výpusti, životní prostředí, radiační ochrana, JE Temelín
Key words:	tritium, releases, environment, radiation protection, Temelín NPP
Anotace:	Práce se zabývá problematikou výpustí tritia na tlakovodních jaderných elektrárnách. Je popsáno současné řešení na JE Temelín a navrženo nové řešení výpustí do atmosféry přes komín BAPP. Pro tento případ je provedena rozptylová studie a její porovnání se současnou situací.
Abstract:	This diploma thesis deals with the issue of releases of tritium on PWRs. The solution of tritium releases at the Temelín NPP is described. A new solution of tritium releases through the chimney of auxiliary building is described and for this solution is elaborated a dispersion study. Results of both situations are compared.

Poděkování:

Děkuji panu Ing. Pavlu Záchovi, Ph.D. za trpělivé vedení mé diplomové práce. Dále velmi děkuji konzultantům Ing. Josefu Klumparovi a Ing. Vladimíru Paterovi za jejich cenné rady a čas, který věnovali konzultacím o práci. Jejich pomoc velmi přispěla k výsledné podobě práce a připomínky k ní byly vždy věcné a užitečné.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam veličin a jednotek	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1. Úvod	14
2. Tritium	16
2.1. Vznik a výskyt tritia	16
2.1.1. Přírodní tritium	16
2.1.2. Umělé tritium	17
2.2. Vliv tritia na člověka a životní prostředí.....	19
2.2.1. Biologické účinky tritia	20
2.3. Koloběh tritia v životním prostředí	21
2.3.1. Mobilita a biologická dostupnost v terestriálních ekosystémech	21
2.3.2. Mobilita a biologická dostupnost ve sladkovodních ekosystémech	24
2.3.3. Mobilita a biologická dostupnost v přímořských ekosystémech	25
3. Výpusti tritia z jaderných elektráren ve vztahu k životnímu prostředí	26
3.1. Výpusti do životního prostředí.....	26
3.1.1. Plynné výpusti do ovzduší	26
3.1.2. Kapalné výpusti	27
3.2. Výpusti tritia na různých typech JE	28
3.2.1. Tritium na elektrárnách s tlakovodními reaktory	31
3.3. Tritium uvolňované z jaderných elektráren	32
3.4. Vyhodnocování radiační zátěže	33
3.5. Radiační zátěž způsobená tritiem.....	36
3.5.1. Konverzní faktory	36
4. Řešení výpustí tritia na JE Temelín	39
4.1. Legislativní požadavky na limitaci výpustí.....	39
4.1.1. Legislativní požadavky na výpusti do hydrosféry z ETE.....	40
4.1.2. Legislativní požadavky na výpusti do ovzduší z ETE	40
4.2. Čerpání limitů.....	40
4.3. Monitorování tritia na ETE	42
4.3.1. Měření výpustí do ovzduší.....	43
4.3.2. Měření výpustí do vodotečí	43

4.3.3.	Výsledky monitorování tritia na ETE za rok 2018.....	44
4.3.4.	Výsledky monitorování tritia v okolí ETE za rok 2018.....	44
4.4.	Návrh technického řešení dle EGP PRAHA.....	45
4.4.1.	Varianta 1.....	46
4.4.2.	Varianta 2.....	47
4.4.3.	Varianta 3.....	48
4.4.4.	Provoz vzduchotechnické jednotky	49
5.	Rozptylová studie tritia	50
5.1.	Pasquillova stupnice stability počasí.....	50
5.2.	Metoda řešení	52
5.2.1.	Omezení komplexnosti řešeného problému.....	54
5.3.	Použitá data	54
5.4.	Výsledky	56
5.5.	Grafické výstupy	57
6.	Porovnání navrhovaného řešení se současným stavem.....	58
6.1.	Rozptylová studie pro současný stav	58
6.2.	Grafické výstupy	59
6.3.	Shrnutí výsledků.....	62
7.	Závěr.....	63
8.	Reference	64
	Seznam příloh.....	68
9.	Přílohy	69

Seznam zkratek

BAPP	budova aktivních pomocných provozů
BWR	boiling water reactor – varný reaktor
CH ₃ T	tritiovaný metan
DNA	deoxyribonukleová kyselina
DPS	dílčí provozní soubor
DT	tritiované deuterium
DTO	tritiová těžká voda
EDU	elektrárna Dukovany
EGP	ENERGOPROJEKT
ETE	elektrárna Temelín
GCR	gas cooled reactor – plynem chlazený reaktor
GTLS	gaseous tritium light source – tritiový světelný zdroj
HT	tritiovaný vodík
HTO	tritiová voda
HVB	hlavní výrobní blok
HWR	heavy water reactor – těžkovodní reaktor
JE	jaderná elektrárna
KN	kontrolní nádrž
MDA	minimální detekovatelná aktivita
OBT	organically bound tritium – organicky vázané tritium
PSA	přepouštěcí stanice do atmosféry
PVPG	pojistný ventil parogenerátoru
PWR	pressurized water reactor – tlakovodní reaktor

RBE	relativní biologická účinnost
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
T	tritium
TDO	tritiová těžká voda
T ₂ O	tritiová voda
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
VZT	vzduchotechnika, vzduchotechnický
ZÚ	zásahová úroveň

Seznam veličin a jednotek

A	[Bq]	aktivita
E	[Sv]	efektivní dávka
H ⁰	[Sv]	ekvivalentní dávka
h _{ing}	[Sv/Bq]	konverzní faktor pro požití radionuklidu
h _{inh}	[Sv/Bq]	konverzní faktor pro vdechnutí radionuklidu
M _w	[kg/h]	množství vody ke zvlhčování vzduchu
Q _T	[kW]	tepelný výkon
R ^{r.o}	[Gy]	dávka absorbovaná orgánem nebo tkání
V	[m ³ /h]	množství zvlhčovaného vzduchu
W ^o	[-]	tkáňový váhový faktor
W ^r	[-]	radiační váhový faktor

Seznam obrázků

Obrázek 1 – aktivita tritia pro severní polokouli.....	18
Obrázek 2 – Tritiové značky nouzových východů a cest	19
Obrázek 3 – Tritiová mířidla	19
Obrázek 4 – Koloběh tritia v terestriálním prostředí na rozhraní vzduchu, půdy a vegetace.....	22
Obrázek 5 – Koloběh tritia v terestriálním prostředí na rozhraní mezi vzduchem, vodou, potravou a živočichy	23
Obrázek 6 – Základní mechanismy pro rozptyl a přenos tritia v říčních systémech.....	24
Obrázek 7 – Celková roční aktivita tritia uvolněná do atmosféry z různých typů reaktorů	29
Obrázek 8 – Celková roční aktivita uvolněná do hydrosféry z různých typů reaktorů	29
Obrázek 9 – Součet celkových ročních aktivit tritia uvolněného do atmosféry a hydrosféry z různých typů reaktorů	30
Obrázek 10 – Součet celkových ročník normalizovaných aktivit tritia uvolněného do atmosféry a hydrosféry z různých typů reaktoru	30
Obrázek 11 – Příklad ternárního štěpení ^{235}U se vznikem tritia.....	31
Obrázek 12 – Diagram přenosu tritia v rámci jaderné elektrárny a výměny s prostředím.....	32
Obrázek 13 – koloběh tritia v životním prostředí.....	33
Obrázek 14 – Roční efektivní dávka z celkových výpustí do vodotečí a do atmosféry v letech 2003 až 2018	41
Obrázek 15 – Aktivity výpustí tritia pro roky 2003 až 2018.....	41
Obrázek 16 – Distribuce tritia z ETE do životního prostředí.....	42
Obrázek 17 – Schéma vypouštění tritia komínem BAPP: Varianta 1 - Přívod vzduchu z výtlačného kanálu vzduchotechniky	47
Obrázek 18 – Schéma vypouštění tritia komínem BAPP: Varianta 2 - Přívod vzduchu z venkovního prostředí.....	48

Obrázek 19 – Schéma vypouštění tritia komínem BAPP: Varianta 3 - Přívod vzduchu z výtlaku systému 1TL52.....	49
Obrázek 20 – Transport nuklidů potravními řetězci podle modelu ENCONAN	53
Obrázek 21 – Zóna havarijního plánování ETE a větrná růžice	55
Obrázek 22 – Porovnání ročních efektivních dávek pro současný stav a pro navrhovanou změnu plyných výpusť tritia komínem BAPP. Uvedeno pro všechny věkové kategorie v okruhu 8 km od ETE.....	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Radiační váhové faktory.....	34
Tabulka 2 – Tkáňové váhové faktory.....	35
Tabulka 3 – Množství vdechnutého vzduchu a požití vody v jednom roce	36
Tabulka 4 – Konverzní faktory hinh pro příjem požitím tritia jednotlivcem z obyvatelstva a radiačním pracovníkem, uvedeno v Sv/Bq	37
Tabulka 5 – Konverzní faktory hinh pro příjem vdechnutím aerosolů tritia jednotlivcem z obyvatelstva, uvedeno v Sv/Bq.....	37
Tabulka 6 – Konverzní faktory hinh pro příjem vdechnutím radioaktivních výparů tritia jednotlivcem z obyvatelstva a radiačním pracovníkem, uvedeno v Sv/Bq	38
Tabulka 7 – Zdroje tritia v primárním okruhu JETE a jejich zastoupení.....	39
Tabulka 8 – Kategorie Pasquillovy stupnice stability počasí	50
Tabulka 9 – Určení třídy stability počasí podle Pasquillovy stupnice	51
Tabulka 10 – Roční efektivní dávky v první výpočetní oblasti.....	56
Tabulka 11 – Roční efektivní dávky v druhé výpočetní oblasti.....	57
Tabulka 12 – Porovnání ročních efektivních dávek v první výpočetní oblasti.....	58
Tabulka 13 – Porovnání ročních efektivních dávek v druhé výpočetní oblasti	59

1. Úvod

Jaderná energetika už od svého počátku v 50. letech s sebou nese mnoho specifických aspektů. Tím nejtypičtějším je využívání a tvorba radionuklidů, tedy práce s ionizujícím zářením. V průběhu vyhořívání jaderného paliva za provozu reaktoru vzniká obsáhlé portfolio radionuklidů. Některé vznikají přímo v palivových peletkách (například jódu, césiu a plutoniu), některé v chladivu (tritium a uhlík) nebo v konstrukčních částech reaktoru (například kobalt a chrom). Tyto radionuklidy je potřeba pečlivě monitorovat, filtrovat z chladiva a je třeba s nimi zacházet jako s radioaktivními odpady dle platné legislativy.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou výпустí tritia na jaderných elektrárnách. Zaměřuje se na porovnání plyných a kapalných výпустí. Na jaderné elektrárně je tritium jedním z důležitých radioizotopů, protože prakticky nejde z vody oddělit a jeho skladování s sebou nese další problémy. Vypouští se tedy do životního prostředí, kde se přirozeně ředí a jeho koncentrace je pak nízká. Tyto výпустě je třeba limitovat a důkladně monitorovat.

Vliv ozáření s nízkou energií v malých dávkách je aktuálně velmi diskutované téma. Tritia se tato problematika také týká. Pokud by docházelo ke kumulaci tritia na určitých místech životního prostředí či v konkrétních orgánech či tkáních organismů, pravděpodobně bychom měli k dispozici více kvalitních dat pro vyhodnocení biologického působení tritia. Nicméně tritium nemá tuto tendenci, naopak se poměrně rychle a rovnoměrně rozprostírá ve většině prostředí a organismech. Navíc organicky vázané tritium má mnoho variant a inventarizace chování všech těchto molekul v životním prostředí je zdlouhavý a značně náročný proces.

Limity výпустí do vodotečí, které jsou na JE Temelín z 99 % tvořeny tritiem, jsou pro české jaderné elektrárny až desetkrát přísnější, než je tomu v ostatních zemích zvykem. Jedním z možných důvodů jsou protijaderné aktivistické skupiny a hnutí. Jak české, tak zahraniční organizace často využívají problematiku výпустí tritia do vodotečí pro své aktivity. Tyto tzv. zelené organizace ve spojitosti s jadernou elektrárnou Dukovany vydaly i publikaci na téma ohrožení jižní Moravy tritiem. I z tohoto důvodu je tritiu a jeho limitaci věnována velká pozornost.

Dalším důvodem jsou nízké průtoky řek, jejichž vodu používají české jaderné elektrárny na chlazení. Řeka Jihlava má v profilu Mohelno průtok jen 3 m³/h a řeka Vltava v profilu Kořensko 30 m³/h. Koncentrace tritia by snáze mohly dosáhnout vyšších hodnot než u elektráren na velkých řekách.

Pro omezení výpustí tritiových vod z JE Temelín do vodotečí bylo firmou ENERGOPROJEKT PRAHA navrženo řešení zvýšení výpustí tritia do atmosféry komínem BAPP. Tyto změny by předcházely případnému překročení limitů výpustí do vodotečí. Před provedením takovýchto změn je potřeba ověřit, zda nebude docházet k překročení limitů aktivit výpustí do atmosféry. K tomu je zapotřebí vypracovat rozptylovou studii pro navrhované změny aktivit a porovnat ji se stávajícím stavem. Takováto rozptylová studie a porovnání jejích výsledků se současnými průměrnými hodnotami je jedním z cílů této diplomové práce.

2. Tritium

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, tvoří přibližně 90 % hmotnosti jeho lidstvem poznané části. Běžný přírodní vodík je tvořen třemi izotopy – obyčejným vodíkem ^1H (99,9858 %), deuteriem ^2H (< 0,0142 %) a tritiem ^3H , které je zastoupeno jen velmi malým zlomkem (asi 10^{-16} %). [1]

Tritium je jediný radioaktivní izotop vodíku. Jeho jádro se skládá z jednoho protonu a dvou neutronů, což jej činí nestabilním. Rozpadá se beta rozpadem, kdy se neutron rozpadne na proton a elektron za vzniku stabilního atomu helia:



Poločas rozpadu tritia je 12,33 roku. Beta záření z rozpadu tritia o energii 18 keV lze odstínit asi 6 milimetry vzduchu, takže se nedostane pod lidskou kůži. Tritium je, stejně jako vodík, plyn a má tendenci se vázat na molekuly vody a klasický vodík z nich vytlačovat. Tritium tak může být obsaženo v určité míře i v pitné vodě, čímž vyniká jisté nebezpečí. Nicméně v určitém množství se tritiová voda vyskytuje i ve vodě v lidském těle. [1]

Tritium je také jediný radionuklid, který není oddělován z radioaktivních vod na jaderné elektrárně. To proto, že fyzikální a chemické chování tritiové vody je velmi podobné obyčejné (destilované) vodě. Tritium lze oddělit například elektrolýzou, jedná se ale o značně náročné a neekonomické řešení. Tím se tritium stává hlavním zdrojem aktivity ve vyčištěných kapalných odpadech. Koncentrace tritia ve vodách primárního okruhu nesmí překročit stanovené limity, i z hlediska radiační ochrany pracovníků jaderné elektrárny. [1]

2.1. Vznik a výskyt tritia

Tritium vzniká jak přirozeně vlivem kosmického záření, tak uměle jako důsledek lidských činností.

2.1.1. Přírodní tritium

Přírodní tritium se vyskytuje ve formě vodíkového plynu (0,12 %) a vodních par (0,1 %), většina tritia (99,78 %) je však zastoupena v zemské hydrosféře, převážně v oceánech. Vzniká v horní části atmosféry při interakci kosmického záření s atmosférickými

plyny [1]. Roční produkce tritia v atmosféře je přibližně 0,15 až 0,2 kg o aktivitě $5 \cdot 10^{16}$ až $7 \cdot 10^{16}$ Bq. To odpovídá samovolnému rozpadu tritia. Jeho přirozená produkce je tedy vyvážena rozpadem. [2]

Velmi malá část přírodního tritia je produkována záchytem neutronu na ${}^6\text{Li}$, které je obsaženo v lithných rudách. Neutrony způsobující toto štěpení jsou produkovány spontánním štěpením uranu ${}^{238}\text{U}$ nebo alfa rozpadem uranu či thoria. Avšak tato produkce tritia se dá v porovnání se vznikem tritia v atmosféře považovat za zanedbatelnou. [2]

2.1.2. Umělé tritium

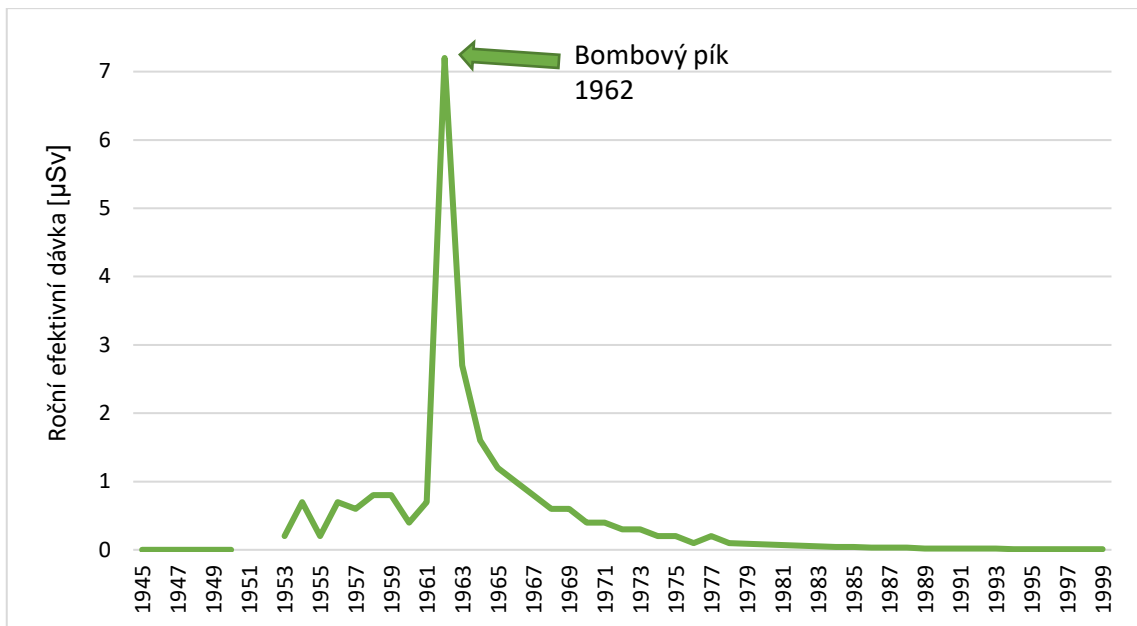
Uměle je produkováno během výbuchů jaderných bomb (jak při útocích na Japonsko během druhé světové války, tak při každém testu), dále vzniká v reaktorech při výrobě tritia pro jaderné zbraně a také během provozu jaderných reaktorů. [1]

Jaderné bomby

V období od roku 1945 až do půlky 60. let se koncentrace tritia v biosféře signifikantně zvyšovala. Nicméně poločas tritia je 12,33 let, takže uplynulo již 2 až 6 poločasů rozpadu od období nejmasivnějšího testování jaderných bomb. To znamená, že většina tritia vzniklého během výbuchů již podlehla rozpadu na ${}^3\text{He}$.

Obrázek 1 zobrazuje aktivitu tritia vzniklého při výbuších jaderných bomb od roku 1950, kdy se začalo mohutné testování, až do roku 1990. Aktivita je znázorněna formou průměrné individuální efektivní dávky pro osobu žijící na severní polokouli. Lze zde pozorovat tzv. bombový pík v letech 1961-1963, kdy bylo odpáleno přes 300 jaderných bomb a jaderné velmoci prováděly i několik testů denně.

Po roce 1963 byly atmosférické testy zakázány, od tohoto roku se testovalo pouze podpovrchově. Důvodem, proč hodnota efektivní dávky z tritia z jaderného testování klesá, je ale také mobilita tritia v životním prostředí. Tritium se naváže na koloběh vody a časem se rozředí ve větších vodních celcích. Díky tomu celková efektivní dávka způsobená tímto spadovým tritiem z jaderných testů klesá. [3]



Obrázek 1 - aktivita tritia pro severní polokouli [3]

Jaderná zařízení

Mezi jaderná zařízení, která uvolňují tritium do životního prostředí, se řadí jaderné elektrárny, zařízení na přepracování a recyklaci použitého paliva a zařízení s reaktory určenými přímo na výrobu tritia.

V aktivních zónách reaktorů vzniká tritium vícero způsoby, velmi záleží na typu reaktoru. Porovnání jednotlivých technologií a jejich výпустí tritia je rozebráno v kapitole 3.2.

Ostatní zdroje a použití tritia

Tritium se využívá v hned několika odvětvích průmyslu – ve vojenství, farmacii, k výrobě luminiscenčních předmětů, k mapování podzemních vod. Své uplatnění má také v lékařství a výzkumných aplikacích, například jako indikátor v biochemickém výzkumu nebo při studii zvířecích metabolismů. [2]

Pro veřejnost nejdostupnější využití je tritium jako zdroj trvalého slabého světla, takzvané GTLS (Gaseous Tritium Light Source). Jedná se převážně o plyným tritiem naplněné skleněné mikrokapsle, jejichž stěny jsou pokryty fosforeskující látkou. Tato látka vlivem dopadajícího beta záření svítí. Výběrem fosforeskující látky lze ovlivnit barvu a intenzitu zdroje světla. Takto se tritium využívá pro označení nouzových a požárních východů či evakuačních tras, v armádě pak na mířidlech, cifernících apod. Příklady tritiového značení jsou zobrazeny na obrázku 2, na obrázku 3 jsou tritiová mířidla. [4]



Obrázek 2 - Tritiové značky nouzových východů a cest [5]



Obrázek 3 – Tritiová miřidla [6]

2.2. Vliv tritia na člověka a životní prostředí

Většina tritia se do lidského organismu dostává v podobě vody. Vdechnutím se do těla dostávají i plynné formy tritia (HT, DT, T₂), ale jen malá část není okamžitě vydechnuta. Tato část se vstřebává do krevního oběhu a po několika minutách se dostane z těla opět výdechem.

Tritium vázané v molekulách vody (HTO, DTO i T₂O) je do těla adsorbováno přes kůži nebo je vdechnuto jako vodní pára se vzduchem. Takto v těle snadno zůstane s biologickým poločasem rozpadu¹ 10 dnů. Vzhledem ke schopnosti lidského těla bez

¹ Biologický poločas rozpadu je doba, za kterou daná látka (např. léčivo či radionuklid) ztratí polovinu své fyziologické, radiologické nebo farmaceutické aktivity. [7]

obtíží přijímat tritiovou vodu je riziko, které tritiová voda představuje, až 25 000krát větší než riziko způsobené tritiem v plynné formě. [8]

Plynné tritium se ve vlhkém prostředí snadno přeměňuje na tritium ve formě vody. Také může být oxidováno v listech rostlin nebo může pronikat do půdy, kde je velmi rychle oxidováno mikroorganismy. Opět tedy vzniká jeho rizikovější forma – HTO.

HTO vázané v biologických systémech a organismech podléhá různým metabolickým procesům včetně fotosyntézy v rostlinách a rozkladu organických látek v půdě. Může nastat přeměna HTO na další významný radionuklid, organicky vázané tritium (OBT – organically bound tritium). OBT je vázáno v organických sloučeninách jako jsou cukry, bílkoviny, škroby, lipidy, buněčné strukturální materiály a aminokyseliny. [8]

Tritium je velmi slabý beta zářič, který je silně rozšířen v životním prostředí a potravinovém řetězci, takže je lidské tělo každý den vystaveno jeho malých dávkách. Poté, co se dostane do těla, rychle a rovnoměrně se rozptýlí po celém těle. Jak již bylo řečeno, do těla se dostává především v podobě vody, jde proto přímo do měkkých tkání a orgánů. Z těla je vyloučeno v moči do jednoho měsíce. Organicky vázané tritium zůstává v těle déle, protože je velmi nemobilní. [9]

2.2.1. Biologické účinky tritia

Tritium je nízkoenergetický beta emitör s nízkým pronikavým výkonem, který představuje radiační riziko především vlivem vnitřního ozáření. Nízká energie však vede k místní koncentraci a může zvýšit biologické účinky absorpce tritia v živé hmotě. Tritiem emitované ionizující záření může způsobit různé poškození DNA, které se v organismu projevují jako fyziologické účinky (genetické poškození, reprodukce a další). Toto poškození DNA představuje zvýšené riziko pro tvorbu a přenos genetických mutací mezi generacemi. [2]

K přesnému určení faktoru relativní biologické účinnosti RBE je v současné době nedostatek provedených studií. U některých savců a ryb se hodnoty RBE pro tritium pro deterministické účinky pohybují v rozmezí od 1 do 3,5. Souběžně s nedostatečnými údaji o RBE jako takovými jsou také neúplné znalosti o mechanismu působení tritia. [2]

2.3. Koloběh tritia v životním prostředí

Tritium je izotop vodíku, a tak je úzce svázáno s jeho koloběhem v životním prostředí. Tritium může být obsaženo ve všech hydrogenovaných molekulách a souvisí jak s vodou v tkáni, tak s organickou hmotou rostlin a zvířat. V rovnováze s prostředím však nebyla pozorována žádná tendence tritia se akumulovat v konkrétním prostředí nebo v konkrétní biologické složce. [2]

Ve formě HTO je tritium vysoce mobilní ve všech biologických systémech životního prostředí, rychle se tak integruje do mnoha cyklů biosféry i geosféry. Velmi snadno se dostává do rostlin, stejně jako do živočichů, kteří jej mimo jiné mohou přijmou i s potravou. [2]

V případě, že se tritium do životního prostředí dostane ve formě organicky vázaného tritia, považuje se za organickou molekulu, odkud nebude rozloženo biologickými nebo chemicky fyzikálními procesy. OBT se rozkládá především na HTO. Vzhledem k rozmanitosti organických molekul, které mohou být spojeny s tritiem, není možné inventarizovat chování těchto molekul v životním prostředí. [2]

2.3.1. Mobilita a biologická dostupnost² v terestriálních ekosystémech

Ve vzduchu se tritium nejčastěji vyskytuje ve formě tritiové vody HTO, méně pak ve formě tritiovaného vodíku (tj. molekula plynného vodíku složená z jednoho atomu vodíku a jednoho atomu tritia, tedy HT) a tritiovaného metanu CH₃T. Na pomezí půdy a atmosféry probíhá výměna tritia oběma směry – vstřebávání ze vzduchu do půdy a vypařování z půdy do vzduchu. Usazování může být jak suché, tak mokré (déšť). [2]

Půda

Při kontaktu s půdou a během prvních pár centimetrů půdy se z HT váže jako tritiová voda. Míra konverze úměrně roste s teplotou půdy a obsahem vody, až do 46 °C a 25% vlhkosti. Tritiovou výměnu zpomaluje suchost půdy a výskyt vegetace. [2]

Většina tritia v půdě zůstává jen po velmi krátkou dobu. Velká část tritiové vody je znovu vypařena do vzduchu, a to rychlostí v rozmezí od 5 % za minutu až do 1 % za sekundu

² Biologická dostupnost v přírodních vědách značí množství prvku nebo sloučeniny, které je přístupné organismům pro příjem, absorpci či adsorpci přes buněčnou membránu. Je to funkce vlastností půdy, času, stavu prostředí a rostlinné a mikrobiální charakteristiky. [10]

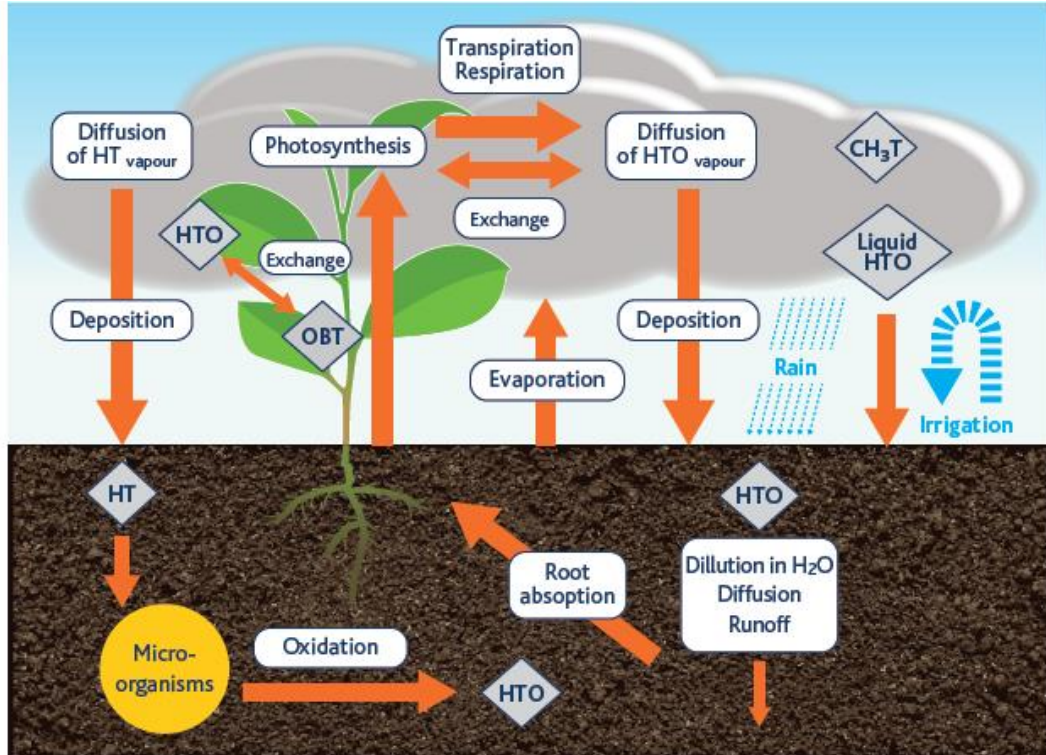
v závislosti na podmínkách daného objemu půdy. Další část je také absorbována kořeny rostlin nebo rychle migruje do dalších půdních vrstev. Obecně tedy tritium nemá nutkání se v půdě kumulovat. [2]

Vegetace

Rostliny neabsorbují tritium ve formě HT, zato tritiovou vodu absorbují velmi snadno, jak ze vzduchu přes povrch listů, tak z půdy přes kořeny. Vstřebávání tritia skrz listy závisí na intenzitě fotosyntézy, avšak jeho množství je v listech vždy nižší než v okolním ovzduší. Je to z důvodu velmi rychlých výměn vody mezi kořeny rostliny a půdou. Po případné kontaminaci se obsah tritiové vody v listech snižuje v průběhu několika hodin o několik řádů. Následná výměna mezi kořeny a půdou trvá i několik dní a závisí na množství tritia v půdě. [2]

Část tritia vstřebaná do rostliny fotosyntézou se vstřebává do samotné organické hmoty rostliny. Toto tritium ve formě OBT a HTO může v orgánech rostliny přetrvávat po různě dlouhou dobu. Znalosti těchto mechanismů jsou v současné době jen částečné. [2]

Koloběh tritia mezi atmosférou, půdou a vegetací je zobrazen na obrázku 4.



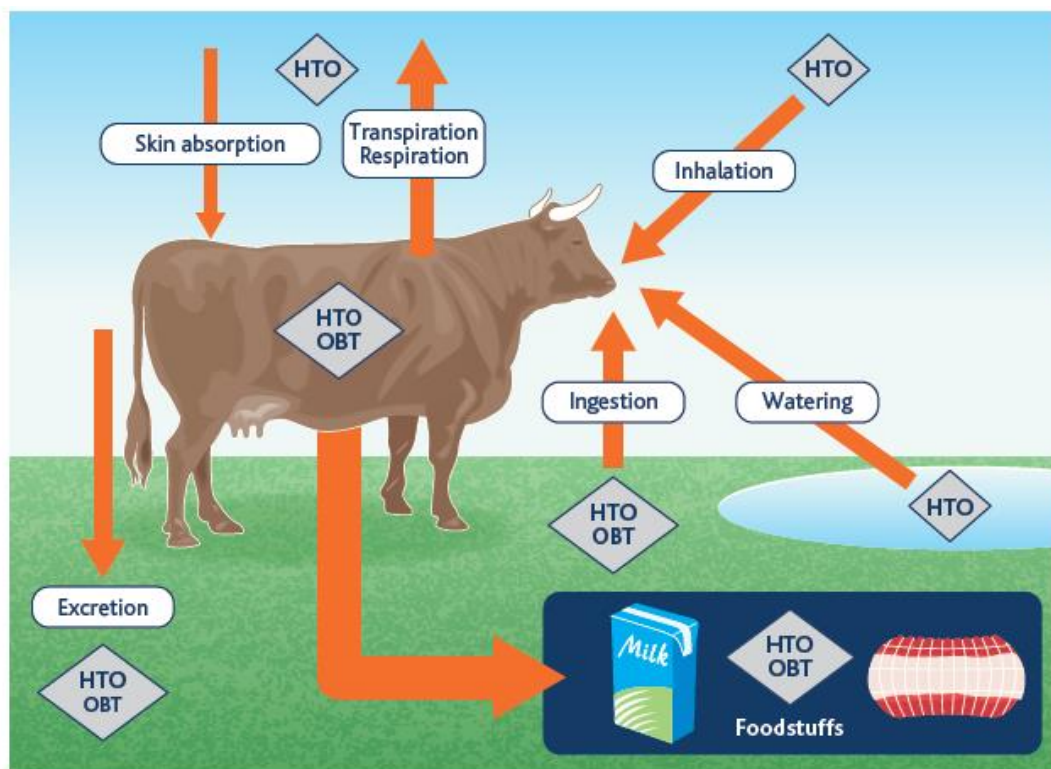
Obrázek 4 - Koloběh tritia v terestriálním prostředí na rozhraní vzduchu, půdy a vegetace [2]

Fauna

Do organismů zvířat se tritium dostává převážně požitím potravy nebo absorpcí vodní páry vdechnutím či přes kůži. HT není dobře rozpustné ve vodě ani v tělních tekutinách, takže jeho množství v těle živočichů je asi 10 000krát nižší než množství tritiové vody. Ta se naopak do tělních tekutin dostává velice snadno – 99 % tritia, které se dostane do těla inhalací je v těle zadrženo během několika sekund. Během několika následujících minut se HTO rovnoměrně rozprostře po těle. [2]

Stejně je to v případě, že se HTO do organismu dostane v potravě a ve vodě. V řádu minut po požití lze HTO detekovat v krevním oběhu, některých orgánech, tkáních a tělních tekutinách. V potravě se může do zvířete dostat i organicky vázané tritium. Část OBT zůstává v těle v neměnné formě, ale většina (97 %) je transformována do formy HTO. [2]

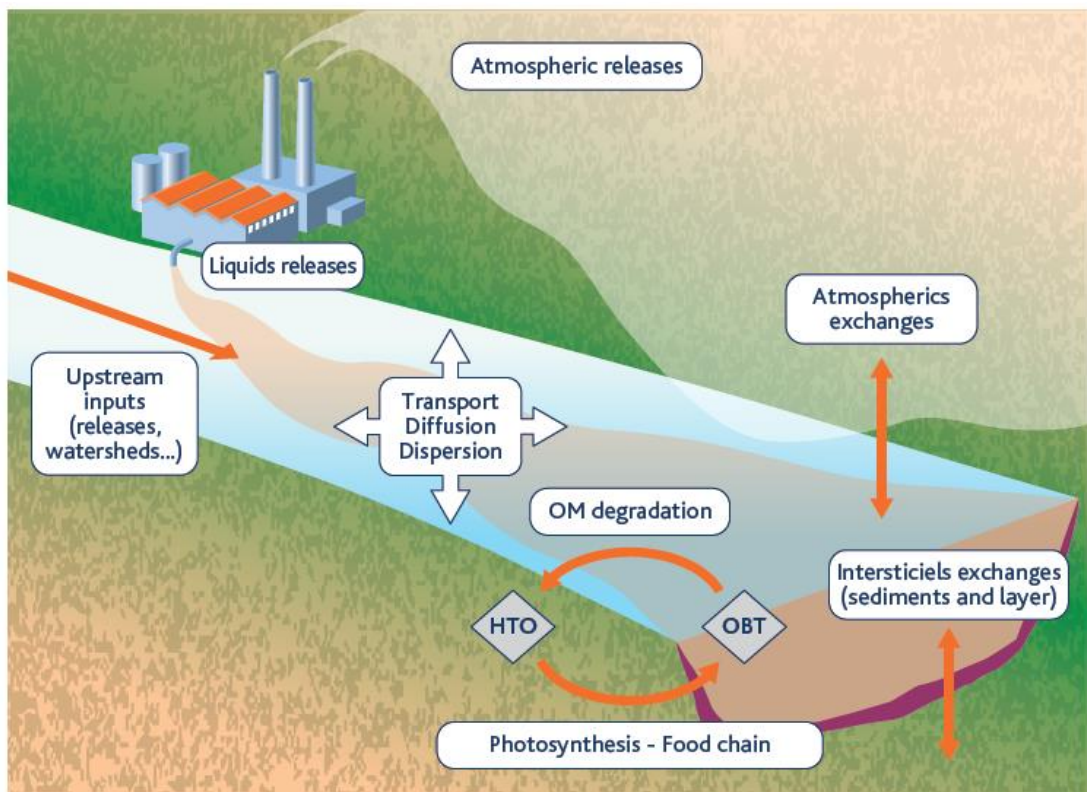
Koloběh tritia přes organismus zvířat je znázorněn na obrázku 5.



Obrázek 5 - Koloběh tritia v terestriálním prostředí na rozhraní mezi vzduchem, vodou, potravou a živočichy [2]

2.3.2. Mobilita a biologická dostupnost ve sladkovodních ekosystémech

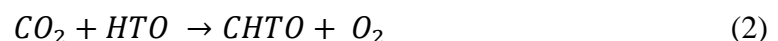
V říčních ekosystémech se tritium vyskytuje především ve formě HTO (~ 99 %). Proto koloběh tritia ve sladkovodních systémech kopíruje koloběh vody, jak je znázorněno na obrázku 6. Zatímco interakce mezi řekou a vzduchem se řídí přírodními fázovými procesy a srážkami, mobilita tritia závisí také na jeho koncentraci ve vzduchu a ve vodě, kdy v kapalně fázi je o něco vyšší koncentrace. Mobilita tritia mezi vodou a sedimentem se také řídí především koloběhem vody, tritium nemá tendenci se vázat na pevné částice sedimentu. [2]



Obrázek 6 – Základní mechanismy pro rozptyl a přenos tritia v říčních systémech [2]

Vegetace

Dosavadní výzkumy poskytují pouze základní informace. Do organického materiálu vodních rostlin se může tritium navázat pomocí fotosyntézy – zjednodušená reakce:



Tyto rostliny jsou také schopny přijmout některé organické sloučeniny tritia. Ojedinelá data týkající se přenosu tritia ve vyšších polovodních rostlinách poukazují na

nerovnováhu mezi daným organismem a vodou. To pravděpodobně souvisí s výměnou atmosférického tritia mezi vznikajícími listy a okolním vzduchem. [2]

Fauna

Mezi říční vodou obsahující tritium a vodou, která je součástí vodních živočichů, je rovnováha dosažena velmi rychle díky procesu dýchání či osmoregulace³. Tento proces trvá pro HTO méně než den. [2]

Co se týká organicky vázaného tritia, proces získávání rovnováhy trvá řádově deset dní. Během tohoto procesu je OBT začleněno především do trávení, kde postupně dochází k tvorbě tritiové vody. Nicméně všechny fyziologické procesy spojené s hydrominerálním metabolismem vodních organismů mohou ovlivňovat přeměnu a procesy OBT. Mezi tyto fyziologické procesy patří především reprodukce, a tak například rozmnožování slávek přispívá k eliminaci OBT uloženého v jejich tělech. [2]

2.3.3. Mobilita a biologická dostupnost v přímořských ekosystémech

Stejně jako ve sladkovodních ekosystémech, u HTO ve slaných vodách dochází velmi rychle k rovnováze mezi HTO v prostředí a HTO v tkáni organismů. Procesy zahrnující mobilitu organicky vázaného tritia zatím nejsou dobře prozkoumány. U ryb a bezobratlých existují pouze ojedinělá data, kdy bylo v organismech naměřeno více OBT než HTO, podle všeho z důvodu požití OBT v potravě. Nicméně z tohoto pozorování nelze interpretovat akumulaci organicky vázaného tritia v živých organismech v tomto ekosystému. [2]

Vzhledem k pomalejší kinetice výměny tritia mezi vodou a organickou hmotou řas neodpovídají okamžité koncentrace tritia v řasách těm, které jsou v mořské vodě. Tuto kolísavou koncentraci ovlivňuje zčásti také fotosyntéza. [2]

³ Osmoregulace je aktivní regulace osmotického tlaku ve specializovaných buňkách, které regulují pohyb látek a zmírňují změny v tělních tekutinách za účelem udržování homeostázy. [11]

3. Výpusti tritia z jaderných elektráren ve vztahu k životnímu prostředí

Provoz jakéhokoli výrobního zařízení, ať už jsou to továrny nebo elektrárny, má nějaký vliv na životní prostředí. V případě jaderné elektrárny s sebou nese její provoz určité množství odpadů ve všech skupenstvích. Kromě běžných odpadů vznikají i odpady radioaktivní. Při normálním provozu se jedná především o nízkoaktivní odpady, středně aktivní odpady a o použité jaderné palivo (které ovšem není považováno za radioaktivní odpad). Jak nakládat s takovýmto materiálem je přesně stanoveno příslušnými předpisy. Kontroly provádí jak provozovatel jaderného zařízení, tak Státní úřad pro jadernou bezpečnost. [12]

3.1. Výpusti do životního prostředí

Radionuklidy nacházející se v chladiivu a v technologických systémech tlakovodní jaderné elektrárny je potřeba během provozu průběžně i periodicky odstraňovat. Vedle tritia, kterým se tato práce zabývá, jsou nejvýznamnější štěpné produkty, které vznikají při provozu jaderné elektrárny, vzácné plyny ^{85}Kr a ^{133}Xe , izotopy jódu ^{131}I a ^{133}I , dále pak ^{90}Sr , ^{134}Cs a ^{137}Cs . Aktivační korozní produkty jsou především ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{57}Mn , ^{60}Co , ^{59}Ni , ^{65}Zn ; mezi aktivační produkty chladiiva pak patří zmiňované tritium ^3H a ^{14}C . Transurany jsou zastoupeny zejména ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu . Kromě plutonia pak v lehkovodních reaktorech vznikají transurany americium, neptunium a curium. [12]

3.1.1. Plynné výpusti do ovzduší

Plynné radioaktivní odpady se zpracovávají na filtrech, které zachycují radioaktivní izotopy. Tím se snižuje aktivita daného odpadu na co nejnižší úroveň. Pokud aktivita odpadu klesne pod úroveň stanoveného limitu, lze takovýto odpad vypustit do ovzduší ventilačními komíny. Do ventilačního komínu HVB ústí systém ventilace kontejnmentu a systémy odvodu aktivních technologických zařízení. Pokud aktivita plynného odpadu dostatečně neklesne, pokračuje se v dekontaminaci. [12]

Z důvodu ochrany obyvatelstva a životního prostředí se výpusti do ovzduší spojitě monitorují dle mezinárodních norem. Sledují se především aerosoly (včetně rozložení podle velikosti částic), izotopy jódu, vzácné plyny, tritium a uhlík ^{14}C .

Na JE Temelín má monitorování plynných výpustí několik funkcí. Monitorování zajišťuje [12]:

- kontinuální měření objemové aktivity aerosolů, izotopů jódu a vzácných plynů,
- kontinuální odběr aerosolů a izotopů jódu na pevném filtru pro následnou analýzu v laboratořích,
- periodický odběr vzácných plynů do tlakových lahví pro následnou analýzu v laboratořích,
- kontinuální odběr izotopů jódu na jódovou patronu pro následnou analýzu v laboratořích,
- kontinuální odběr tritia a uhlíku ^{14}C na patronu s náplní silikagelu pro záchyt tritia a na promývačku pro záchyt uhlíku ^{14}C a pro následnou analýzu v laboratořích,
- online gamaspektometrie vypouštěných plynů.

3.1.2. Kapalně výpusti

Kapalně radioaktivní odpady na jaderné elektrárně jsou tvořeny převážně vodou z primárního okruhu. Tato voda se čistí v šesti specifických čistírnách odpadních vod, kde projde například destilací a čištěním na ionexových filtrech. Většina vyčištěné vody se vrací zpět do technologických okruhů. Zbytek je vyveden do kontrolních nádrží k radiochemické analýze. V případě, že výsledky analýzy odpovídají příslušné normě a limitům, může se voda dále využít v elektrárně, anebo se vypustí do kanalizace přes jímku odpadních vod, kde se smíchá s odpadními vodami technologickými a splaškovými. V případě, že výsledky analýzy normám nevyhoví, kondenzát se přečerpává zpět do nádrží aktivních vod a dochází k opětovnému upravování a čištění. [12]

Monitorování kapalných výpustí z JE Temelín zabezpečuje systém radiační kontroly. Ten zajišťuje [12]:

- přítomnost radioaktivních látek v kontrolních nádržích přečištěných vod jen v přípustných koncentracích,
- zamezení vypuštění těchto nádrží do odpadního kanálu a dále do životního prostředí v případě překročení stanovených limitů,
- monitorování a odběry vzorků ve svěrné jínce technologických a splaškových vod na výtoku vody z areálu jaderné elektrárny,

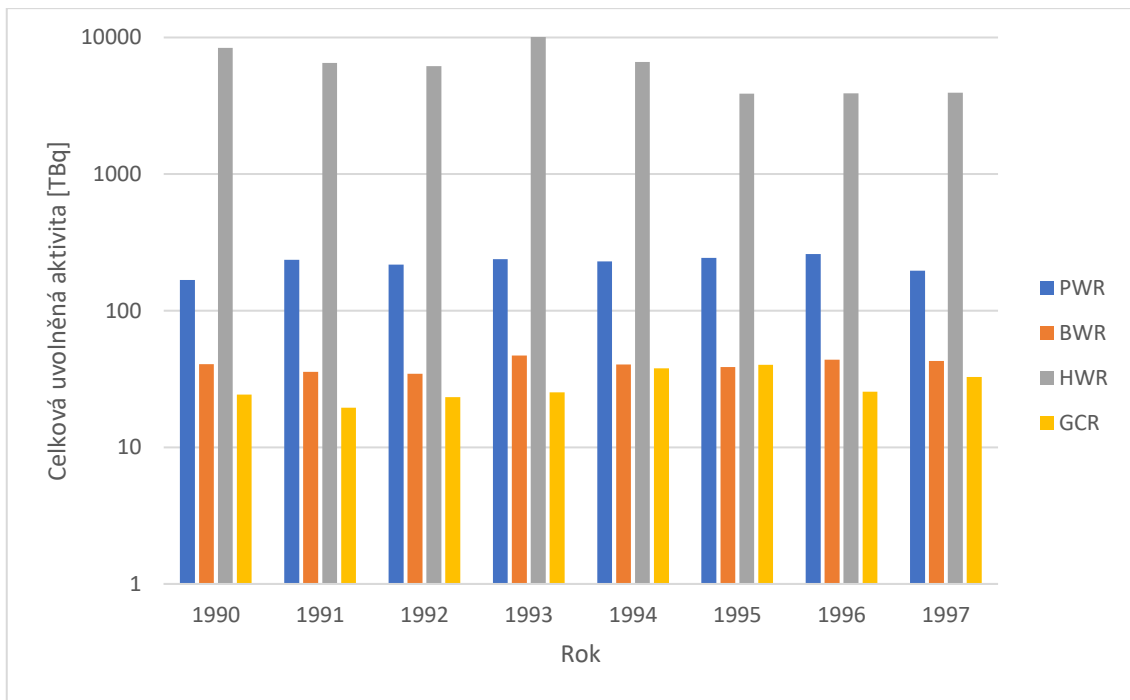
- monitoring celkové bilance látek, které jsou vypouštěny do vodotečí,
- prověřování účinnosti a dodržování předchozích bezpečnostních opatření,
- kontinuální odběr vzorků odpadních vod pro komplexní laboratorní analýzu.

Výsledky tohoto monitorování pak slouží jako podklad pro hodnocení vlivu provozu jaderné elektrárny na životní prostředí. [12]

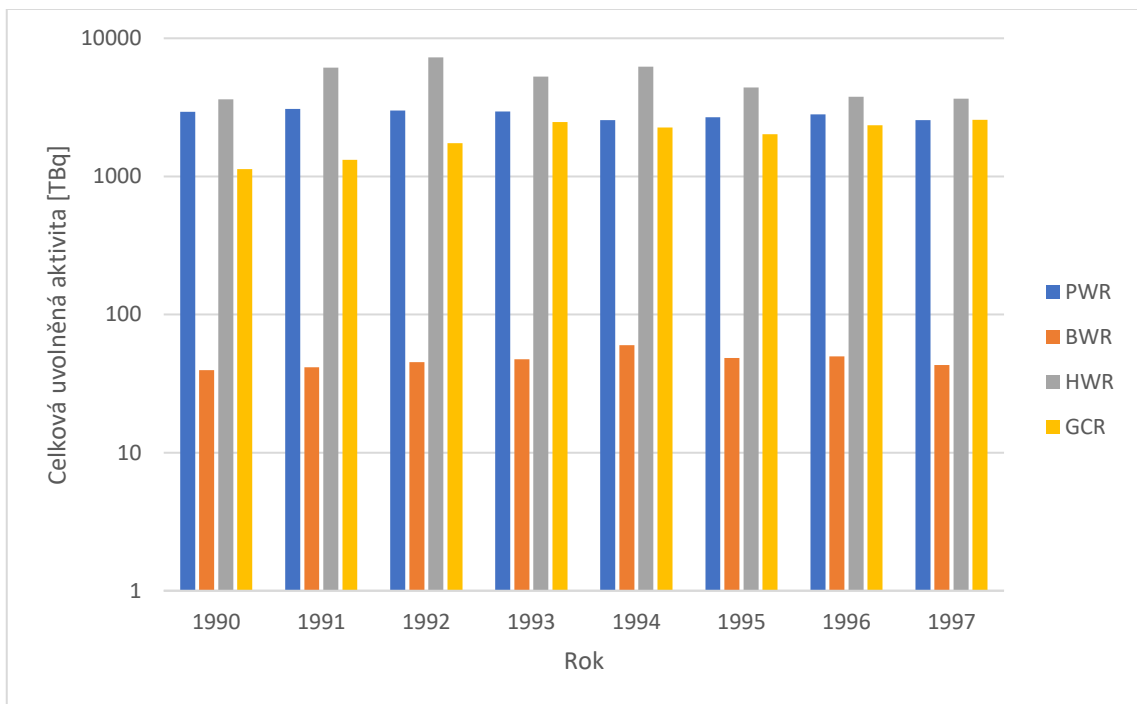
3.2. Výpusti tritia na různých typech JE

Výpusti tritia z jaderných elektráren se liší podle typu reaktoru. U tlakovodních reaktorů je hlavním zdrojem tritia v primární vodě aktivace bóru, který se používá pro řízení reaktivity v podobě kyseliny borité. Ve varných reaktorech je bor obsažen v kontrolních tyčích (v případě starších elektráren), tritium vzniká jeho aktivací. V případě těžkovodních reaktorů vzniká tritium aktivací deuteria, což představuje významný problém v podobě kapalných výpustí do životního prostředí. U plynem chlazených reaktorů může vznikat tritium aktivací lithia v nečistotách v grafitu. [13]

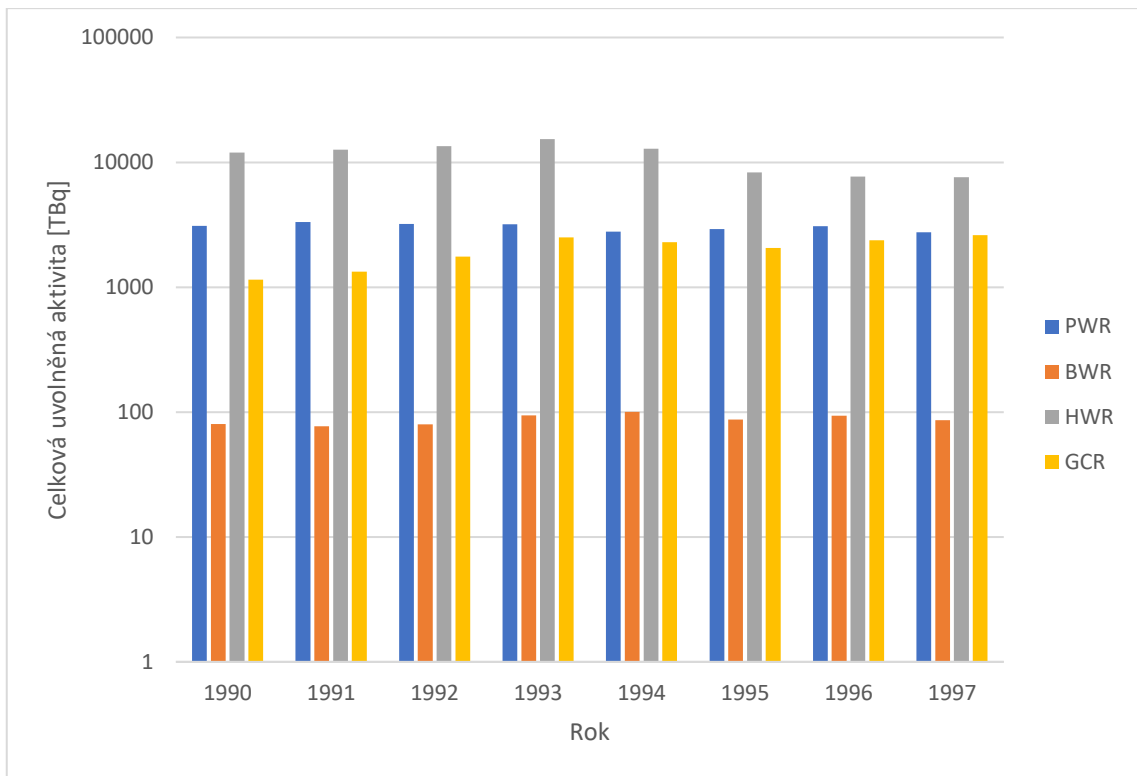
Na obrázcích 7 až 10 uvedených níže jsou vyobrazena porovnání výpustí pro reaktory PWR, BWR, HWR a GCR. Podle grafu na obrázku 10 jde jasně určit, že na jednotku vyrobené elektřiny (gigawattrok, [GWa]) nejméně tritia vyprodukuje elektrárny s varnými reaktory. Tento koncept totiž nevyužívá regulaci kyselinou boritou, čímž odpadá velký zdroj pro vznik tritia. Tlakovodní reaktory a reaktory chlazené plynem dosahují středních hodnot. Byť na jednotku výkonu jsou hodnoty pro tlakovodní reaktory řádově nižší, v absolutních ročních hodnotách aktivit výpustí tritia se jedná přibližně o stejné množství. Nejvyšších hodnot pak dosahují jednoznačně těžkovodní reaktory, vzhledem k vzniku tritia z deuteria. [13]



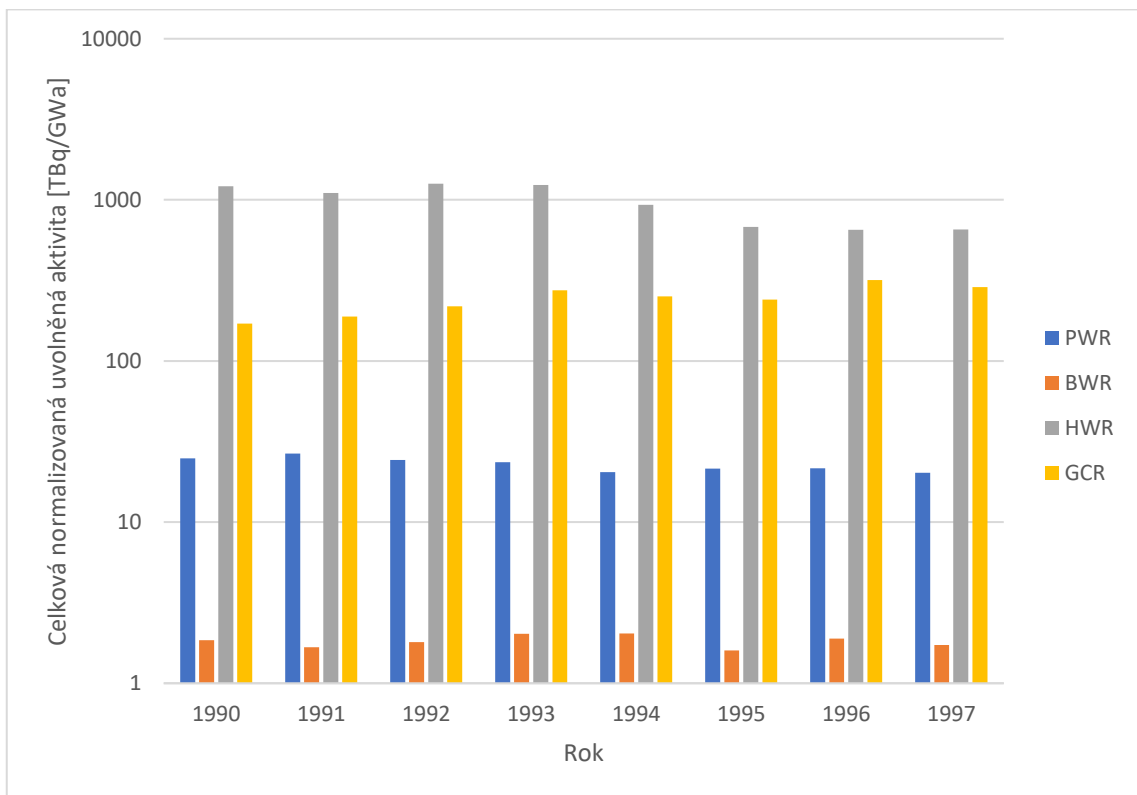
Obrázek 7 – Celková roční aktivita tritia uvolněná do atmosféry z různých typů reaktorů [3]



Obrázek 8 – Celková roční aktivita uvolněná do hydrosféry z různých typů reaktorů [3]



Obrázek 9 - Součet celkových ročních aktivit tritia uvolněného do atmosféry a hydrosféry z různých typů reaktorů [3]



Obrázek 10 - Součet celkových ročník normalizovaných aktivit tritia uvolněného do atmosféry a hydrosféry z různých typů reaktoru [3]

3.2.1. Tritium na elektrárnách s tlakovodními reaktory

Tritium na elektrárnách typu PWR vzniká především neutronovým záchytem na bóru v chladivu. Rozpadem bóru pak vzniká tritium a helium (3), nebo helium a lithium (4), které se pak po záchytu neutronu rozpadá na tritium a helium (5).

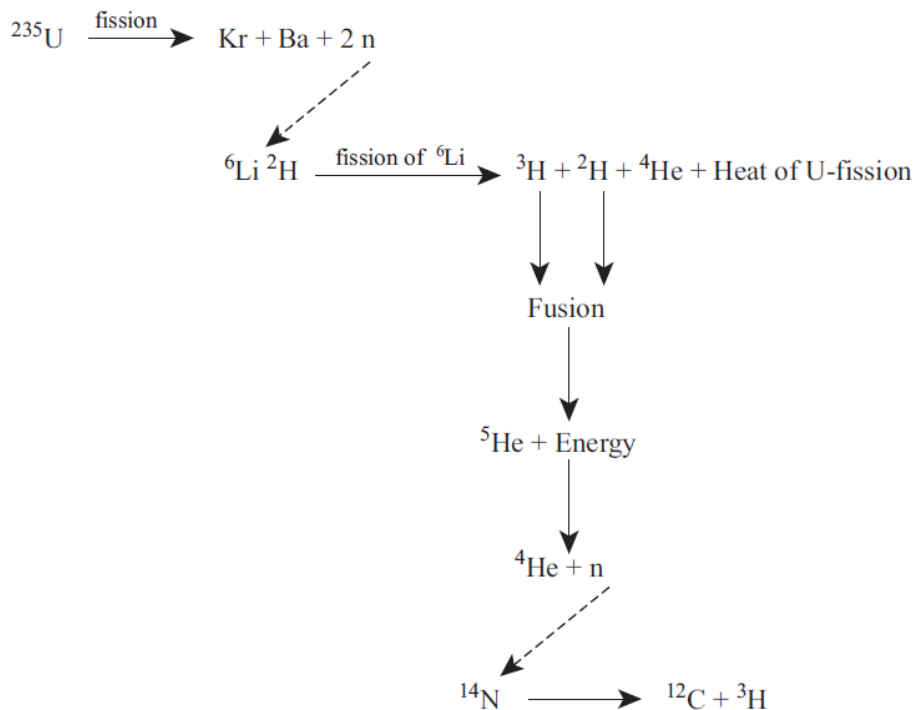


Dále může tritium vznikat aktivací deuteria (6) nebo lithia ${}^6\text{Li}$ (7).

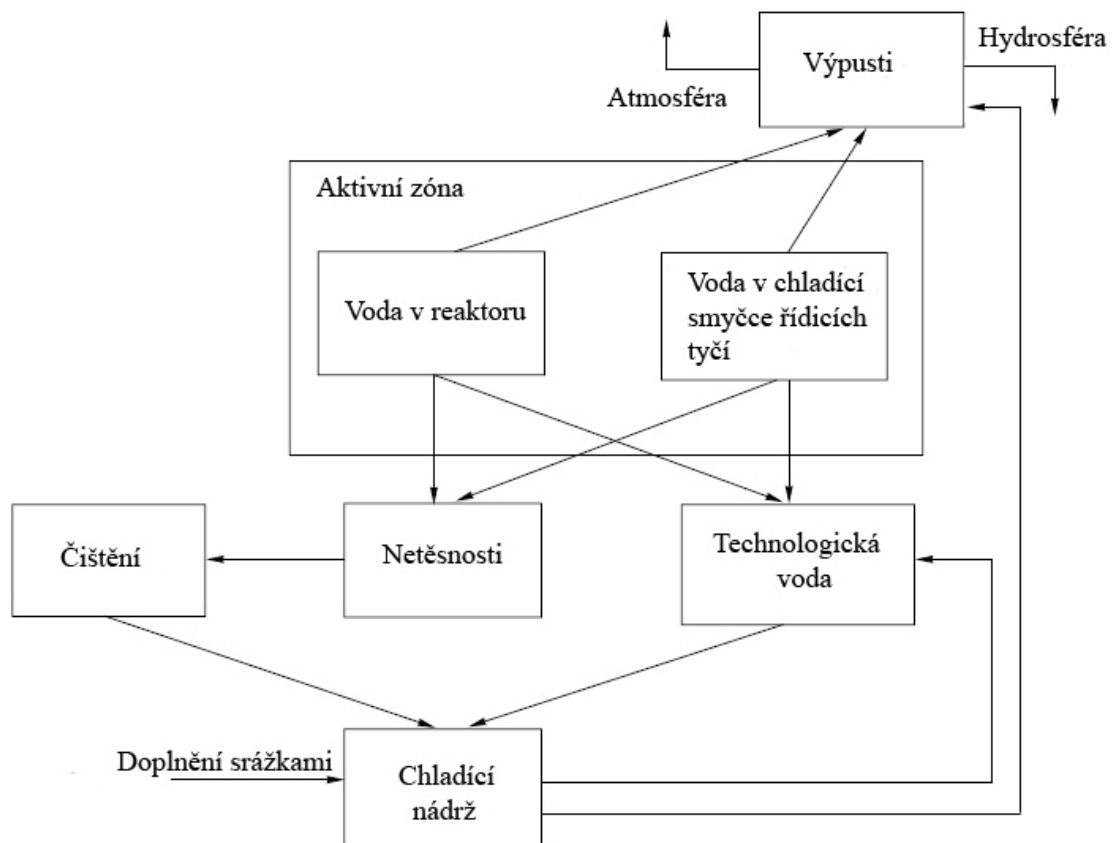


Část tritia vzniká i ternárním štěpením uranu ${}^{235}\text{U}$, ale z toho pouze asi 1 % se dostane do chladiva. Příklad ternárního štěpení je uveden na obrázku 11.

Schéma pohybu tritia v jaderné elektrárně je zobrazeno na obrázku 12. [14]



Obrázek 11 – Příklad ternárního štěpení ${}^{235}\text{U}$ se vznikem tritia [1]

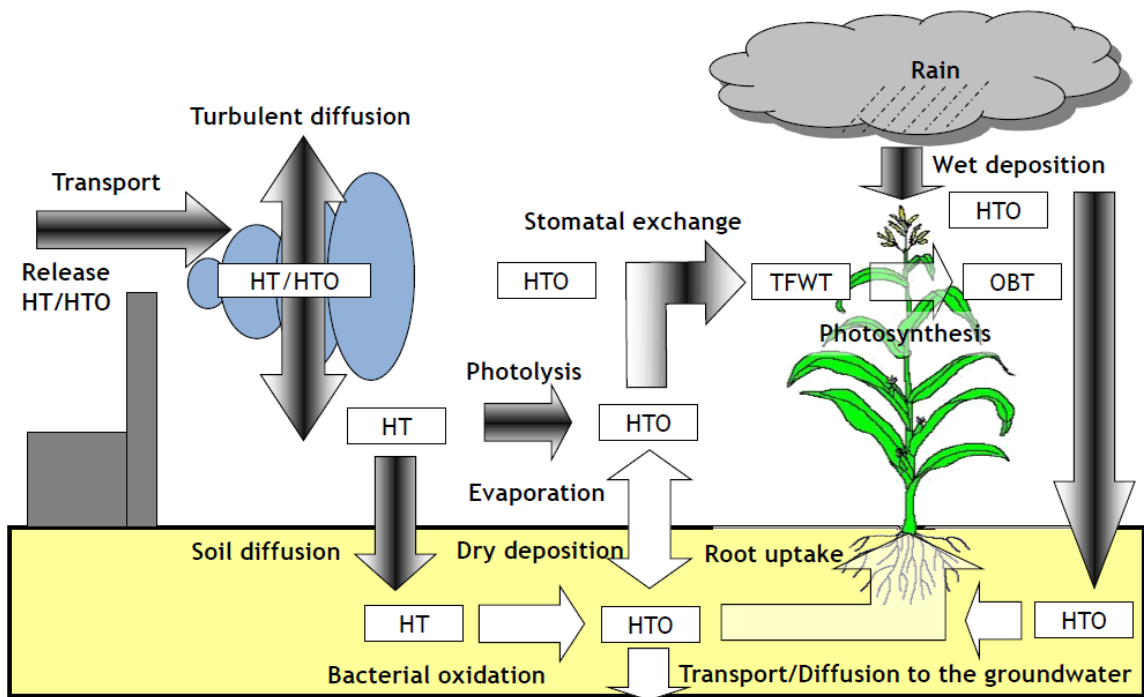


Obrázek 12 - Diagram přenosu tritia v rámci jaderné elektrárny a výměny s prostředím [14]

3.3. Tritium uvolňované z jaderných elektráren

Vliv jaderného zařízení na úroveň tritia v životním prostředí je vždy vysoce lokalizovaný. Tritium se může z jaderných elektráren za běžného provozu uvolňovat pouze tehdy, když se dostane do plyných nebo kapalných odpadů. To nastává v případě kontrolovaných i nekontrolovaných únicích chladiva, ze kterého se tritium uvolňuje i netěsnostmi.

Na obrázku 13 je zobrazen koloběh tritia vypouštěného z jaderné elektrárny v životním prostředí. Jsou znázorněny některé již zmiňované procesy přeměn, kterými tritium prochází. Tritium, které je vypuštěno z jaderného zařízení do moře nebo řeky, se může do půdy dostat přes vypařování vody. [15]



Obrázek 13 - koloběh tritia v životním prostředí [15]

3.4. Vyhodnocování radiační zátěže

Pro posouzení účinků ionizujícího záření na obyvatelstvo a životní prostředí je třeba toto působení kvantifikovat. V praxi se používá vícero na sebe navazujících veličin a vyhodnocování ozáření obyvatelstva je velmi komplexní a rozsáhlý proces, který musí zahrnout výpočet vnitřního i vnějšího ozáření. V této práci proto budou uvedeny pouze nejpoužívanější veličiny, se kterými počítá i program NORMAL pro rozptylovou studii (viz kapitoly 5 a 6). Značení těchto veličin se může lišit podle literatury, v této práci je použito značení podle metodiky hodnocení radiační zátěže programu NORMAL.

Veličina *ekvivalentní dávka* H^o značí dávku absorbovanou orgánem nebo tkání $\mathcal{R}^{r,o}$ pronásobenou radiačním váhovým faktorem W^r , který se liší dle druhu záření. Pro vícero druhů záření r se pak výsledná ekvivalentní dávka na orgán či tkáň o určí jako

$$H^o = \sum_r W^r \cdot \mathcal{R}^{r,o}. \quad (8)$$

Absorbovaná dávka $\mathcal{R}^{r,o}$ má rozměr gray [Gy], radiační váhový faktor W^r je bezrozměrná veličina. Ekvivalentní dávka H^o používá jako jednotku sievert [Sv]. [16]

Radiační váhový faktor W^r reprezentuje rozsah a závažnost vzniklé zdravotní újmy pomocí rozdílného biologického účinku záření r . Tyto váhové faktory jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 – Radiační váhové faktory [16]

Druh záření a jeho energie		W^r
Fotony všech energií		1
Elektrony a miony všech energií		1
Neutrony	$E_n < 1 \text{ MeV}$	$2,5 + 18,2 e^{-\frac{\ln^2 E_n}{6}}$
	$1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV}$	$5,0 + 17,0 e^{-\frac{\ln^2(2E_n)}{6}}$
	$E_n > 50 \text{ MeV}$	$2,5 + 3,25 e^{-\frac{\ln^2(0,04E_n)}{6}}$
Protony a nabitě piony		2
Částice alfa, štěpné produkty, těžké ionty		20

Různé lidské orgány a tkáně mají různou radiosenzitivu (z hlediska pravděpodobnosti stochastických účinků). Ta je popsána tkáňovým váhovým faktorem W^o . Veličina *efektivní dávka* E se pak určuje jako součet součinů všech ekvivalentních dávek v jednotlivých ozářených orgánech či tkáních podle vztahu

$$E = \sum_o W^o \cdot H^o. \quad (9)$$

Jednotkou efektivní dávky je sievert [Sv]. V tabulce 2 jsou uvedeny tkáňové váhové faktory dle vyhlášky č. 422/2016 Sb. (příloha č. 3) Hodnota W^o pro ostatní tkáně se vytahuje k aritmetickému průměru středních dávek ve 13 orgánech a tkáních. Jedná se o nadledviny, mimohrudní (extratorakální) oblast, žlučník, srdce, ledviny, lymfatické uzliny, svalstvo, sliznice dutiny ústní, slinivka, prostata (v případě mužů), tenké střevo, slezina, brzlík, děloha a děložní hrdlo (v případě žen). [16]

Tabulka 2 - Tkáňové váhové faktory [16]

Tkáň nebo orgán	W ^o
Kostní dřev (červená)	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Mléčná žláza	0,12
Ostatní tkáně a orgány	0,12
Gonády	0,08
Močový měchýř	0,04
Jícen	0,04
Játra	0,04
Štítná žláza	0,04
Povrch kostí	0,01
Možek	0,01
Slinné žlázy	0,01
Kůže	0,01

Pro zohlednění vlivu vnitřního ozáření se používají veličiny *úvazek ekvivalentní dávky* a *úvazek efektivní dávky*. Jedná se o časové integrály příslušných dávek od příjmu radionuklidu po dobu τ , a to do 70 let věku. [16]

Dále je potřeba kvantifikovat vliv ozáření celé populace dané lokality. K tomu slouží veličiny definované jako součet dané dávky přes všechny jedince [16]. Jedná se o následující veličiny:

- Kolektivní ekvivalentní dávka [Sv]
- Kolektivní efektivní dávka [Sv]
- Úvazek kolektivní ekvivalentní dávky [Sv]
- Úvazek kolektivní efektivní dávky [Sv]

Pro vypočtení dávky, která je způsobena vlivem výpustí radionuklidů z jaderné elektrárny na okolí, slouží matematické modely pro rozptyl radionuklidů v životním prostředí. Faktory ovlivňující vypočtenou dávku jsou zeměpisná poloha jaderného zařízení, místa výpustí, rozložení obyvatelstva, zemědělská výroba, stravovací návyky a mobilita

radionuklidů v životním prostředí. Radionuklidy o stejné aktivitě uvolněné z různých jaderných zařízení nezpůsobí stejnou dávku pro okolní obyvatelstvo. [3]

3.5. Radiační zátěž způsobená tritiem

Tritium je slabý beta zářič, způsobuje tedy především vnitřní ozáření. K tomu dochází buď po vdechnutí, nebo po požití radionuklidu. Ke stanovení absorbované aktivity je třeba monitorovat či odhadnout množství vdechnutého vzduchu, a především v případě tritia pak množství požití vody během jednoho roku. Není-li k dispozici dostatečné množství dat o množství vdechnutého vzduchu a požití vodě, používají se hodnoty uvedené ve vyhlášce č. 422/2016 Sb.

Pro reprezentativní osobu (tj. jednotlivce z obyvatelstva zastupující modelovou skupinu fyzických osob, které jsou z daného zdroje a danou cestou nejvíce ozařovány [18]) je množství vdechnutého vzduchu a požití vody v jednom roce odlišné podle věku této reprezentativní osoby. Data jsou uvedena v tabulce 3.

Tabulka 3 - Množství vdechnutého vzduchu a požití vody v jednom roce [16]

Věk reprezentativní osoby	Vdechnutý vzduch [m ³]	Požítá voda [l]
do 5 let včetně	1 500	275
od 6 do 15 let včetně	6 500	365
starší 15 let	8 500	730

Pracovník pracující 2000 hodin ročně vdechne během pracovní doby 2 000 m³ vzduchu. [17]

3.5.1. Konverzní faktory

Pro vyhodnocení radiační zátěže daným prvkem se používá úvazek efektivní dávky. Hodnota získaná z monitorování, tedy naměřená hodnota, je aktivita přijatého radionuklidu, která se uvádí v Bq. Pro přepočítání této aktivity na úvazek efektivní dávky je potřeba použít konverzní faktory. Tyto konverzní faktory jsou pro každý radionuklid kategorizovány podle způsobu přijetí a jejich hodnoty se liší pro radiačního pracovníka a pro jedince z obyvatelstva. Stanovuje je vyhláška č. 422/2016 Sb.

Konverzní faktory pro požití

Tabulka 4 zobrazuje konverzní faktory pro příjem tritia požitím jednotlivcem z obyvatelstva (rozděleno na kategorie podle věku) a radiačním pracovníkem. Konverzní faktor pro požití radionuklidu se značí h_{ing} (ingesce) a jeho jednotkou je Sv/Bq. [16]

Tabulka 4 - Konverzní faktory h_{ing} pro příjem požitím tritia jednotlivcem z obyvatelstva a radiačním pracovníkem, uvedeno v Sv/Bq [16]

Příjemce	Jednotlivec z obyvatelstva						Radiační pracovník
	Věk	<1 rok	1 rok	5 let	10 let	15 let	dospělý
Tritiová voda		$6,4 \cdot 10^{-11}$	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$
OBT		$1,2 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$7,3 \cdot 10^{-11}$	$7,3 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$

Konverzní faktory pro vdechnutí

V tabulce 5 jsou uvedeny konverzní faktory pro příjem radioaktivních aerosolů tritia vdechnutím jednotlivcem z obyvatelstva. Hodnoty pro příjem radioaktivních aerosolů inhalací nejsou pro radiačního pracovníka v případě tritia ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. uvedeny. Konverzní faktor pro vdechnutí radionuklidu se značí h_{inh} (inhalace) a jeho jednotkou je Sv/Bq. [16]

V tomto případě se konverzní faktory ještě liší podle typu absorpce v plicích na tři kategorie – F, M a S. Tyto kategorie charakterizují rychlost, s jakou látka přechází z plic do tělesných tekutin (F – rychle, M – středně rychle, S – pomalu). [17]

Tabulka 5 - Konverzní faktory h_{inh} pro příjem vdechnutím aerosolů tritia jednotlivcem z obyvatelstva, uvedeno v Sv/Bq [16]

Typ absorpce	Věk jednotlivce z obyvatelstva					
	<1 rok	1 rok	5 let	10 let	15 let	dospělý
F	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$8,2 \cdot 10^{-12}$	$5,9 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$
M	$3,4 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$8,2 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$
S	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$6,3 \cdot 10^{-10}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-10}$

V tabulce 6 jsou zapsány konverzní faktory pro příjem vdechnutím radioaktivních výparů tritia. Konverzní faktory pro radiačního pracovníka jsou shodné s konverzními faktory pro dospělého jednotlivce z obyvatelstva. Hodnoty jsou uvedené pro výpary obsahující organicky vázané tritium, tritiovaný vodík HT, tritiovaný metan CH₃T a pro tritiovanou vodní páru. [16]

Tabulka 6 - Konverzní faktory h_{inh} pro příjem vdechnutím radioaktivních výparů tritia jednotlivcem z obyvatelstva a radiačním pracovníkem, uvedeno v Sv/Bq [16]

Výpary	Věk jednotlivce z obyvatelstva					
	<1 rok	1 rok	5 let	10 let	15 let	dospělý
OBT	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-10}$	$7,0 \cdot 10^{-11}$	$5,5 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$
HT	$6,4 \cdot 10^{-15}$	$4,8 \cdot 10^{-15}$	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$2,3 \cdot 10^{-15}$	$1,8 \cdot 10^{-15}$	$1,8 \cdot 10^{-15}$
CH₃T	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$4,8 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$
Vodní pára	$6,4 \cdot 10^{-11}$	$4,8 \cdot 10^{-11}$	$3,1 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$

Pro rozptylovou studii provedenou v této diplomové práci se používají konverzní faktory v případě ingesce pro tritiovou vodu, v případě inhalace aerosolů konverzní faktory pro pomalou absorpci S a pro inhalaci výparů tritia pak konverzní faktory pro vodní páru.

4. Řešení výпустí tritia na JE Temelín

Po dlouhá léta je tritium považováno za jeden z významnějších problémů běžného provozu jaderných elektráren. Jak již bylo zmíněno, na tlakovodních jaderných elektrárnách vzniká tritium vícero způsoby – aktivací bóru, aktivací lithia aktivací deuteria a ternárním štěpením (viz kapitolu 3.2.1).

Tabulka 7 ukazuje přibližný příspěvek jednotlivých zdrojů tritia v primárním okruhu.

Tabulka 7 - Zdroje tritia v primárním okruhu JETE a jejich zastoupení [20]

ZDROJ	%
Aktivace bóru v chladivu	62 %
Ternární štěpení	33 %
Aktivace lithia (z bóru) v palivu	4 %
Aktivace lithia (z bóru) v chladivu	0,4 %
Aktivace bóru v palivu	0,3 %
Aktivace deuteria v chladivu	0,3 %

Tritiovou vodu lze po veškerém čištění a filtrování vypustit do vodotečí případně do ovzduší, nebo ji vracet zpátky do primárního okruhu. Druhá možnost však není vždy výhodná z vícero hledisek. Vznik tritia je dán a nelze jej rozumně dosažitelnými prostředky ovlivnit. V případě skladování tritiových vod za účelem postupného vymírání tritia by docházelo k zamoření prostor elektrárny tritiem, čímž by se zvýšila expozice pracovníků. Další nevýhodou by byla ztráta citlivosti indikátoru (stopovače) vody z primárního okruhu vzhledem k vysokému pozadí, které by bylo způsobeno rozptylem tritia v systémech jaderné elektrárny při jeho recyklaci. Akumulace tritia by jen oddálila nutnost jeho vypuštění a nepřispěla by k likvidaci. Na ETE nejsou nádrže o dostatečné kapacitě, aby v nich mohlo tritium vymírat po dobu okolo sta let. [21]

4.1. Legislativní požadavky na limitaci výпустí

Atomový zákon udává, že „každý, kdo vykonává radiační činnost, je povinen zajistit, aby v důsledku této činnosti, a to i v případě nahromadění radioaktivní látky uvolňované z pracoviště, byla při optimalizaci radiační ochrany použita dávková optimalizační mez pro reprezentativní osobu 0,25 mSv za rok a v případě energetického jaderného zařízení

současně 0,2 mSv pro výpusti do ovzduší a 0,05 mSv pro výpusti do povrchových vod.“
[18]

O konkrétních autorizovaných limitech pro energetická jaderná zařízení rozhoduje Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Limity pro jadernou elektrárnu Temelín jsou uvedeny v následujících podkapitolách. K přepočtu aktivity na efektivní dávku z ozáření reprezentativní osoby slouží konverzní faktory uvedené v kapitole 3.5.1.

4.1.1. Legislativní požadavky na výpusti do hydrosféry z ETE

Uvádění radionuklidů do životního prostředí ve formě kapalných výpustí z JE Temelín do řeky Vltavy v profilu Kořensko musí být limitováno tak, aby součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření nepřesáhl pro jednotlivce z kritické skupiny obyvatelstva autorizovaný limit 3 μSv za rok. Kritickou skupinou obyvatelstva se rozumí obyvatelé nacházející se do vzdálenosti 3 km od místa výpusti odpadních vod do recipientu. [22]

4.1.2. Legislativní požadavky na výpusti do ovzduší z ETE

Uvádění radionuklidů do životního prostředí ve formě výpustí do ovzduší z ventilačních komínů výrobních bloků, z ventilačního komínu BAPP a ze systémů PSA a PVPG musí být limitováno tak, aby součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření nepřesáhl pro jednotlivce z kritické skupiny obyvatelstva autorizovaný limit 40 μSv za rok. V tomto případě jsou kritickou skupinou obyvatelstva obyvatelé trvale žijící do vzdálenosti 5 km od středu JE Temelín. [23]

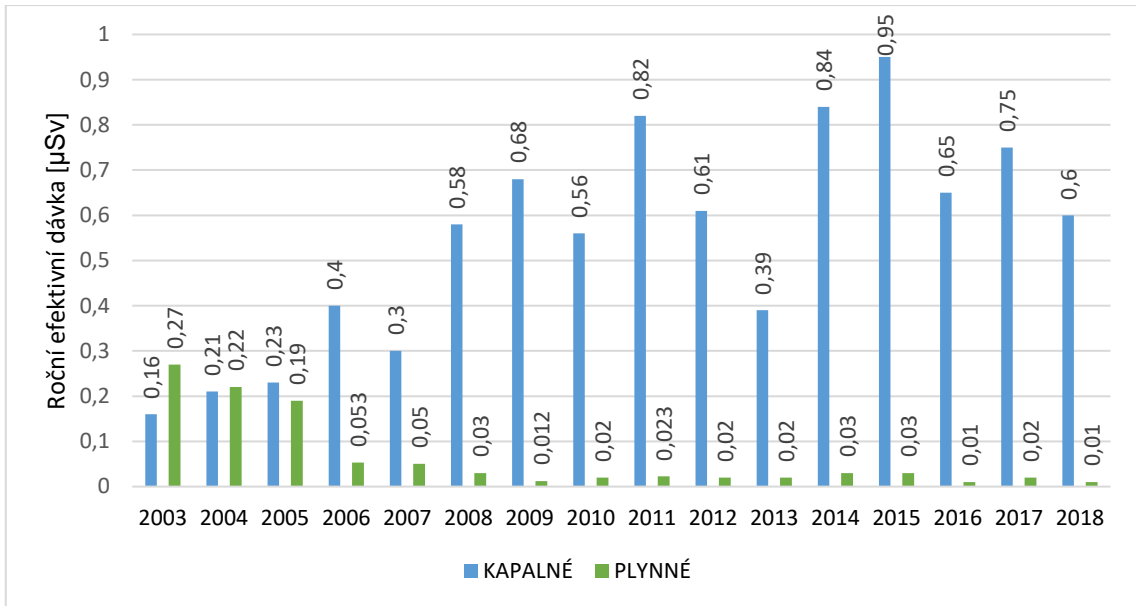
4.2. Čerpání limitů

V případě JE Temelín je roční efektivní dávka, kterou obdrží reprezentativní osoba z výpustí do vodotečí, je průměrně 0,55 μSv a limit je průměrně čerpán do 20 %. Nejvíce tento limit byl čerpán v roce 2015, kdy efektivní dávka dosáhla 0,95 μSv a limit tak byl čerpán do 31,7 %. Roční efektivní dávka z ozáření reprezentativní osoby z výpustí do ovzduší činí průměrně 0,06 μSv a limit je průměrně čerpán do 0,16 %. Nejvíce byl tento limit čerpán v roce 2003, kdy dosáhl 0,68 % při efektivní dávce 0,27 μSv . [24], [25], [26], [27]

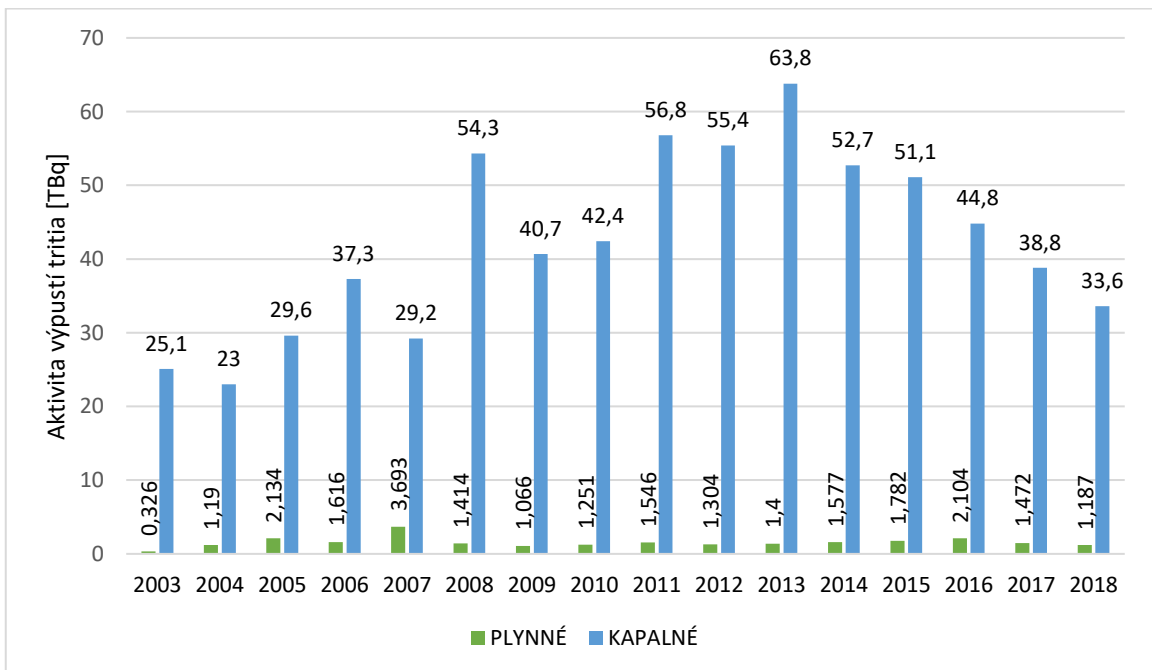
Roční efektivní dávky v letech 2003 až 2018 jsou uvedeny na obrázku 14. Vyšší hodnoty pro výpusti do atmosféry v letech 2003, 2004 a 2005 jsou způsobeny především

projektovou chybou na zařízení monitorování objemové aktivity technologické vzdušiny na obou blocích. [24]

Z jaderné elektrárny Temelín se ročně do vodotečí vypustí tritiové vody o průměrné aktivitě 42 TBq (data z let 2003 až 2018). Do ovzduší se pak ročně vypustí tritium o průměrné aktivitě pouze 1,6 TBq (data z let 2003 až 2018). Přesná data aktivit výpustí tritia pro roky 2003 až 2018 jsou uvedena v grafu na obrázku 15. [24], [25], [26], [27]

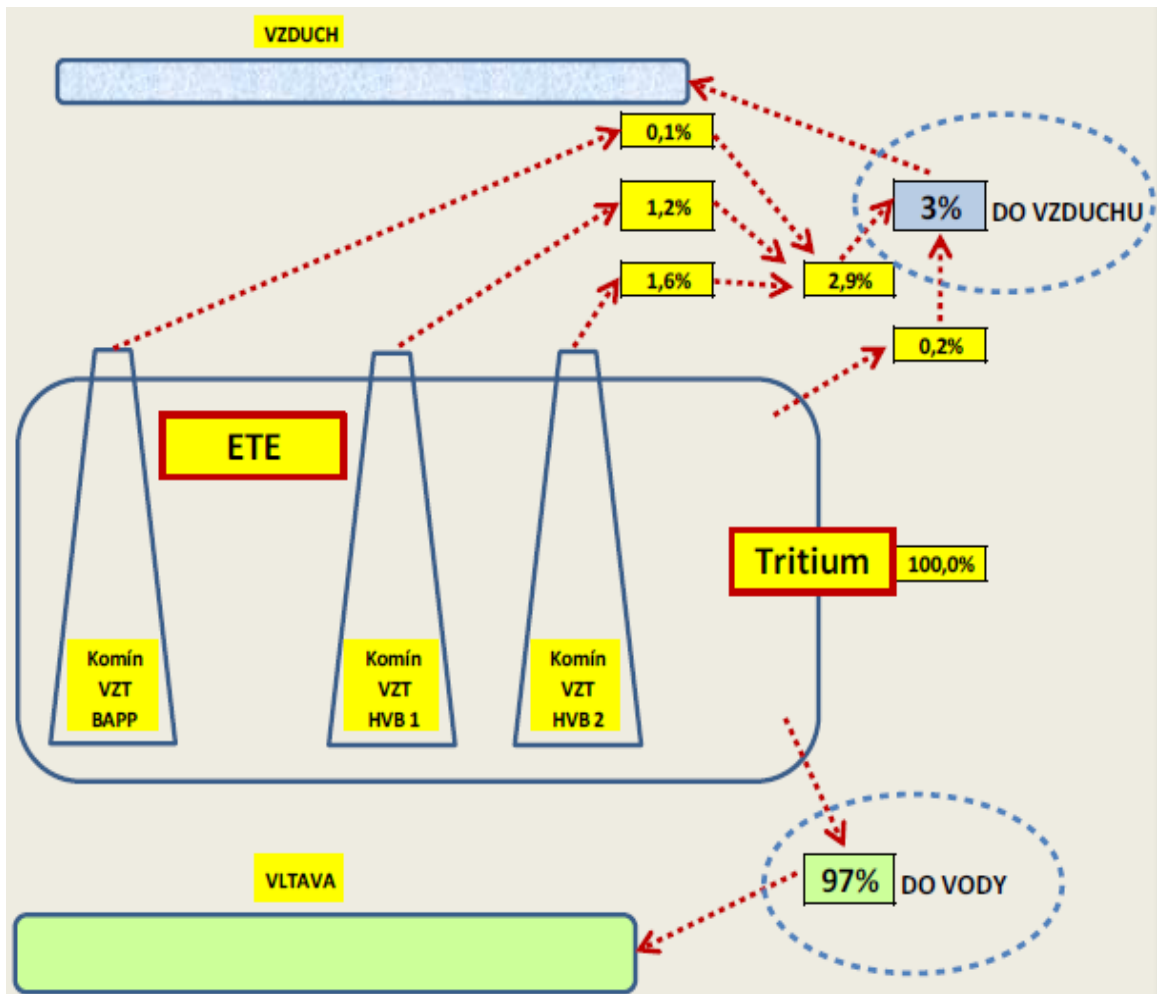


Obrázek 14 – Roční efektivní dávka z celkových výpustí do vodotečí a do atmosféry v letech 2003 až 2018 [24], [25], [26], [27]



Obrázek 15 – Aktivity výpustí tritia pro roky 2003 až 2018 [24], [25], [26], [27]

Limity pro vypouštění tritia do hydrosféry jsou o řád přísnější než ty pro vypouštění do atmosféry. Přesto je využíváno především vypouštění tritiových vod do vodotečí. Tritiové vody tvoří 99 % aktivity kapalných výpustí a vyvstává obava o překročení limitů kapalných výpustí, především v případě častějších přechodových režimů, což vede k hledání nových řešení. Stávající řešení distribuce tritia do životního prostředí je zobrazeno na ilustračním bilančním schématu na obrázku 16.



Obrázek 16 – Distribuce tritia z ETE do životního prostředí [20]

4.3. Monitorování tritia na ETE

Aby bylo naměřené hodnoty efektivních dávek s čím srovnávat a správně tak vyhodnotit radiační zátěž v důsledku provozu jaderné elektrárny Temelín, je její okolí důkladně monitorováno už od roku 1988. Probíhá jak kvalitativní, tak kvantitativní měření radioaktivních látek v životním prostředí. Sleduje se například povrchová a podzemní voda, mléko, zemědělské a lesní produkty, ryby, spady, aerosoly a půda. [12]

Podle platné legislativy je každý, kdo využívá jadernou energii, „*povinen přednostně zajišťovat jadernou bezpečnost, bezpečnost jaderných položek a radiační ochranu, a to při zohlednění současné úrovně vědy a techniky a všech hospodářských a společenských hledisek*“ (§ 5 zákona č. 263/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů). Programy monitorování jsou tedy zcela odtrženy od ekonomických ukazatelů výroby a SÚJB každý rok vyhodnocuje úsilí provozovatele JE při plnění požadavků na zajištění radiační ochrany. [28]

Ke kategorizování hodnot aktivit jednotlivých radionuklidů v zajištění radiační ochrany se používají referenční úrovně – záznamová, vyšetřovací a zásahová. Záznamová úroveň standardně odpovídá desetíně limitu a určuje, od jaké hodnoty se musí výsledky monitorování uchovávat. Vyšetřovací úroveň se obvykle stanovuje na tři desetiny limitu nebo na hranici standardně se vyskytujících hodnot aktivit. Její překročení signalizuje nestandardní stav, změnu proti očekávané situaci a vede k šetření příčin překročení a případných následků. Překročení zásahové úrovně vede ke konkrétním mimořádným opatřením, zpravidla se musí činnost přerušit a zjednat náprava. Zásahových úrovní může být několik, dle následných opatření. [13]

4.3.1. Měření výpustí do ovzduší

Měření aktivity tritia probíhá souběžně s měřením aktivity uhlíku ^{14}C . Na základě periodických týdenních odběrů vzorků vzdušiny na speciální sorbent a jejich zpracování se určuje příspěvek tritia (a uhlíku) k úvazku efektivní dávky jednotlivce z kritické skupiny obyvatelstva. Za všech provozních režimů jsou tyto vzorky odebírány z ventilačního komína BAPP a z vnitřních komínů HVB, zatímco z vnějších komínů HVB se vzorky odebírají jenom při odstávkách. [27]

4.3.2. Měření výpustí do vodotečí

Monitorování kapalných výpustí z ETE je založeno na bilančním měření před vypouštěním do sběrné jímky odpadních vod a poté do ponořeného stupně Kořensko. Vypouštění kontrolních nádrží do sběrné jímky, které je automaticky kontrolováno měřicími systémy radiační kontroly, je možné pouze se souhlasem směnového inženýra. V případě výskytu překročení referenčních úrovní aktivity dochází k automatickému uzavření příslušných armatur a k zastavení jejich vypouštění. [27]

Do čerpání koncentračních a bilančních limitů aktivit pro odpadní vody vypouštěné z ETE do Vltavy se nezapočítává aktivita radionuklidů obsažených v surové vltavské vodě. To znamená, že od naměřené beta aktivity vypouštěné odpadní vody ETE se odečítá průměrná roční hodnota celkové beta aktivity vzorku surové vltavské vody v profilu Hněvkovice (bez příspěvku tritia). [27]

4.3.3. Výsledky monitorování tritia na ETE za rok 2018

V roce 2018 v oblasti výpustí do vodotečí a do ovzduší nedošlo k překročení autorizovaných limitů a hodnoty aktivit výpustí tritia jsou uvedeny v grafech na obrázku 14. V případě výpustí do vodotečí se vyskytly tři případy překročení vyšetřovací nebo zásahové úrovně vypuštěné aktivity tritia, takto jsou uvedeny v dokumentu Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín 2018 [27]:

- *„V měsíci květen 2018 došlo k řízenému a plánovanému překročení vyšetřovací úrovně vypuštěné aktivity bilancovaného tritia z kontrolních a sběrných nádrží ETE.*
- *Dne 01.07.2018 od 03:33 do 03:33 hod došlo k překročení zásahové úrovně (ZÚ1) objemové aktivity tritia v KN chemické kanalizace (0TZ01B02) před vypuštěním na neutralizaci.*
- *Dne 24.09.2018 04:56 hod došlo k překročení zásahové úrovně (ZÚ1) objemové aktivity tritia v KN 0TZ01B02 (nádrž odpadních vod) před vypuštěním na neutralizaci.“*

4.3.4. Výsledky monitorování tritia v okolí ETE za rok 2018

V okolí ETE se monitoruje tritium v dešťových srážkách, povrchových a půdních vodách a v pitné vodě. Minimální detekovatelná aktivita (MDA) je 3 Bq/l. [27]

Dešťová voda

Dešťové srážky jsou kontinuálně odebírány v meteostanici Temelín. V lednu, únoru, květnu, srpnu a listopadu 2018 byla zaznamenána zvýšená hodnota tritia, mírně nad minimální detekovatelnou aktivitou (MDA). Nejednalo se však o překročení vyšetřovací úrovně. [27] Přirozená aktivita tritia ve srážkách ve střední Evropě je do 1 Bq/l. [29]

Povrchová voda

Objemové aktivity tritia na Vltavě jsou určovány ze vzorků odebíraných v několika lokalitách (Solenice, Hněvkovice, Hladná, Kořensko, Bělohůrenský rybník, skládka Temelínec a retenční nádrž Býšov). V pojistné nádrži dešťových vod Výšov a v retenční nádrži Býšov byly naměřeny zvýšené koncentrace tritia. Tyto koncentrace nepřekračují vyšetřující úroveň a souvisí s netěsnostmi na parogenerátoru č. 4 na druhém výrobním bloku dne 26.6.2015. V lokalitě Bělohůrecký rybník v únoru a v srpnu 2018 byla zaznamenána zvýšená hodnota tritia, mírně nad MDA a nepřekračující vyšetřovací úroveň. V ostatních lokalitách byly všechny hodnoty naměřeny pod MDA. [27] Úroveň aktivity tritia bez ovlivnění provozu JE je přibližně 1 Bq/l. [29]

Podzemní voda

Aktivita podzemních vod je měřena v odvodňovacích vrtech a ve studně Křtěnov. V několika případech byla zaznamenána hodnota mírně nad MDA, avšak pod vyšetřovací úroveň monitorovacího programu. [27] Aktivita tritia v podzemních vodách na severní polokouli může ojediněle dosahovat i několika Bq/l. Je to způsobeno tritiem ze srážek v období jaderných testů. [29]

Pitná voda

Pitná voda se měří ve vodovodech v Týně nad Vltavou a v Dřítěni a ve studních v Kočíně a v Temelíně. Všechny zaznamenané hodnoty v průběhu roku byly pod minimální detekovatelnou dávkou. Podle vyhlášky č. 422/2016 Sb. je stanovena vyšetřovací úroveň celkové objemové aktivity beta na 0,5 Bq/l. [29]

4.4. Návrh technického řešení dle EGP PRAHA

Možné řešení pro omezení efektivní dávky z ingesce je vypouštění tritiových vod do ovzduší přes komín Budovy aktivních pomocných provozů (BAPP). Přes vzduchotechniku dochází k mísení tritiové vody s větracím vzduchem, který je pak vypouštěn do životního prostředí.

Navrhované řešení firmy ENERGOPROJEKT PRAHA snižuje podíl výpustí tritia do hydrosféry o z 97 % na 33 %. Tím se sice zvýší výpustí tritia do atmosféry přibližně na 3 750 GBq za rok, avšak to stále představuje pouze 0,005 % limitu daného legislativou. Pro přesnější ověření těchto limitů je třeba vypracovat rozptylovou studii. [20]

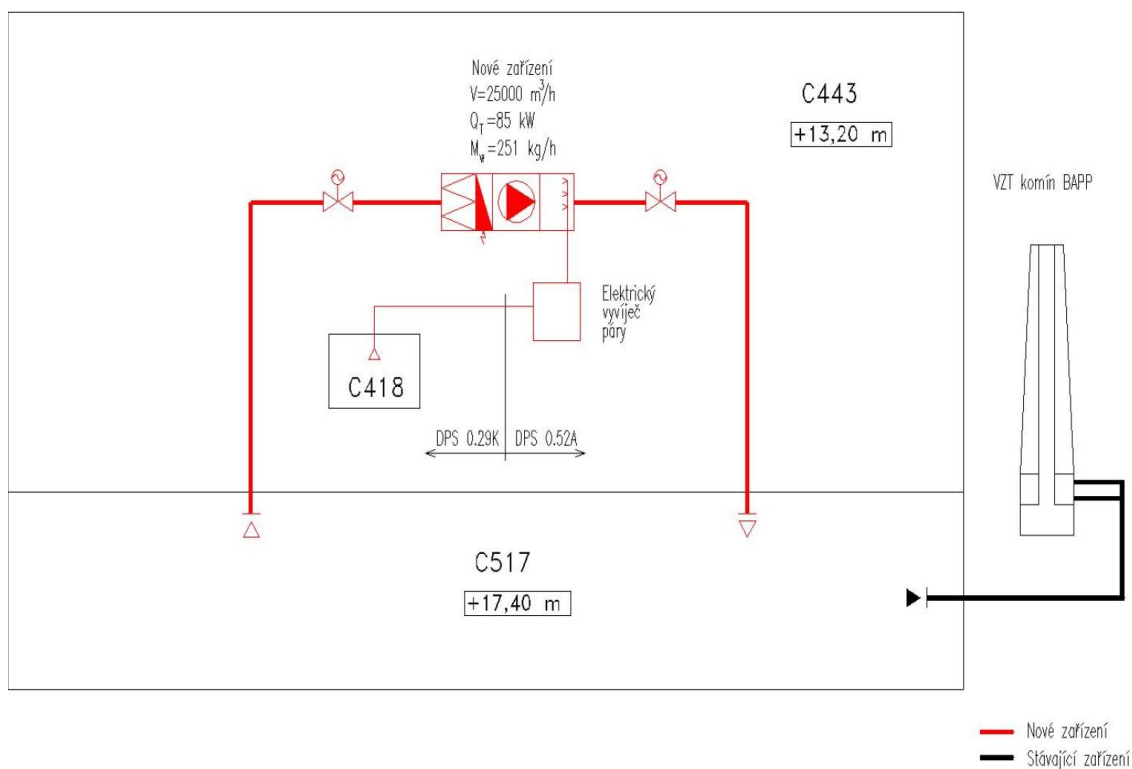
Pro zvlhčování vzduchu v komínu BAPP tritiovou vodou bude nainstalováno vzduchotechnické zařízení – zvlhčovací jednotka a vzduchotechnická jednotka vybavená zvlhčovací komorou. Existují dvě možnosti, jak zde tento vzduch zvlhčovat. Adiabatické vlhčení probíhá rozstříkáním vodní kapek (vodní mlhy) do proudu větracího vzduchu za ochlazování vzduchu. Při parním vlhčení je procházející proud vzduchu zvlhčován tritiovou párou a nedochází k ochlazování vzduchu, jeho teplota zůstává konstantní. [20]

Použití elektrické parní zvlhčovací jednotky má několik výhod. Jednak lze takto zvlhčovaným vzduchem odvést větší množství vody, jednak je riziko kondenzace vzhledem k množství dávkované tritiové páry do odváděného vzduchu menší. Výhodou je také, že zvlhčování probíhá při konstantní teplotě. Proto bude navržené technické řešení uvažovat zvlhčování vzduchu tritiovou párou. Nabízí se tři varianty technického řešení. [20]

4.4.1. Varianta 1

První varianta navrhuje nasávat vzduch z výtlačného vzduchotechnického kanálu, kdy po ohřevu a zvlhčení ve vzduchotechnické jednotce bude vzduch zaveden zpět do výtlačného kanálu vzduchotechniky. Tam bude mísen s hlavním proudem vzduchu a dále odváděn komínem BAPP do životního prostředí. Také budou navrženy armatury pro oddělení obtoku se vzduchotechnickou jednotkou od výtlačného kanálu. Schéma tohoto řešení je zobrazeno na obrázku 17. [20]

Výhodou této varianty je jednoduchost koncepčního a dispozičního řešení a organizovaný způsob zvlhčování. Dalšími výhodami jsou nezávislost na jiných vzduchotechnických systémech, stabilní průtok vzduchu určeného pro zvlhčování a skutečnost, že celkový průtok odváděného vzduchu komínem BAPP není tímto řešením ovlivněn. I přes nutnost realizace dvou průchodek o výtlačného kanálu vzduchotechniky se tato varianta jeví jako nejvýhodnější. [20]

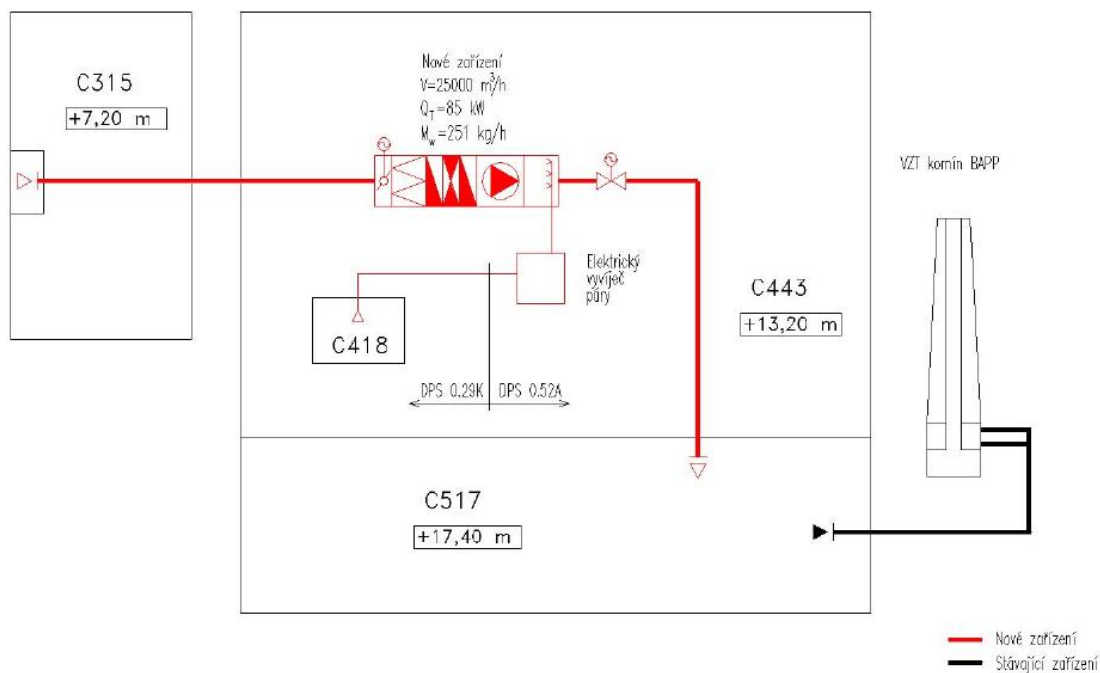


Obrázek 17 - Schéma vypouštění třetího komína BAPP: Varianta 1 - Přívod vzduchu z výtlačného kanálu vzduchotechniky [20]

4.4.2. Varianta 2

Druhá varianta uvažuje nasávání vzduchu z venkovního prostředí, po ohřevu a zvlhčení v jednotce vzduchotechniky by byl vzduch zaveden do výtlačného kanálu vzduchotechniky. Tam bude mísen s hlavním proudem vzduchu a dále odváděn komínem BAPP do životního prostředí. Také budou navrženy armatury pro oddělení obtoku se vzduchotechnickou jednotkou od výtlačného kanálu. Schéma tohoto řešení je zobrazeno na obrázku 18. [20]

Výhodami tohoto řešení jsou jednoduchost koncepčního řešení, stabilní průtok zvlhčovaného vzduchu a organizovaný způsob jeho zvlhčování. Tato varianta má však mnohé nevýhody. Zajištění přívodu venkovního vzduchu by bylo značně složité a byly by vyžadovány rozsáhlejší stavební úpravy. Přívodní vzduchotechnické potrubí by bylo třeba vést z přívodní strojovny vzduchotechniky. Také by byla nutná úprava přiváděného venkovního vzduchu na požadovanou teplotu a čistotu. Stejně tak by bylo potřeba zajistit dodávky teplé a studené vody pro vzduchotechnickou jednotku. A docházelo by také k ovlivňování celkového průtoku vzduchu ventilačním komínem. [20]

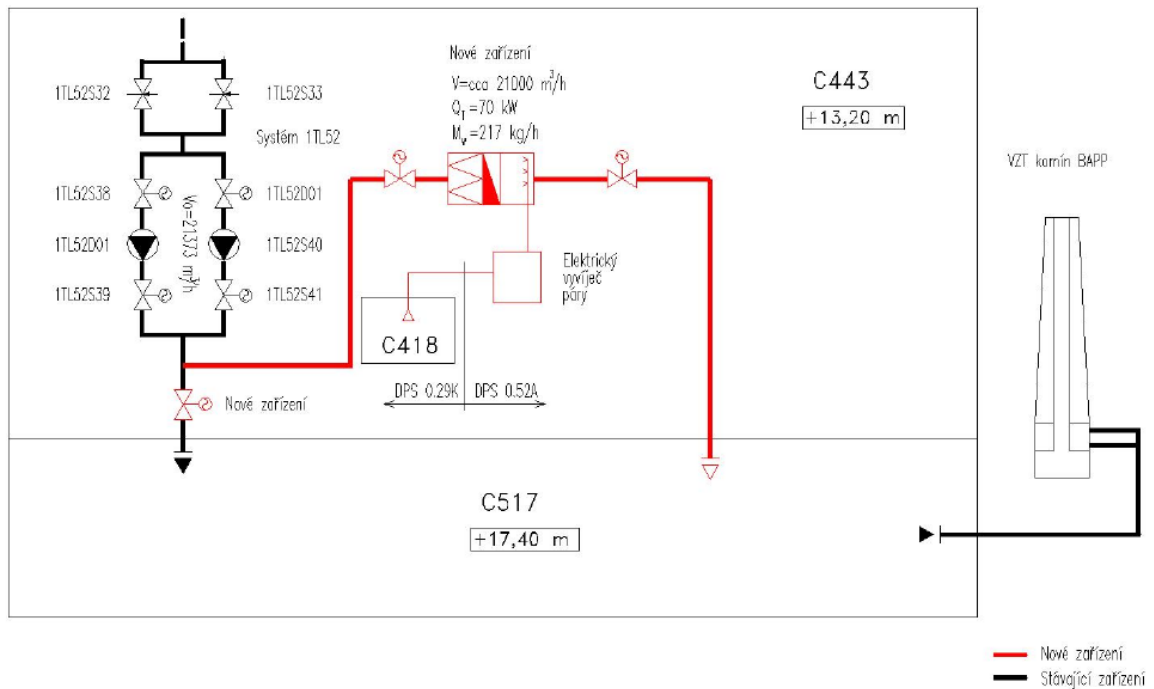


Obrázek 18 - Schéma vypouštění třetího komína BAPP: Varianta 2 - Přívod vzduchu z venkovního prostředí [20]

4.4.3. Varianta 3

V třetím případě by se vzduch nasával přímo z výtlačku vhodného vzduchotechnického systému a po ohřevu a zvlhčení v jednotce vzduchotechniky by byl zaveden zpět do výtlačného kanálu vzduchotechniky. Tam bude mísen s hlavním proudem vzduchu a dále odváděn komínem BAPP do životního prostředí. Také budou navrženy armatury pro oddělení obtoku se vzduchotechnickou jednotkou od výtlačného kanálu. Potřebná technická a dispoziční kritéria splňuje systém 1TL52 – Odvod vzduchu z místností na podlaží +13,20 m. Schéma tohoto řešení je zobrazeno na obrázku 19. [20]

Výhodami této varianty jsou jednoduchost koncepčního a dispozičního řešení a organizovaný způsob zvlhčování. Také celkový průtok odváděného vzduchu ventilačním komínem není tímto řešením ovlivněn. Jedná se ale o nestabilní řešení z pohledu množství vzduchu, které je z hlediska systému 1TL52 omezené. Nevýhodou je také závislost na provozu tohoto systému. Byla by nutné upravit odvodní vzduchotechnický systém 1TL52 a také prověřit vzduchový výkon ventilů některých jeho částí při uvažování doplnění obtoku se zvlhčovací jednotkou. [20]



Obrázek 19 - Schéma vypouštění tritia komínem BAPP: Varianta 3 - Přívod vzduchu z výtlaku systému 1TL52 [20]

4.4.4. Provoz vzduchotechnické jednotky

Pro požadované zvlhčování vzduchu tritiovou vodou se navrhuje vzduchotechnická jednotka o vzduchovém výkonu cca 25 000 m³/hod (tj. 6,94 m³/s). Takový vzduchový výkon odvede každou hodinu 0,251 m³ tritiové vody. Denně se tak odvede 6,024 m³ tritiové vody, což odpovídá ročnímu množství 2 200 m³ (za předpokladu, že vzduchotechnická jednotka je v neustálém provozu po celý rok). Pro vyloučení kondenzace vzdušné vlhkosti v potrubí a výtlačném komínu vzduchotechniky a v komínu BAPP se doporučuje udržovat maximální relativní vlhkost odváděného vzduchu na 50 %. To je stanoveno i s ohledem na pracovní podmínky měřidel radiační kontroly v komíně BAPP. [20]

Vzduchotechnická jednotka včetně elektrické parní zvlhčovací jednotky musí mít především zajištěn bezpečný a bezporuchový provoz. V případě nepřetržitého provozu zařízení (tj. 24 hodin denně) je třeba mít vzduchotechniku se 100% zálohou, tedy v redundanci 1+1. [20]

5. Rozptylová studie tritia

Pro ověření vlivu vypouštěného tritia na radiační zátěž obyvatel žijících v okolí JE Temelín s ohledem na rozložení obyvatelstva, morfologii terénu a různé kategorie počasí je vhodné vypracovat rozptylovou studii s výstupem ročních úvazků efektivních dávek. Primárním požadavkem je nepřesáhnutí autorizovaných limitů uvedených v kapitole 4.1.

K posouzení radiačního zatížení obyvatelstva v důsledku dlouhodobého normálního provozu jaderné elektrárny byl vyvinut programový systém NORMAL. Tento program slouží ke stanovení přízemních objemových aktivit ve vzduchu, plošných aktivit deponovaných na terénu a na ocenění radiační situace v okolí jaderných energetických zařízení za normálního provozu. Provádí výpočet individuálních a kolektivních dávek. Kromě lokalit jaderných elektráren Dukovany a Temelín zahrnuje i data pro lokalitu ÚJV Řež. [30]

K výpočtu celkové dávky na jedince z obyvatelstva jsou použity čtyři způsoby expozice:

- vnější ozáření z radioaktivního oblaku
- vnější ozáření od radionuklidů v sektorech větrné růžice (středované v periferním směru)
- vnitřní ozáření z inhalace radionuklidů z oblaku a z inhalace radionuklidů resuspendovaných ze zemského povrchu
- vnitřní ozáření z ingesce kontaminovaných potravin

Ve vstupních souborech jsou obsažena pevná i volitelná data. Mezi ta pevná patří například lokální geografické a demografické charakteristiky. Patří sem i Pasquillova stupnice počasí, která je více popsána v kapitole 5.1., další charakteristiky jsou popsány spolu s metodou řešení v kapitole 5.2.

5.1. Pasquillova stupnice stability počasí

Pro rozlišení stability atmosféry a počasí používá program NORMAL kategorie dle Pasquillovy stupnice tříd stability povětrnostních situací. Míra stability počasí je charakterizována intenzitou proudění vzdušných mas, lokálními poměry, slunečním osvitěm zemského povrchu, střídáním dne a noci a také změnami ročních období. Jde o dělení do šesti tříd od středně stabilní až po extrémně nestabilní. Toto dělení je zobrazeno v tabulce 8. [31]

Tabulka 8 - Kategorie Pasquillovy stupnice stability počasí [32]

Označení	Význam	Příklad a popis
A	vysoce nestabilní	velmi slunečné letní počasí
B	středně nestabilní	slunečné a teplé počasí
C	mírně nestabilní	částečná oblačnost během dne
D	neutrální	zataženo v noci nebo ve dne
E	mírně stabilní	částečně oblačno v noci
F	středně stabilní	jasná noc

Neutrální třída D charakterizuje indiferentní teplotní rozvrstvení a je typická pro zataženou oblohu ve dne i v noci. V případě stabilního (třídy E a F) nebo neutrálního (třída D) teplotního rozvrstvení se očekává, že látky budou putovat na delší vzdálenosti, než významně klesne jejich koncentrace. To je považováno za negativní jev při rozptylu některých nebezpečných látek. Pokud dochází k teplotní inverzi advekčního typu, tj. k přemístění teplejšího vzduchu nad chladnější vzduch, nastává zvýšení stability ovzduší v důsledku snížení prostorového rozptylu. [30]

Tabulka 9 zobrazuje metodiku volby třídy stability. V případě zcela zatažené oblohy se volí třída stability D, a to bez ohledu na denní dobu a rychlost větru. Pro toto třídění kategorií stability se za noc považuje časový úsek, který začíná jednu hodinu před západem slunce a končí jednu hodinu po východu slunce. [31]

Tabulka 9 – Určení třídy stability počasí podle Pasquillovy stupnice [31]

Rychlost přízemního větru [m/s]	DEN			NOC	
	Dopadající sluneční záření			Míra oblačnosti	
	silné	střední	slabé	<1/2 oblohy	>1/2 oblohy
<2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Každá kategorie stability počasí má v dané lokalitě různou pravděpodobnost výskytu. Jednotlivé pravděpodobnosti jsou určovány na základě dlouhodobých pozorování lokální povětrnostní situace. [30]

5.2. Metoda řešení

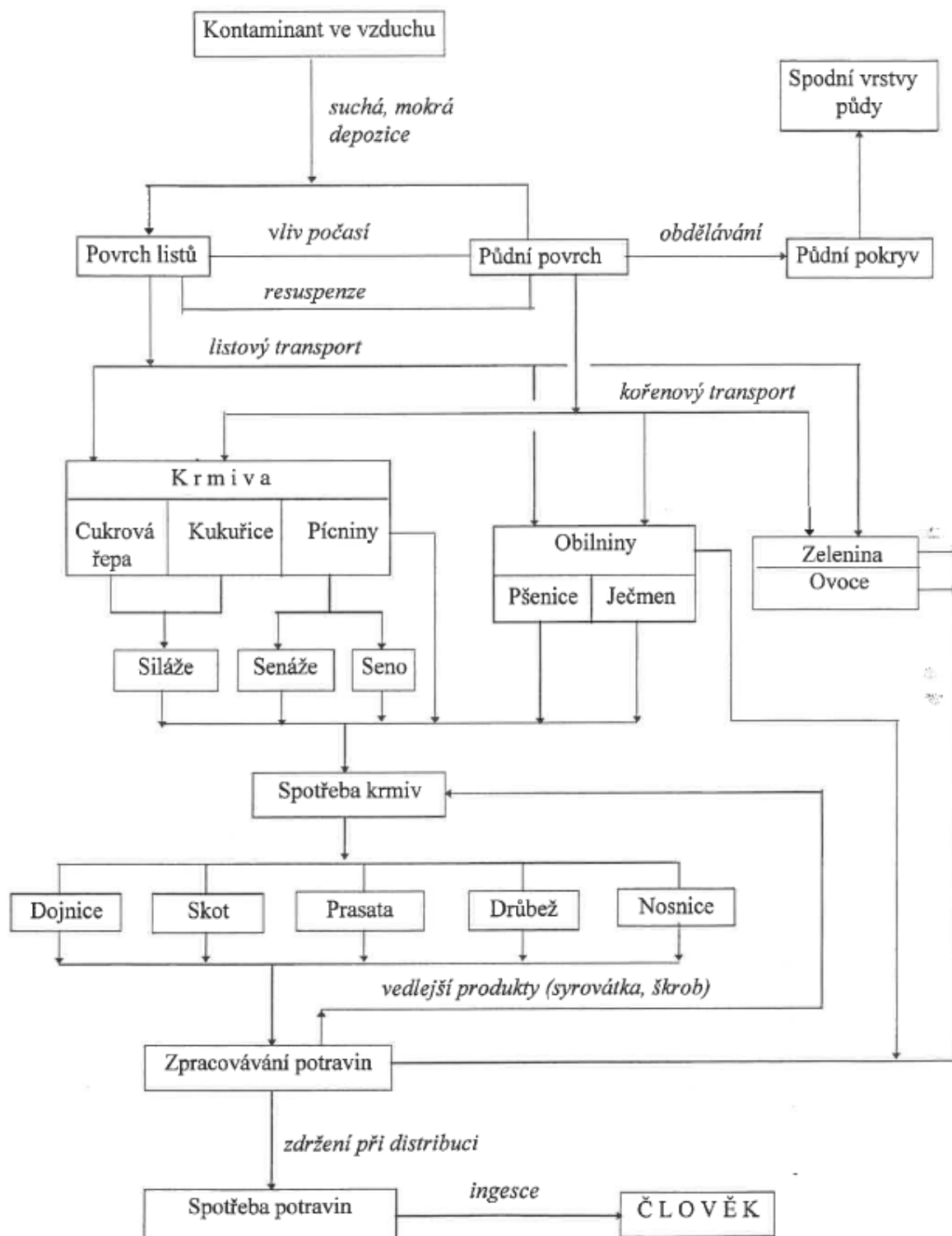
Pro výpočet přízemních koncentrací a deponované aktivity se používá Gaussův model šíření v přízemní vrstvě atmosféry. Dlouhodobé koeficienty zředění jsou v programu NORMAL počítány pomocí Gaussova modelu na základě trojrozměrné povětrnostní statistiky. Na základě poloempirických formulí je zohledňováno [16]:

- vliv blízkých objektů na rozptyl
- orografie terénu
- proměnná drsnost terénu
- vznos vlečky v důsledku tepelné vydatnosti vypouštěných vzdušín
- vertikální rychlosti výpustí z komína

Disperzní parametry pro plochý terén jsou počítány pomocí poloempirických Hoskerových formulí. Pro členitý terén jsou tyto parametry počítány podle poloempirických formulí odvozených z experimentálních měření prováděných v jaderných výzkumných zařízeních v Jülichu a Karlsruhe (tzv. KSK formule). [16]

Pro systém NORMAL byla speciálně vyvinuta modifikace dynamického modelu transportu radionuklidů potravinovými řetězci – ENCONAN. Tato modifikace respektuje dlouhodobý vliv výpustí na ekosystém. ENCONAN využívá data specifická pro podmínky České republiky. Transport nuklidů potravinovými řetězci podle modelu ENCONAN je zobrazena na obrázku 20. [16]

Nashromážděná data zahrnují 109 radionuklidů, koeficienty vymývání a suchého spadu, rozpadové konstanty, údaje o obyvatelstvu v kruhovém okolí jaderných zařízení do vzdálenosti 100 km od zdroje (pro 16 směrů a maximálně 20 vzdáleností), nadmořské výšky, drsnosti terénu a další. [30]



Obrázek 20 - Transport nuklidů potravními řetězci podle modelu ENCONAN [16]

Konverzní faktory pro přepočítání příjmu radionuklidů vdechutím a požitím jsou brány pro všechny radionuklidy podle vyhlášky č. 307/2002 Sb. Všechny faktory použité pro výpočet v této diplomové práci (tj. pro tritium) jsou shodné s aktuální vyhláškou č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

5.2.1. Omezení komplexnosti řešeného problému

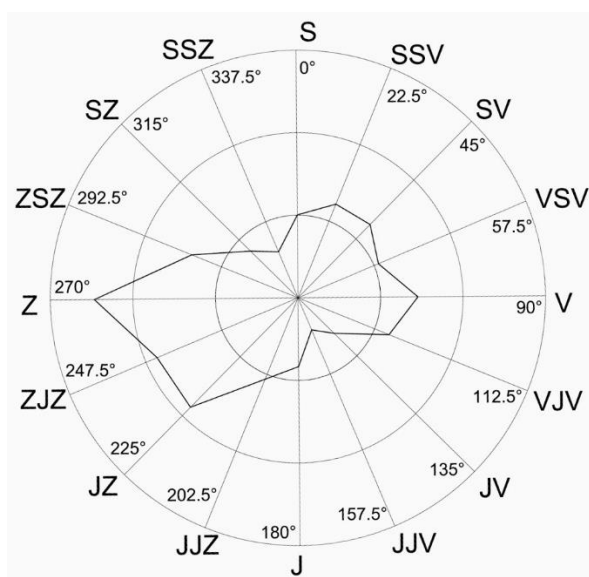
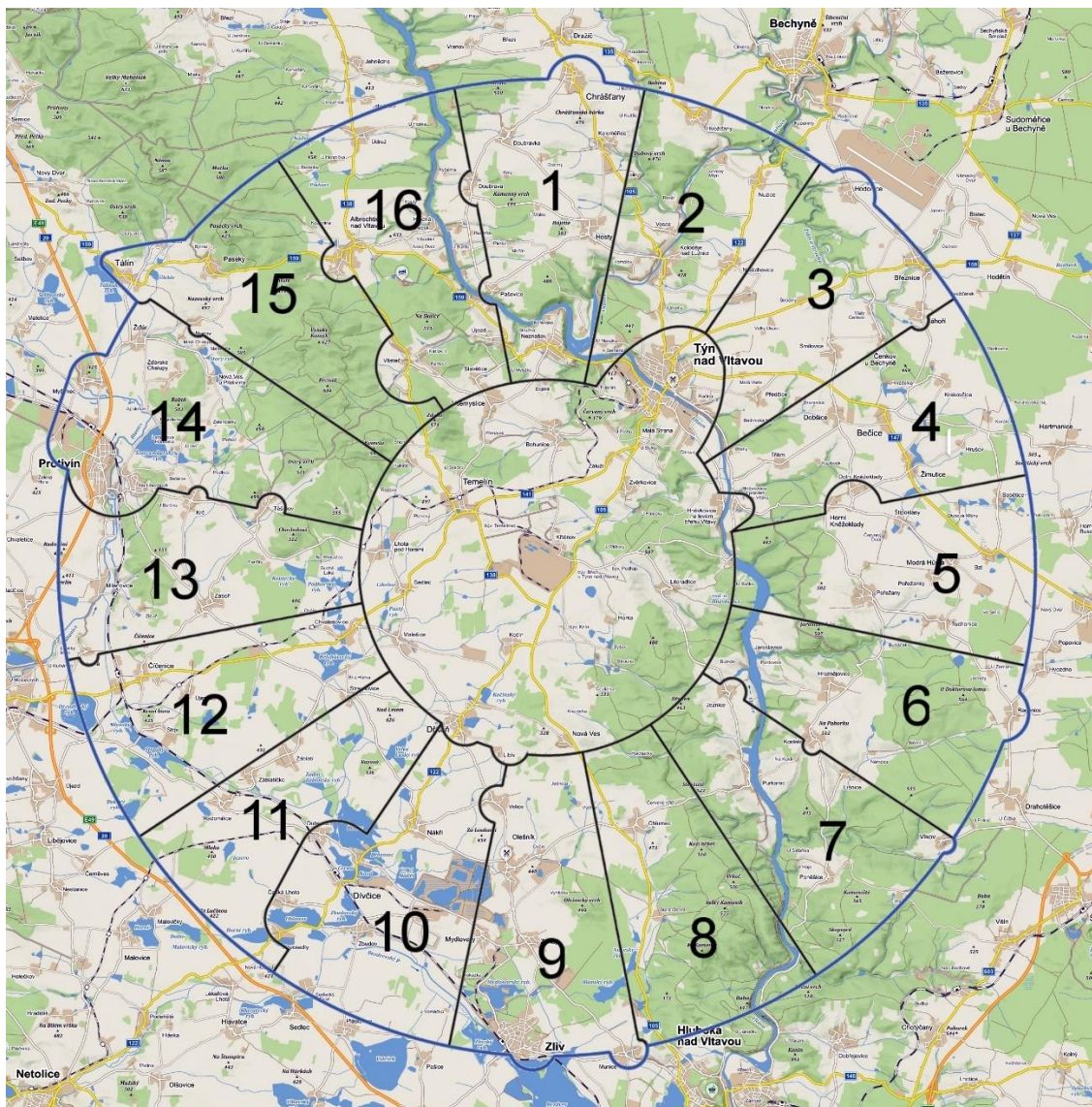
- Okolí zdroje může být rozděleno maximálně na 320 zón (16 směrů a 20 vzdáleností).
- Lze počítat pouze s jedním zdrojem výpustí.
- V jednom běhu programu je počítáno maximálně 60 nuklidů, a to včetně dceřiných nuklidů (počet členů rozpadových řad je omezen na 2).
- Dávky z ozáření z mraku jsou počítány na základě polonekonečného modelu mraku.
- Lze počítat maximálně 6 orgánů a tkání (gonády, červená kostní dřev, plíce, štítná žláza, zažívací trakt, kůže). [16]

5.3. Použitá data

Tato diplomová práce se zabývá geografickým rozmístěním ročních úvazků efektivních dávek pro reprezentativní osobu z různých věkových skupin. Tyto skupiny se dělí podle věku dle aktuální vyhlášky č. 422/2016 Sb. na tři kategorie – 0 až 5 let včetně, 6 až 15 let včetně a starší 15 let. Příloha č. 5 k této vyhlášce v bodě 6 přiřazuje věkové kategorie pro přepočet aktivit přijatých radionuklidů na roční úvazek efektivní dávky následovně [17]:

- 0 až 5 let → konverzní faktor pro věk 1 rok
- 6 až 15 let → konverzní faktor pro věk 10 let
- 16 až 70 let → konverzní faktor pro dospělého

Některá data jako například orografie terénu, konverzní faktory a data o povětrnostních podmínkách jsou do programu nahrána samostatně a nemusí se zadávat pro každý výpočet, zadá se jen lokalita (ETE nebo EDU). Data o povětrnostních podmínkách jsou z let 2000 až 2010. Větrná růžice a rozdělení okolí ETE do sektorů jsou zobrazeny na obrázku zóny havarijního plánování (okruh 13 km, obrázek 21). Číslování sektorů je shodné s číslováním programu NORMAL [30].



Obrázek 21 – Zóna havarijního plánování ETE a větrná růžice [33]

Pro každý výpočet se volí parametry zdroje. V tomto případě se jedná o komín BAPP a jeho parametry jsou následující:

- Nadmořská výška paty zdroje 507 m n.m.
- Výška komína BAPP 100 m
- Průměr výstupního otvoru 5,9 m
- Výstupní rychlost výpustí 6,8 m/s

Poslední zadávanou hodnotou je celková aktivita jednotlivých radionuklidů obsažených ve výpustí za rok. V tomto případě se jedná pouze o tritium. Simulace je počítána na aktivitu po úpravě výpustí z BAPP, tedy na plánovaných 3,75 TBq.

5.4. Výsledky

Výsledkem výpočtů programu NORMAL jsou roční efektivní dávky pro každou z 320 počítaných zón (16 směrů po 20 vzdálenostech). Tyto vzdálenosti jsou počítány od osy reaktoru prvního výrobního bloku. Program NORMAL modeluje radiační situaci až od 667. m od vzdálenosti od osy reaktoru prvního HVB. Do této vzdálenosti není schopen program počítat kvůli vysoké nepřesnosti výpočtů, navíc celá tato „nulová“ oblast spadá do areálu elektrárny.

Trend ve zvyšování či snižování efektivní dávky je pro všechny věkové kategorie stejný, což je očekávaný výsledek, protože větrná růžice a stability počasí jsou konstantní. Mění se ovšem absolutní hodnota efektivní dávky.

Největší efektivní dávka je po celé první oblasti (od 667 m do 1333 m), nejvíce pak v sektorech 7 a 8, které značí směr na jihovýchod. V tomto úseku se však nenachází žádná obec. Efektivních dávky E v těchto sektorech jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 – Roční efektivní dávky v první výpočetní oblasti

Věk	E v sektoru 7 [μ Sv]	E v sektoru 8 [μ Sv]
0 až 5 let	0,0309	0,0297
6 až 15 let	0,0128	0,0123
15 let a více	0,0206	0,0198

Druhá největší roční efektivní dávka je pak po celé druhé oblasti (od 1333 m do 2333 m), nejvíce v sektorech 3, 4 a 5, což je severovýchodní až východní směr. Efektivní dávky E v těchto sektorech jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 – Roční efektivní dávky v druhé výpočetní oblasti

Věk	E v sektoru 3 [μSv]	E v sektoru 4 [μSv]	E v sektoru 5 [μSv]
0 až 5 let	0,0175	0,0179	0,0181
6 až 15 let	0,0073	0,0074	0,0075
15 let a více	0,0117	0,0120	0,0120

Za druhou oblastí jsou již všechny efektivní dávky řádově 10^{-3} μSv a nižší, vyjma části východní oblasti pro věkovou kategorii děti 0 až 5 let, sektory 3, 4 a 5 kde se efektivní dávky pohybují podobně jako v druhé oblasti.

Tabulka v příloze 1 zobrazuje kompletní data vypočítaná programem NORMAL pro navrhované řešení – roční efektivní dávky pro všechny věkové kategorie po celé výpočtové síti.

5.5. Grafické výstupy

Pro grafické zpracování výsledků bylo nejprve nutno interpolovat vypočtená data do sítě o 560 zónách (16 směrů po 35 vzdálenostech), od 500 m do 97,5 km. Potom byl grafický editor schopen zpracovat plošné grafy proložené mapou. Jako podklad byly použity mapy ze serveru Mapy.cz (www.mapy.cz). Interpolovaná data, která zpracoval grafický editor, jsou uvedena v přílohách.

Grafy byly vytvořeny pro všechny tři věkové kategorie ve třech variantách. Ta první zobrazuje okruh 100 km od osy reaktoru prvního HVB, druhá varianta je přiblížena na zónu havarijního plánování (okruh 13 km) a třetí varianta znázorňuje detail na okruh 8 km od osy reaktoru prvního HVB.

Grafy pro okruh 8 km jsou uvedeny v následující kapitole v porovnání se současným stavem výpustí tritia z komína BAPP. V příloze 3 je uveden příklad grafického výstupu pro 100 km a v příloze 4 příklad pro zónu havarijního plánování. Všechny tyto grafy jsou uloženy v plném rozlišení na přiloženém CD.

6. Porovnání navrhovaného řešení se současným stavem

Pro ověření vlivu změny množství tritia vypouštěného do ovzduší je potřeba porovnat navrhované změny se současným stavem výпустí. Ten je reprezentován průměrnou aktivitou vypouštěného tritia. Podle dat z let 2003 až 2018 se za rok z Temelína vypustí do ovzduší tritium o průměrné aktivitě 1,6 TBq. Nově navrhovaná hodnota je 3,75 TBq.

Předpokládá se, že geografické rozložení ročního úvazku efektivní dávky pro obě aktivity bude stejné, lišit se budou jen jejich absolutní hodnoty.

6.1. Rozptylová studie pro současný stav

Totožné výpočty byly provedeny i pro průměrnou roční aktivitu tritia 1,6 TBq. Byl potvrzen předpoklad, že se nemění trend růstu či poklesu efektivní dávky v závislosti za počítané zóně, protože větrná růžice a stability počasí jsou opět konstantní. Největší efektivní dávky tedy zůstávají ve stejných sektorech a stejných směrech.

Pro první oblast ve vzdálenosti 667 až 1333 m se jedná o sektor 7 a 8, tedy směr na jihovýchod. Hodnoty efektivních dávek E pro současný stav a stav po navrhované změně jsou zobrazeny v tabulce 12.

Tabulka 12 – Porovnání ročních efektivních dávek v první výpočetní oblasti

Věk	E v sektoru 7 [μ Sv]		E v sektoru 8 [μ Sv]	
	současný	navrhovaný	současný	navrhovaný
0 až 5 let	0,0132	0,0309	0,0127	0,0297
6 až 15 let	0,0055	0,0128	0,0053	0,0123
15 let a více	0,0088	0,0206	0,0084	0,0198

V druhé oblasti (od 1333 m do 2333 m) je největší efektivní dávka v sektorech 3, 4 a 5, tj. v severovýchodním až východním směru. Porovnání současných průměrných hodnot efektivních dávek E s navrhovanou změnou je v tabulce 13.

Tabulka 13 - Porovnání ročních efektivních dávek v druhé výpočetní oblasti

Věk	E v sektoru 3 [μSv]		E v sektoru 4 [μSv]	
	současný	navrhovaný	současný	navrhovaný
0 až 5 let	0,0078	0,0175	0,0077	0,0179
6 až 15 let	0,0031	0,0073	0,0032	0,0074
15 let a více	0,0050	0,017	0,0051	0,0120
Věk	E v sektoru 5 [μSv]			
STAV	současný	navrhovaný		
0 až 5 let	0,0077	0,0181		
6 až 15 let	0,0032	0,0075		
15 let a více	0,0051	0,0120		

Za druhou oblastí jsou již všechny efektivní dávky řádově 10^{-3} μSv a nižší, vyjma části východní oblasti pro věkovou kategorii děti 0 až 5 let, sektory 3, 4 a 5 kde se efektivní dávky pohybují podobně jako v druhé oblasti.

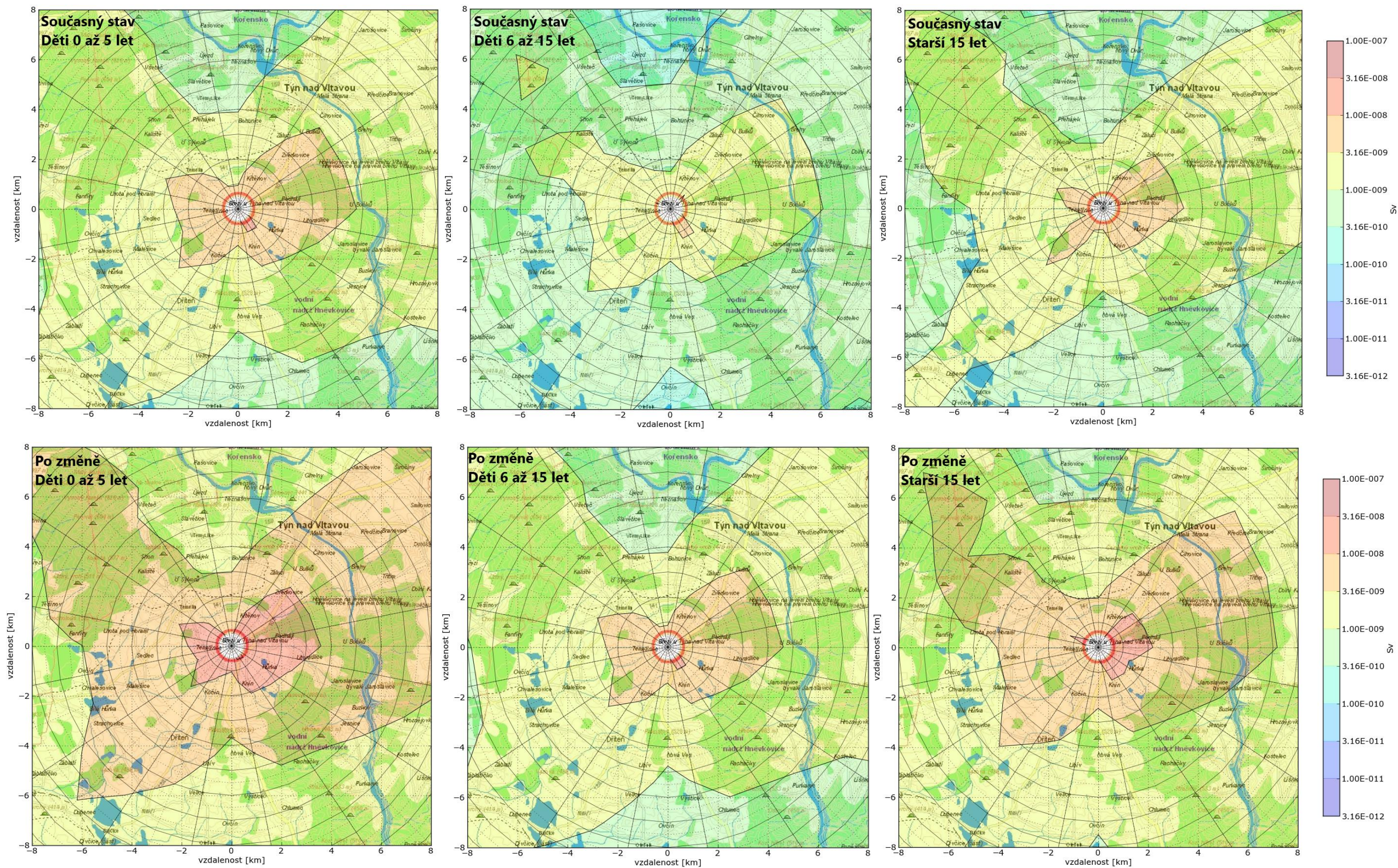
Tabulka v příloze 2 zobrazuje kompletní data vypočítaná programem NORMAL pro současný stav výпустí tritia do ovzduší – roční efektivní dávky pro všechny věkové kategorie po celé výpočtové síti.

6.2. Grafické výstupy

Grafy byly vytvořeny pro všechny tři věkové kategorie ve třech variantách. Ta první zobrazuje okruh 100 km od osy reaktoru prvního HVB, druhá varianta je pak přiblížena na zónu havarijního plánování (okruh 13 km) a třetí varianta zobrazuje detailně okruh do 8 km od ETE.

Porovnání grafického zobrazení výsledků pro okruh 8 km od osy reaktoru prvního HVB je zobrazeno na obrázku 22 pro všechny tři věkové kategorie. Tyto obrázky korespondují s daty vybranými v tabulkách 12 a 13. Tvar izodóz je ovlivněn směrem větru, orografii terénu (povrchové útvary) a využitím zemského povrchu (zástavba, travní porost, zemědělské plodiny lesy a vodní plochy).

V příloze 3 je zobrazeno rozložení roční efektivní dávky pro děti ve věku 0 až 5 let v okruhu do 100 km od osy reaktoru prvního výrobního bloku. Na této vzdálenosti se na rozložení ročních efektivních dávek více projeví převládající směry větru, tj. severovýchodní a jihozápadní. Hodnota roční efektivní dávky má se vzdáleností od zdroje klesající trend, lokálně dochází ke zvýšení hodnot, což je důsledkem morfologie terénu v daném směru.



Obrázek 22 - Porovnání ročních efektivních dávek pro současný stav a pro navrhovanou změnu plynných výpustí tritia komínem BAPP. Uvedeno pro všechny věkové kategorie v okruhu 8 km od ETE.

6.3. Shrnutí výsledků

Plánovaná změna výpustí komínem BAPP zvýší roční aktivitu z 1,6 TBq na 3,75 TBq, tj. o cca 134,4 %. Protože se v rozptylové studii jedná o výpočet dávky pouze z tritia, očekává se, že o stejnou část naroste i roční efektivní dávka. Z tabulek 12 a 13 jde vidět, že roční efektivní dávka v sektorech v těchto tabulkách opravdu vzrostla přibližně o očekávaných 134,4 %. I porovnání dat v tabulkách v přílohách 1 a 2 potvrzuje očekávaný nárůst.

Nejvyšší roční efektivní dávky obdrží první věková kategorie, děti do 5 let. Je to z toho důvodu, že konverzní faktory v této kategorii jsou nejvyšší v případě ingesce i inhalace. Nejmenší roční efektivní dávky obdrží věková kategorie děti 6 až 15 let. A to i přesto, že jsou jejich konverzní faktory pro inhalaci a ingesci stále vyšší, než pro dospělé (starší 15 let). Je to zdůvodněno tím, že největší podíl na ozáření osob tritiem má vnitřní ozáření z ingesce. A děti ve věku 6 až 15 let snědí méně potravy, než dospělí a starší 15 let. Tudíž pozřou i méně tritia.

Nejvyšší hodnota roční efektivní dávky dosahuje 0,0309 μSv . Pokud budou brány v úvahu nepřesnosti výpočetního programu v blízkosti zdroje radionuklidů a pro čerpání limitu bude použita hodnota nejvyšší roční efektivní dávky ve vzdálenosti větší než 3 km, bude se jednat o hodnotu 0,0106 μSv . V této vzdálenosti vzrostla roční efektivní dávka o 0,0061 μSv . Pokud bude tato hodnota přičtena k celkové průměrné roční efektivní dávce z výpustí do ovzduší, bude výsledná hodnota po úpravě výpustí 0,0691 μSv . To znamená čerpání limitu průměrně z 0,17 % (nárůst o 0,01 %).

Lze tedy jednoznačně konstatovat, že po zvýšení aktivity výpustí tritia komínem BAPP z 1,6 TBq na 3,75 TBq ročně nedojde k překročení autorizovaných limitů v žádném z výpočetních sektorů.

7. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověření nepřekročení limitů výpustí do ovzduší po změně složení těchto výpustí tak, jak navrhl ENERGOPROJEKT PRAHA. Nástrojem k tomuto ověření byla rozptylová studie za účelem výpočtu ročních efektivních dávek, provedená pomocí programu NORMAL, který byl vyvinut v EGP. Bylo navrženo zvýšit aktivitu výpustí tritia z komínu BAPP z průměrných 1,6 TBq za rok na 3,75 TBq za rok. Výsledky pro plynné výpustí z komínu BAPP pro navrhovanou změnu aktivity jsou uvedeny v tabulce 12. Nejvyšší vypočtená hodnota roční efektivní dávky je 0,0309 μSv pro děti ve věku od 0 do 5 let.

Pro porovnání byly stejné výpočty provedeny i pro současný stav, tedy pro průměrné roční výpustí tritia o aktivitě 1,6 TBq. Nejvyšší současná hodnota efektivní dávky je 0,0132 μSv . Průměrná roční efektivní dávka vzrostla přibližně o 134 %, nicméně zůstává na stále velmi nízké úrovni.

Hodnota ročního autorizovaného limitu pro plynné výpustí je 40 μSv . Po navýšení roční efektivní dávky z tritia vypouštěného do ovzduší celková roční efektivní dávka z ozáření z výpustí do atmosféry pro reprezentativní osobu činí 0,0691 μSv . Průměrné čerpání limitu tak naroste o jednu setinu na 0,17 %.

Výsledkem této diplomové práce tedy je jednoznačné konstatování, že po úpravě množství tritia vypouštěného komínem BAPP z aktivity 1,6 TBq na 3,75 TBq ročně nedojde k překročení autorizovaných limitů v žádném z výpočetních sektorů.

V případě realizace změny výpustí komínem BAPP, jak je navrhuje ENERGOPROJEKT PRAHA, je možné tuto rozptylovou studii použít jako nástroj k prokázání, že nedojde k překročení autorizovaných limitů. Toto prokázání je klíčové pro povolovací proces SÚJB.

8. Reference

- [1] *Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere*. Canada: Canadian Nuclear Safety Commission, 2009. ISBN 978-1-100-13928-9.
- [2] CALMON, P. a J. GARNIER-LAPLACE. *Tritium and the environment: Radionuclud fact sheet*. Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire, 2010.
- [3] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Vol. I: Sources. New York: United Nations Publication, 2000. ISBN 92-1-142238-8.
- [4] Tritium a GTLS. *3H – Tritium* [online]. Praha: GlobeWeb Czech, 2018 [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <http://www.3h-tritium.cz/tritium-a-gtls>
- [5] Tritium illuminated escape exit signs, route markers, minefield markers. In: *Military Systems And Technology* [online]. Westlake Publications, 2010 [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <http://www.militarysystems-tech.com/suppliers/betalight-self-luminous-gaseous-tritium-light-sources/betalight-by>
- [6] Foto: Produktová galerie firmy Česká zbrojovka, a.s.
- [7] KARESH, Stephen. *Half Lives* [online]. In: Chicago: Consultants In Nuclear Medicine [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://nucmedtutorials.files.wordpress.com/2016/12/half-lives1.pdf>
- [8] *Environmental Fate of Tritium in Soil and Vegetation: Part of the Tritium Studies Project*. Ottawa: Canadian Nuclear Safety Commission, 2013. ISBN 978-1-100-22687-3.
- [9] *Tritium Handling And Safe Storage: Department of Energy Handbook*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1999. ISBN DOE-HDBK-1129-99.

- [10] Bioavailability: Soil. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 4.2.2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bioavailability_\(soil\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bioavailability_(soil))
- [11] Osmoregulace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 20.11.2017 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Osmoregulace>
- [12] Působení JE na okolí. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2018-10-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/11.html>
- [13] DOBEŠ, Petr. *Porovnání výpustí českých a světových jaderných elektráren*. České Budějovice, 2007. Diplomová práce. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Josef Koc, CSc.
- [14] ŠKOPEK, Petr. *Sledování aktivity tritia v toku Vltavy s ohledem na odpadní vody Jaderné elektrárny Temelín*. České Budějovice, 2007. Diplomová práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Švehla, CSc.
- [15] MARO, Denis. *Environmental behaviour of tritium released by nuclear facilities in marine and terrestrial ecosystems: State-of-the-art and examples*. Fontenay-aux-Roses: Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, 2014.
- [16] PECHA, Petr a Emílie PECHOVÁ. *Program NORMAL na ocenění radiační zátěže obyvatelstva v okolí jaderných zařízení za normálního provozu: Část I – Metodika*. Praha, 2000. Arch. č. EGP 4104-6-990021.
- [17] *Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje*. In: Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, 2016, ročník 2016, číslo 422.
- [18] *Atomový zákon*. In: Praha, 2017, ročník 2016, číslo 263.
- [19] HANUS Václav, 2019. E-mailová korespondence 19.2.
- [20] *Technická zpráva: Vypouštění tritia přes komín BAPP*. Praha: ÚJV Řež, a. s., divize ENERGOPROJEKT PRAHA, 2018.

- [21] WAKEFORD, Richard. The risk of leukaemia in young children from exposure to tritium and carbon-14 in the discharges of German nuclear power stations and in the fallout from atmospheric nuclear weapons testing. *Radiation and Environmental Biophysics* [online]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, 30.1.2014, **2014**(53) [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00411-014-0516-y>
- [22] *Rozhodnutí SÚJB: č.j. SÚJB/OROPC/26161/2009*. Kapalně vypusti ETE. Praha, 2009.
- [23] *Rozhodnutí SÚJB: č.j. SÚJB/RCČB/24102/2017*. Plynně vypusti ETE. Praha, 2017.
- [24] *Hodnocení souboru provozně-bezpečnostních ukazatelů (rok 2005)* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2006 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/hodnoceni/U2005.pdf>
- [25] *Hodnocení souboru provozně-bezpečnostních ukazatelů (rok 2011)* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2012 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/hodnoceni/HodnoceniPBU2011.pdf>
- [26] *Hodnocení souboru provozně-bezpečnostních ukazatelů (rok 2017)* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2018 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/hodnoceni/Hodnoceni_PBU_2017.pdf
- [27] ČEZ, A.S. - JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN. *Výsledky monitorování výpustí a radiační situace v okolí jaderné elektrárny Temelín za rok 2018*. 2019.
- [28] *Radiační monitorování na jaderných elektrárnách k zajištění radiační ochrany* [online]. In: SÚJB. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/radiacni-ochrana/zajimavosti-z-praxe-radiacni-ochrany/pokroky-v-zajisteni-radiacni-ochrany/radiacni-monitorovani-na-jadernych-elektrarnach-k-zajisteni-radiacni-ochrany/>

- [29] MAREŠOVÁ, Diana, Eduard HANSLÍK, Eva JURANOVÁ a Barbora SEDLÁŘOVÁ. Stanovení velmi nízkých objemových aktivit tritia pro potřeby využití tritia jako stopovače. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [online]. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 10.8.2018 [cit. 2019-05-21].
Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2018/08/stanoveni-velmi-nizkych-objemovych-aktivit-tritia-pro-potreby-vyuziti-tritia-jako-stopovace/>
- [30] PECHA, Petr, Emílie PECHOVÁ a Vladimír PATERA. *Uživatelský manuál interaktivního systému NORMAL verze 2010 na ocenění radiační zátěže populace při normálním provozu jaderných zařízení*. Praha, 2010.
Arch. č. EGP 5010-F-100149.
- [31] SKŘEHOT, Petr. *Modelování rozptylu toxických látek v atmosféře při průmyslových haváriích*. Praha, 2008. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav pro životní prostředí.
- [32] HENLEY, Ernes J. a Jeffery LEWINS. *Advances in Nuclear Science and Technology: Volume 9*. Elsevier, 2014. ISBN 1483215660.
- [33] *Zóna havarijního plánování ETE*. Ilustrace. Zpracoval Ing. Pavel Vondrouš, ČEZ, a.s. – útvar řízení dokumentace, 10.11.2014.

Seznam příloh

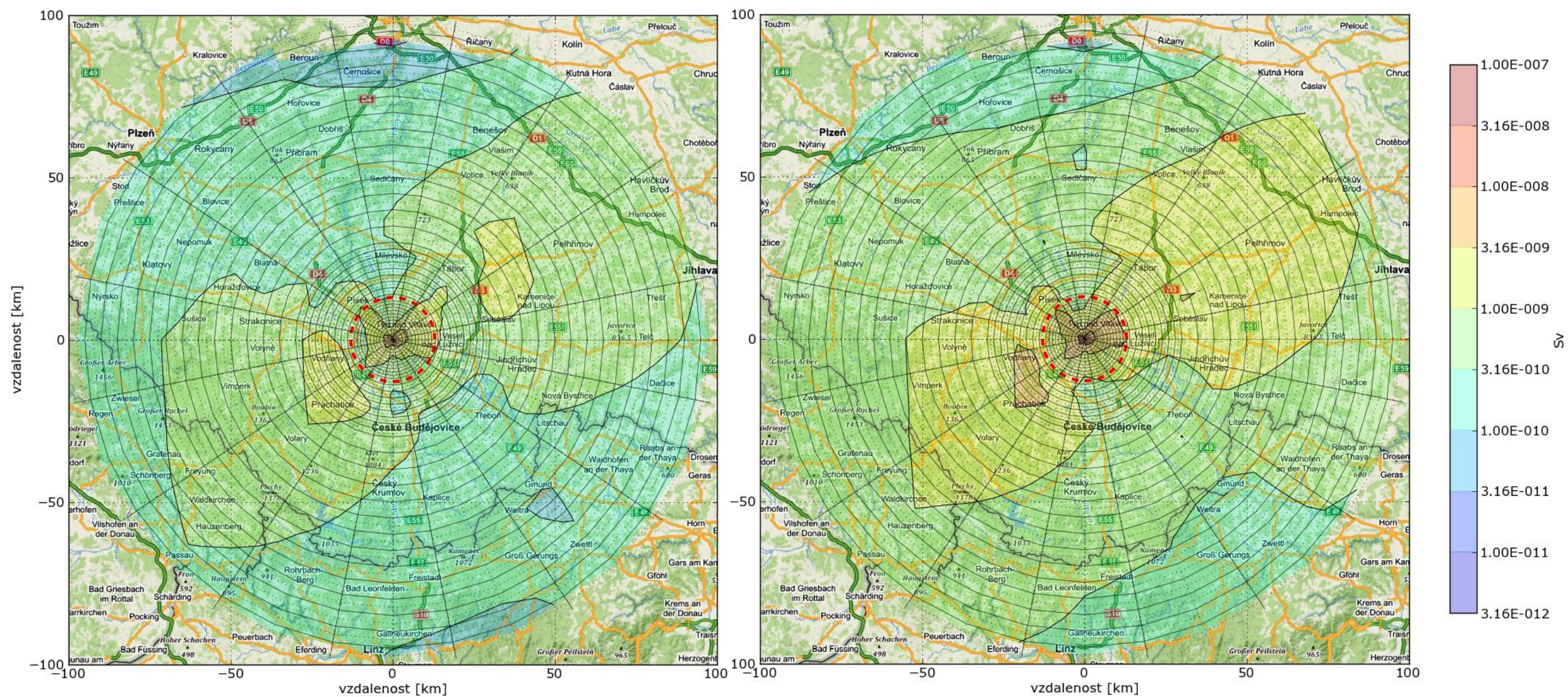
Příloha 1 - Tabulka ročních efektivních dávek v Sv pro obyvatele všech věkových kategorií, po úpravě výpustí do atmosféry..... 69

Příloha 2 - Tabulka ročních efektivních dávek v Sv pro obyvatele všech věkových kategorií, současný stav 70

Příloha 3 - Grafické znázornění roční efektivní dávky z tritia pro děti ve věku 0 až 5 let v okruhu do 100 km od ETE, vlevo za současného stavu, vpravo po úpravě výpustí do atmosféry 71

Příloha 4 - Grafické znázornění roční efektivní dávky z tritia pro děti ve věku 0 až 5 let v zóně havarijního plánování ETE, vlevo za současného stavu a vpravo po úpravě výpustí do atmosféry 72

Příloha 3 - Grafické znázornění roční efektivní dávky z tritia pro děti ve věku 0 až 5 let v okruhu do 100 km od ETE, vlevo za současného stavu, vpravo po úpravě výpustí do atmosféry



Příloha 4 - Grafické znázornění roční efektivní dávky z tritia pro děti ve věku 0 až 5 let v zóně havarijního plánování ETE, vlevo za současného stavu a vpravo po úpravě výpusti do atmosféry

