

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderné chemie

Diplomová práce

Best-estimate analýza úniku jódu z kontejnmentu

VVER-1000/V-320 během LB LOCA

Best-estimate analysis of the iodine release from WWER-1000/V-320

containment during LB LOCA

Autor: Bc. Iana Zamakhaeva

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Adam Kecek

Konzultant: Ing. Lubomír Denk

Akademický rok 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Iana Zamakhaeva**

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderná chemie

Název práce: **Best-estimate analýza úniku jódu z kontejnmentu VVER-1000/V320 během LB LOCA**
(česky)

Název práce: Best-estimate analysis of the iodine release from WWER-1000/V320
containment during LB LOCA
(anglicky)

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši na počáteční a okrajové podmínky, které mohou mít vliv na únik jódu z kontejnmentu VVER-1000/V320 do okolí během postulované havárie s ohledem na aplikaci výpočetního kódu COCOSYS
2. Seznamte se s best-estimate metodikou GRS a Spearmanovým korelačním koeficientem, definujte předpoklady a omezení.
3. Připravte vstupní soubory pro výpočetní kód COCOSYS s využitím znalostí z předchozích kroků.
4. Proveďte výpočty a vyhodnoťte dle GRS metodiky, určete počáteční a okrajové podmínky s nejvýznamnějším vlivem na únik jódu do okolí.
5. Sepište práci.

Doporučená literatura:

[1] Klein-Heßling, W., Arndt, S., Nowack, H., Spengler, C., Schwarz, S., Eschricht D., Beck, S. (2018): COCOSYS V2.4v5 User's manual. Gesellschaft für Anlagen – und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, s. 995.

[2] United States Nuclear Regulatory Commission (2000): Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors. Regulatory Guide 1.183, s. 62.

[3] Kecek, A. (2014): Bezpečnostní analýza chování kontejnmentu JE s reaktorem VVER-1000 při haváriích s únikem chladiva. Zpráva ÚJV-Z4110T, s. 93.

[4] Macek, J.; Metodika pro provádění Best-Estimate analýz, Revize 0, ÚJV Řež a.s., 2011, ÚJV Z 3296 T

[5] Glaeser, H.; GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications, Hindawi Publishing Corporation, 2008

[6] IAEA; Safety Reports Series No. 52 - Best Estimate Safety Analysis for Nuclear Power Plants: Uncertainty Evaluation, IAEA, 2008, 978-92-0-108907-6

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. et Ing. Adam Kecek, oddělení Bezpečnostních analýz, divize Jaderná bezpečnost a spolehlivost, ÚJV Řež, a. s.

Jméno a pracoviště konzultanta:

Ing. Lubomír Denk, oddělení Bezpečnostních analýz, divize Jaderná bezpečnost a spolehlivost, ÚJV Řež, a. s.

Datum zadání diplomové práce: 20. 10. 2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3. 5. 2020

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.



Garant

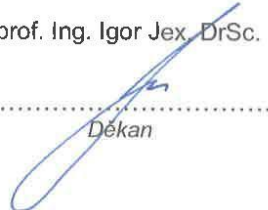
prof. Ing. Jan John, CSc.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

V Praze dne 20. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci „Best-estimate analýza chování kontejnmentu VVER-1000/V-320 s ohledem na šíření jódu“ vypracovala samostatně a uvedla veškerou použitou literaturu.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Děkuji Ing. et Ing. Adamu Keckovi za pomoc, vedení a vstřícnost při vypracování této práce, Ing. Pavlu Královi, Ph.D. za vstřícnost a podporu a všem ostatním, kteří přispěli radou či pomocí.

Název práce: Best-estimate analýza úniku jódu z kontejnmentu VVER-1000/V-320 během LB LOCA

Autor: Bc. Iana Zamakhaeva

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Adam Kecek

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá best-estimate analýzou zdrojového členu se zaměřením na únik jódu z kontejnmentu VVER-1000/V-320. Uvedená problematika byla řešena pro podmínky velké havárie s únikem chladiva (LB LOCA, large-break loss-of-coolant accident). Teoretická část práce zahrnuje popis kontejnmentu VVER-1000/V-320 s důrazem na systémy likvidace a lokalizace havarijních stavů a problematiku transportu jódu v kontejnmentu, popis základních principů bezpečnostních analýz, a stručný úvod do výpočetních kódů použitých pro účely této práce, konkrétně COCOSYS (COntainment COde SYStem) a SUSA (Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis). Experimentální část práce je věnována provedení samotné best-estimate analýzy. Příprava vstupních dat pro analýzu zahrnovala určení počátečních a okrajových podmínek, které mohly mít vliv na chemické chování jódu během havárie, stanovení best-estimate hodnot a určení rozsahu, ve kterém se zkoumané veličiny mohou nacházet. Následně byla vytvořena sada vstupních souborů, které byly spočteny pomocí výpočetního kódu COCOSYS. Konečné vyhodnocení, které zahrnovalo neurčitostní a citlivostní analýzu, bylo provedeno v programu SUSA.

Klíčová slova

Kontejnment, bezpečnostní analýzy, best-estimate metodika, výpočetní kód, počáteční a okrajové podmínky, zdrojový člen, COCOSYS, chování jódu

Abstract

The master thesis is aimed at best-estimate analysis of source term with emphasis on iodine release from containment building WWER-1000/V-320. These problematics was applicated to large-break loss-of-coolant accident (LB LOCA) conditions. The theoretical part of the paper includes WWER-1000/V-320 containment description with emphasis on liquidation and localisation of accident conditions and iodine transport problematics in containment building, basic principles of safety analyses, and brief introduction to computational codes used for this thesis, namely COCOSYS (COntainment COde SYStem) and SUSA (Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis). The experimental part of the thesis is aimed at performing best-estimate analysis itself. The input preparation for the analysis includes determination of initial and boundary conditions which can affect iodine behaviour during an accident, specification of best-estimate values, and their range. The next step of the analysis was to prepare a set of inputs for COCOSYS. Finally, an evaluation towards the release of iodine into environment was conducted in SUSA and includes uncertainty and sensitivity analysis.

Keywords

Containment building, safety analyses, best-estimate method, computational code, initial and boundary conditions, source term, COCOSYS, iodine behaviour

SEZNAM ZKRATEK

AZ	Aktivní zóna
BE	Best-estimate (metoda nejlepšího odhadu)
BEPU	Best-estimate plus uncertainties (metoda nejlepšího odhadu s určením neurčitostí)
ETE	Elektrárna Temelín
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
LB LOCA	Large break loss-of-coolant accident (velká havárie s únikem chladiva)
SB LOCA	Small break loss-of-coolant accident (malá havárie s únikem chladiva)
NRC (US NRC)	United States Nuclear Regulatory Commission (Americký jaderný regulační úřad)
PSA	Probabilistic safety assessment (pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti)
TMI	Jaderná elektrárna Three Miles Island

OBSAH

1. ÚVOD	13
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	14
2.1. Jaderná elektrárna s reaktorem VVER-1000/V-320.....	14
2.1.1. Základní projektové řešení ETE.....	14
2.1.2. Popis a funkce kontejnmentu	17
2.1.3. Systémy havarijního chlazení aktivní zóny a sprchový systém	18
2.1.4. LOCA havárie	19
2.1.5. Chování kontejnmentu v souvislosti s LOCA havárií.....	20
2.1.6. Jód jako štěpný produkt.....	23
2.1.7. Zdrojový člen	24
2.2. Úvod do bezpečnostních analýz	25
2.3. Metodika best-estimate plus uncertainties.....	27
2.3.1. Neurčitostní analýzy.....	28
2.3.2. GRS metoda	29
2.3.3. Citlivostní analýzy.....	30
2.4. Použitý software	31
2.4.1. COCOSYS 2.4v5	32
2.4.2. SUSAS.....	34
3. VSTUPNÍ DATA PRO BE ANALÝZU.....	35
3.1. Termohydraulický model	35
3.2. Model pro výpočty šíření jódu.....	38
3.3. Únik štěpných produktů do kontejnmentu.....	39
3.4. Počáteční a okrajové podmínky výpočtů.....	40
4. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ.....	43
4.1. Referenční BE výpočet.....	43
4.1.1. Analýza termohydraulických podmínek	44

4.1.2.	Transport jódu uvnitř kontejnmentu během zkoumané události	49
4.1.3.	Analýza zdrojového členu	52
4.2.	Citlivostní a neurčitostní analýza	54
4.2.1.	Neurčitostní analýza	54
4.2.2.	Citlivostní analýza.....	55
5.	ZÁVĚR.....	60
	PŘÍLOHY	62
	REFERENCE	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Technologické schéma primárního okruhu elektrárny typu VVER-1000	16
Obr. 2: Schéma hermetické oblasti a přilehlých prostor ETE [7]	17
Obr. 3: BE výpočet přetlaku v zónách kontejnmentu, 0–3600 s [11]	22
Obr. 4: BE výpočet přetlaku v zónách kontejnmentu, 14–19 s [11]	22
Obr. 5: BE výpočet teploty v zónách kontejnmentu, 0–3600 s [11]	23
Obr. 6: BE výpočet teploty v zónách kontejnmentu, 5–30 s [11]	23
Obr. 7: Výtěžek štěpení radionuklidů ^{233}U , ^{239}Pu a ^{235}U tepelnými neutrony [13].....	24
Obr. 8: Koncept neurčitostního přístupu k bezpečnostním analýzám [17]	28
Obr. 9: Schéma výpočetního kódu COCOSYS [22]	32
Obr. 10: Zjednodušený diagram přeměn jódu v kontejnmentu [24]	33
Obr. 11: Schéma termohydraulické nodalizace kontejnmentu [28]	37
Obr. 12: Separatní nodalizace pro výpočty šíření jódu [28]	39
Obr. 13: BE výpočet teploty vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s).....	45
Obr. 14: BE výpočet teploty vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 100 s, dosažení maximálních hodnot)	45
Obr. 15: BE výpočet tlaku v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s)	46
Obr. 16: BE výpočet tlaku v jednotlivých zónách (12 – 17 s, dosažení maximálních hodnot).....	47
Obr. 17: BE výpočet relativní vlhkosti vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s)	48
Obr. 18: BE výpočet relativní vlhkosti vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 1200 s)	48
Obr. 19: BE výpočet rychlosti kondenzace páry v zóně GA701.....	49
Obr. 20: Transport jódu uvnitř kontejnmentu (v abecedním pořadí: 180 s, 360 s, 720 s, 1 200 s, 1 800 s a 3 600 s od iniciační události)	51
Obr. 21: Časový nárůst frakce jódu přítomné v kontejnmentu (% počátečního inventáře)	52
Obr. 22: BE výpočet frakce jódu uvolněné do okolí ETE (% počátečního inventáře)	53
Obr. 23: Neurčitostní analýza frakce jódu uvolněné do okolí ETE (% počátečního inventáře)	55
Obr. 24: Časový průběh Spearmanova korelačního koeficientu reprezentující vliv vybraných počátečních a okrajových podmínek na zdrojový člen	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Seznam zón kontejnmentu uvažovaných v rámci BE výpočtu přetlaku a teploty provedených v práci [11].....	20
Tab. 2: Přehled vybraných chemických prvků obecně uvažovaných při haváriích v lehkovodních reaktorech [14].....	25
Tab. 3: Přehled metod bezpečnostních analýz [16], [11].....	27
Tab. 4: Množství výpočtů potřebné pro $m = 1$ a $m = 2$ [17]	30
Tab. 5: Popis modelovaných zón [28].....	38
Tab. 6: Stručný přehled vybraných chemických prvků uvažovaných při haváriích v lehkovodních reaktorech [14].....	40
Tab. 7: Výsledné hodnoty w [%] odpovídající jednotlivým chemickým formám jódu.....	53
Tab. 8: Výsledné hodnoty odpovídající maximu, minimu, mediánu a průměru vyhodnocované frakce w	54
Tab. 9: Počáteční a okrajové podmínky zkoumané v rámci citlivostní analýzy úniku jódu....	56
Tab. 10: Hodnoty Spearmanova koeficientu v čase $t = 10\ 000$ s	57
Tab. 11: Seznam uvažovaných počátečních a okrajových podmínek včetně minimálních, maximálních a BE hodnot	62

1. ÚVOD

Jaderná energetika je v současné době jedním ze způsobů produkce elektřiny s minimálním uvolněním emisí a následného možného vlivu na měnící se klima. Technický pokrok ve směru jaderné energetiky ovšem souvisí s nutností zavedení bezpečnostních analýz, které pomocí výpočetní techniky dokážou předem určit různá potenciální nebezpečí plynoucí z provozu jaderných elektráren. Konečným prvkem řetězce úkolů, které běžně řeší bezpečnostní analýzy, je kvantifikace a kvalifikace tzv. zdrojového členu – úniku štěpných produktů z aktivní zóny reaktoru do prostoru ochranné obálky elektrárny (kontejnmentu) a následně do životního prostředí. Důležitou součástí zdrojového členu je chemický prvek jód, a to z důvodu své vysoké bioaktivity a z toho plynoucího velkého vlivu na potenciální následky radiačních událostí.

Diplomová práce je věnována studiu zdrojového členu v podmínkách maximální projektové havárie s únikem chladiva uvažované pro tlakovodní reaktory typu VVER-1000/V-320, které se ve dvou exemplářích nachází v jaderné elektrárně Temelín. V rámci havárie bylo uvažováno prasknutí studené větve primárního okruhu, aktivace sprchového systému a únik vybraných sloučenin jódu do kontejnmentu a následně netěsnostmi kontejnmentu do okolí. Rešeršní část práce zahrnuje popis kontejnmentu VVER-1000/V-320 z bezpečnostního hlediska včetně systémů havarijního chlazení, odezvy kontejnmentu na zkoumanou událost a úvodu do problematiky zdrojového členu. Následující kapitola je věnována stručnému popisu používaných konceptů bezpečnostních analýz s důrazem na metodu BEPU (best-estimate plus uncertainties, metoda nejlepšího odhadu s určením neurčitostí) použitou v této diplomové práci. Poslední kapitola rešeršní části práce obsahuje stručný popis softwaru použitého pro analýzu kontejnmentu (COCOSYS) a vyhodnocení výsledků citlivostní a neurčitostní studie (SUSA).

Primárním cílem práce je prozkoumat počáteční a okrajové podmínky takové havárie, určit rozptyl v množství uniklého jódu a zjistit významnost zkoumaných počátečních a okrajových podmínek z hlediska úniku jódu do životního prostředí. Důležitou součástí analýzy je provedení vyhodnocení pro BE počáteční a okrajové podmínky, tedy pro podmínky, které nejlépe odráží reálnou situaci během zkoumané události.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Kapitola je věnována teoretickému popisu základní problematiky jódů v primárním okruhu a kontejnmentu tlakovodního reaktoru, použité definici zdrojového členu, principu bezpečnostních analýz, popisu kontejnmentu VVER-1000/V-320 včetně bezpečnostních systémů a úvodu do použitých výpočetních kódů. Důraz byl kladen na podrobný popis použité metodiky analýzy, jíž byla metodika nejlepšího odhadu uvažující neurčitosti počátečních a okrajových podmínek během havárie s únikem chladiva.

2.1. Jaderná elektrárna s reaktorem VVER-1000/V-320

Vývoj prvních tlakovodních reaktorů typu VVER (konkrétně typu VVER-210) byl zahájen v šedesátých letech 20. století v SSSR. V této době však neexistovala technologie svařování, která by umožnila výstavbu velké hermetické budovy kontejnmentu, proto původní sovětská koncepce jaderné bezpečnosti zahrnovala pouze prevenci havárií. Nástupcem typu VVER-210 byl typ VVER-440 (V-170, V-230 apod.), jehož koncepce také neobsahovala plnohodnotný kontejnment; maximální projektovou havárií byla malá havárie s únikem chladiva (small-break loss-of-coolant accident, SB LOCA). Koncept reaktorů VVER-440 byl později modifikován (v 70. letech se začaly stavět elektrárny s reaktory VVER-440/V-213 vybavené systémem potlačení tlaku (barbotážním systémem), maximální projektovou havárií v souladu se světovou praxí se stala velká havárie s únikem chladiva – large-break loss-of-coolant accident, LB LOCA), nicméně vzhledem k absenci plnohodnotného kontejnmentu se v současné době považuje za zastaralý. V ČR jsou provozovány 4 reaktory tohoto typu, konkrétně v jaderné elektrárně Dukovany, která je elektrárnou typu VVER-440/V213. [1]

Nástupci reaktorů VVER-440 byly reaktory VVER-1000 (typy V187, V302, V-320 apod.). Unifikovaná koncepce VVER-1000 zakládá na LB LOCA havárii, a proto obsahuje plnotlakou ochrannou obálku z předepjatého betonu. Druhá česká jaderná elektrárna Temelín je typizovanou elektrárnou typu VVER-1000/V-320 s 2 reaktory. [1]

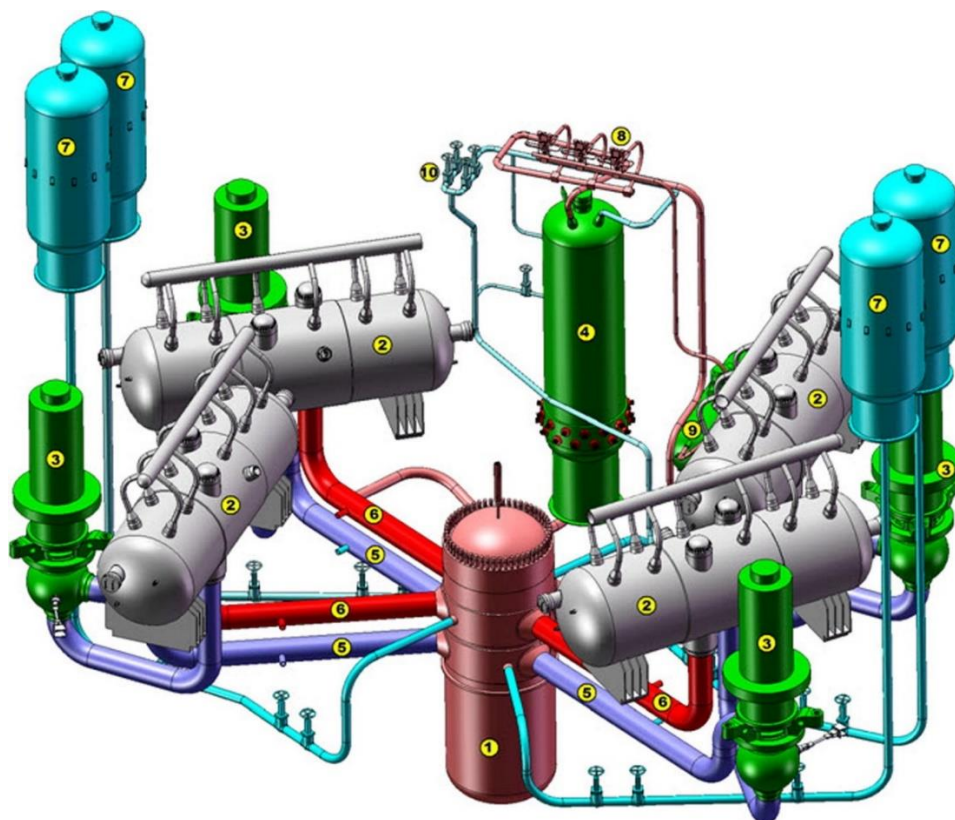
2.1.1. Základní projektové řešení ETE

Jaderná elektrárna Temelín je elektrárna s reaktorem VVER-1000/V-320 o nominálním výkonu 3120 MWt a 1000/1061,8 MWe. [2] Primární okruh se skládá z tlakovodního reaktoru, primárního potrubí obsahujícího 4 chladicí cirkulační smyčky, parogenerátoru, kompenzátoru objemu a hlavního cirkulačního čerpadla. Celé zařízení primárního okruhu elektrárny VVER-

1000 pracuje s obyčejnou lehkou vodou s provozní teplotou 290 °C na vstupu do aktivní zóny a 320 °C na výstupu, nominální provozní tlak chladiva je 15,7 MPa [3]. Zařízení primárního okruhu je uzavřeno do kontejnmentu. Sekundární neradioaktivní okruh přijímá teplo akumulované chladivem primárního okruhu po průchodu reaktorem, a to prostřednictvím parogenerátorů. Pro havarijní ochlazování reaktoru a snížení tlaku v kontejnmentu slouží systém havarijního chlazení aktivní zóny, který se uvádí do provozu v případě vzniku havarijních podmínek. [4]

Hlavní cirkulační čerpadlo zajišťuje cirkulaci primárního chladiva ve smyčce výstup z reaktoru – horká větev smyčky – parogenerátor – hlavní cirkulační čerpadlo – vstup do reaktoru. Teplo z chladiva primárního okruhu se předává v parogenerátoru, který představuje celosvařovanou tlakovou nádobu horizontálního provedení se systémem rozvodu napájecí vody, teplosměnnou plochou v podobě tenkých trubiček a parním kolektorem. Na sekundární straně parogenerátoru se z napájecí vody tvoří sytá pára, která se následně odvádí do turbíny. K udržování tlaku během normálního provozu slouží systém kompenzace objemu, jehož hlavní součástí je vertikální nádoba kompenzátoru objemu. Zvyšování tlaku v primárním okruhu způsobuje ohřev vodního prostoru, naopak snižování tlaku se dosahuje sprchováním vzdušného objemu nad kapalinou v kompenzátoru objemu. [5]

Na Obr. 1 je uvedeno schéma technologického zařízení primárního okruhu elektrárny VVER-1000 včetně popisu jednotlivých součástí.



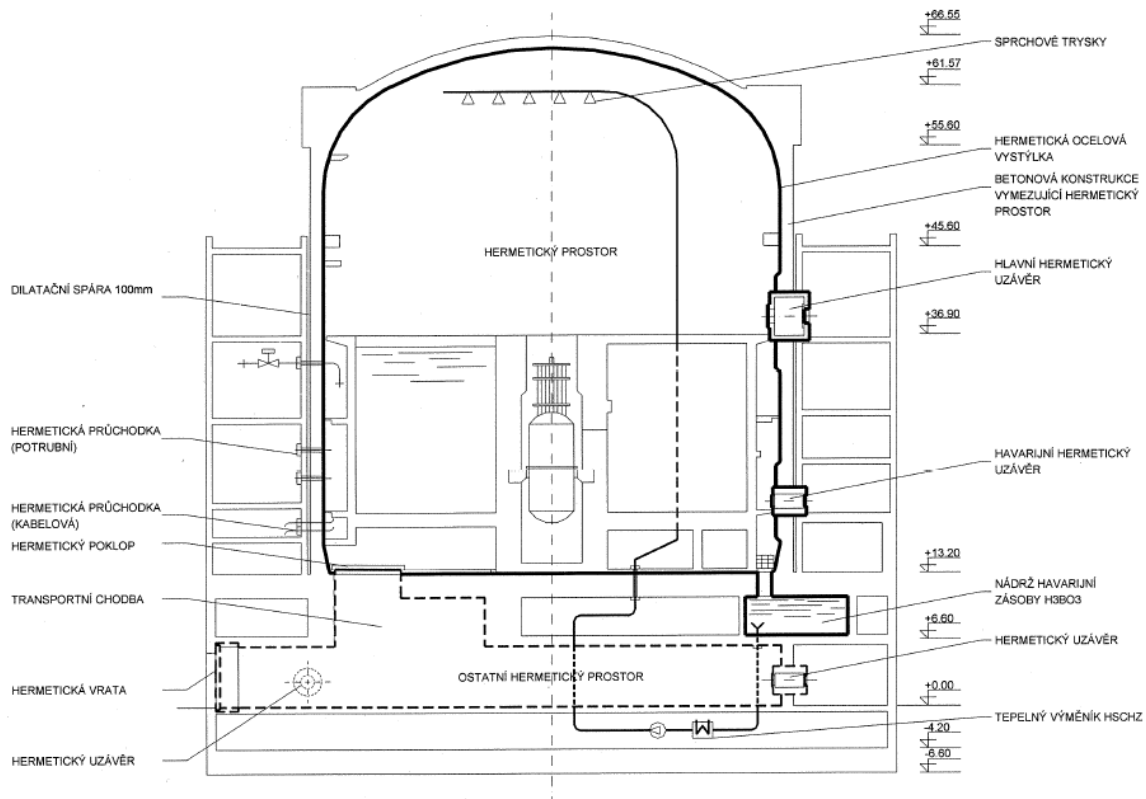
Obr. 1: Technologické schéma primárního okruhu elektrárny typu VVER-1000

(1) reaktor (2) parogenerátor, (3) hlavní cirkulační čerpadlo, (4) kompenzátor objemu, (5) studená větev cirkulační smyčky, (6) horká větev cirkulační smyčky, (7) hydroakumulátor, (8) bezpečnostní a pojistné ventily systému kompenzace objemu, (9) barbotážní nádrž, (10) zařízení vstříku. [6]

Aktivní zóna reaktoru o průměru 3,16 m je tvořena 163 palivovými soubory. Každý palivový soubor se skládá z 312 palivových proutků seskupených v trojúhelníkové mříži. Palivové proutky sestávají ze zirkoniové trubky, která je zaplněna tabletkami z oxidu uraničitého (UO_2) obohaceného o izotop uranu ^{235}U . Rychlé řízení reaktivity zajišťuje 61 klastrů, z nichž každý obsahuje 18 absorpčních elementů. Druhý způsob řízení reaktivity reaktoru spočívá v přidání boru ve formě kyseliny borité (H_3BO_3) o koncentraci 0 – 13,5 g/kg do primárního chladiva. Bor slouží jako absorbér neutronů, a tak změna koncentrace H_3BO_3 kompenzuje pomalejší změny reaktivity způsobené například vyhoříváním paliva nebo xenonovými přechodovými procesy. Chlazení aktivní zóny během provozu se uskutečňuje prouděním primárního chladiva vnitřními částmi reaktoru, celé zařízení reaktoru je umístěno v silnostěnné tlakové nádobě reaktoru. [3]

2.1.2. Popis a funkce kontejnmentu

Součástí jaderné elektrárny VVER-1000/V-320 je jednoduchý plnotlaký kontejnment, který je tvořen válcovou stavební konstrukcí z předepjatého betonu a je součástí bezpečnostních systémů elektrárny. Volný objem kontejnmentu činí přibližně 60 000 m³, vnitřní průměr 45,0 m a tloušťka stěny 1,20 m. Budova je uzavřena železobetonovou kopulí o tloušťce 1,10 m. Základní schéma popsaného hermetického prostoru je na Obr. 2. [7]



Obr. 2: Schéma hermetické oblasti a přilehlých prostor ETE [7]

Ochranná obálka s obestavbou je umístěna na společné stropní desce a je vyrobena z předepjatého betonu za účelem přejímání havarijních zatížení. Předpínací systém se skládá z kabelů, které jsou vyrobeny z ocelového drátu o průměru 5 mm. Spojení kopule s válcem je provedeno pomocí opěrného věnce. Kopule má, podobně jako válec, oboustrannou betonářskou výztuž v meridiálním a odvodovém směru. [8]

Účelem kontejnmentu z hlediska jaderné bezpečnosti je zamezit úniku radionuklidů do životního prostředí v případě havárie a zároveň chránit reaktor před vnějšími vlivy (např. zemětřesení, pád letadla apod.). Kontejnment představuje poslední bariéru ochrany do hloubky,

proto jeho prvky jsou vybaveny hermetickou ocelovou vystýlkou, která zabraňuje úniku radioaktivních látek do životního prostředí. [4], [7]

2.1.3. Systémy havarijního chlazení aktivní zóny a sprchový systém

Pro zmírnění průběhu a následků havárií s únikem primárního, případně sekundárního chladiva slouží systém havarijního chlazení aktivní zóny. Některá zařízení systému havarijního chlazení vyžadují pro svou činnost dodávku energie – jedná se o tzv. aktivní podsystém havarijního chlazení, jehož součástí je sprchový systém kontejnmentu a vysokotlaký, případně nízkotlaký systém. Tyto systémy jsou za účelem zálohování rozděleny na 3 samostatné kanály, z nichž každý obsahuje vysokotlaké, případně nízkotlaké vstřikovací čerpadlo. Vysokotlaký systém slouží k dodání chladiva v případě ztráty těsnosti primárního potrubí, systém nízkotlaký zajišťuje dochlazování a odvod zbytkového tepla z reaktoru. [1] Pasivní podsystém je tvořen čtyřmi hydroakumulátory a zajišťuje rychlé prvotní zaplavování aktivní zóny při havárii s únikem chladiva. Tento systém nepotřebuje pro své působení vnější zdroj energie – pro jeho činnost se využívá energie z tlakových zásobníků obsahujících roztok kyseliny borité a stlačený dusík N_2 . [4]

Jedním z nejdůležitějších aktivních systémů havarijního chlazení z pohledu kontejnmentu je sprchový systém ochranné obálky. Sprchový systém je primárně určen ke snížení tlaku v hermetické zóně, k němuž dochází v případě poškození potrubí primárního okruhu nebo parovodů sekundárního okruhu. Další funkcí sprchového systému je urychlení kondenzace vzniklé páry, což vede ke vymývání vzdušných aerosolů obsahujících radioaktivní štěpné produkty do jímky sprchových vod. [1]

Sprchový systém se skládá ze 3 nezávislých kanálů. Do sání sprchového čerpadla je přiváděn roztok kyseliny borité a roztok boritanu draselného (přesněji roztok kyseliny borité, hydroxidu draselného KOH a hydrazinu N_2H_4) pomocí ejektoru z nádrží havarijních zásob kyseliny borité. Vzniklý roztok je rozváděn do sprchových trysek umístěných v nejvyšším bodě kontejnmentu a sprchuje volný objem, vnitřní povrch kontejnmentu a zařízení v hermetické zóně. [4]

Každý ze 3 kanálů sprchového systému sestává z následujících komponent:

1. Nádrž havarijní zásoby roztoku kyseliny borité opatřená soustavou 3 vertikálních sít oddělujících 3 přijímací komory od společné části nádrže určené ke skladování roztoku kyseliny borité,

2. Sprchové čerpadlo určené k dopravě sprchovacího roztoku z nádrže rozstřikovacích trysek umístěných pod kopuli kontejnmentu,
3. Nádrž zásoby roztoku boritanu draselného určená ke skladování roztoku,
4. Ejektor určený k přísávání roztoku boritanu draselného do sání sprchového čerpadla,
5. Výměník určený k ochlazení cirkulujícího roztoku,
6. Sprchové trysky určené k rozstřiku roztoku po zařízeních a stěnách kontejnmentu,
7. Elektroarmatury na výtlačné trase sprchového čerpadla určené k možnosti dopravy roztoku do sprchových kolektorů v havarijním režimu,
8. Elektroarmatury na rozběhové trase sprchového čerpadla určené ke spolehlivému rozběhu sprchového čerpadla v havarijním režimu a k jeho vyzkoušení,
9. Trasa opatřena uzavíracími elektroarmaturami pro havarijní zaplnění bazénu vyhořelého paliva. [4]

2.1.4. LOCA havárie

LOCA (loss-of-coolant accident, havárie s únikem chladiva) je nejzávažnější projektovou havárií uvažovanou pro tlakovodní reaktory. Jedná se o událost, při které dochází k poruše potrubí primárního okruhu, okamžitému oboustrannému úniku přehřátého chladiva do prostoru kontejnmentu a následně k nedostatečnému chlazení aktivní zóny reaktoru. LOCA nehody se klasifikují podle množství a rychlosti úniku. Tato práce se zabývá tzv. LB LOCA (large-break LOCA), které charakterizuje prasknutí hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu s okamžitým oboustranným výtokem chladiva. [9]

Průběh LOCA havárií lze rozdělit do několika fází:

1. Dekomprese a vyprazdňování PO (blowdown): tato fáze zahrnuje únik primárního chladiva, ustálení tlaku, které doprovází prudké změny tlaku a velmi rychlé vzkypění chladiva, což ke vzniku dvoufázové parovzdušné směsi. Následuje odstavení reaktoru a pokles jeho tepelného výkonu, nicméně teplota povlaků palivových tyčí stále narůstá. Částečný průtok chladiva při poklesu výkonu reaktoru způsobuje snížení teploty, avšak trvalá stagnace průtoku chladiva vede k dalšímu zvyšování teploty v důsledku zbytkového vyvinu tepla.
2. Opětné zaplavení reaktorové nádoby (refill): zapojení hydroakumulátorů a zahájení procesu havarijního dochlazování aktivní zóny. Pro tuto fázi jsou charakteristické komplikace způsobené částečnou ztrátou dodávaného chladiva, například evaporací chladiva v důsledku jeho styku s přehřátými povrchy.

3. Opětné zaplavení AZ (reflood): úspěšné zaplavení reaktorové nádoby a trvalé chlazení aktivní zóny, které je podmíněno poklesem teploty palivových článků na hodnotu umožňující smáčení povrchu paliva.
4. Dlouhodobé ochlazování AZ (quenching): přechod dochlazování aktivní zóny na režim trvalé přirozené cirkulace, což může trvat až několik let. [10]

2.1.5. Chování kontejnmentu v souvislosti s LOCA havárií

Jedním z primárních cílů kontejnmentu je lokalizace havárie, tj. izolace porušeného primárního okruhu a materiálů uvolněných při případném prasknutí potrubí od životního prostředí. Štěpné produkty však mohou uniknout do životního prostředí i během normálního provozu, a to například netěsnostmi v samotném kontejnmentu nebo ventilačními systémy. Proto se v kontejnmentu udržuje mírný podtlak (přibližně 150 Pa), který pomáhá snížit únik radioaktivity během normálního provozu. V případě havárie s únikem chladiva dochází k výraznému nárůstu tlaku a teploty uvnitř kontejnmentu, a to v důsledku uvolnění parovzdušné směsi z potrubí primárního okruhu do prostoru kontejnmentu (chladiivo se za běžných podmínek nachází pod tlakem 15,7 MPa, má teplotu přibližně 300 °C a je přítomno v potrubí v kapalném skupenství). Vlivem nárůstu přetlaku v kontejnmentu může dojít k úniku radioaktivních materiálů do životního prostředí v okolí elektrárny.

Chování kontejnmentu během havárie s únikem chladiva popisuje například práce [11], která pomocí BE metody analyzuje termohydraulickou odezvu kontejnmentu na únik chladiva z primárního okruhu do prostoru ochranné obálky. V rámci provedeného BE výpočtu byl vyhodnocen přetlak (Obr. 3, Obr. 4) a teplota (Obr. 5, Obr. 6) v jednotlivých zónách hermetického prostoru (seznam zón a jejich popis je uveden v Tab. 1). Průběh přetlaku a teploty byl sledován po dobu 3 600 s od iniciační události.

Tab. 1: Seznam zón kontejnmentu uvažovaných v rámci BE výpočtu přetlaku a teploty provedených v práci [11]

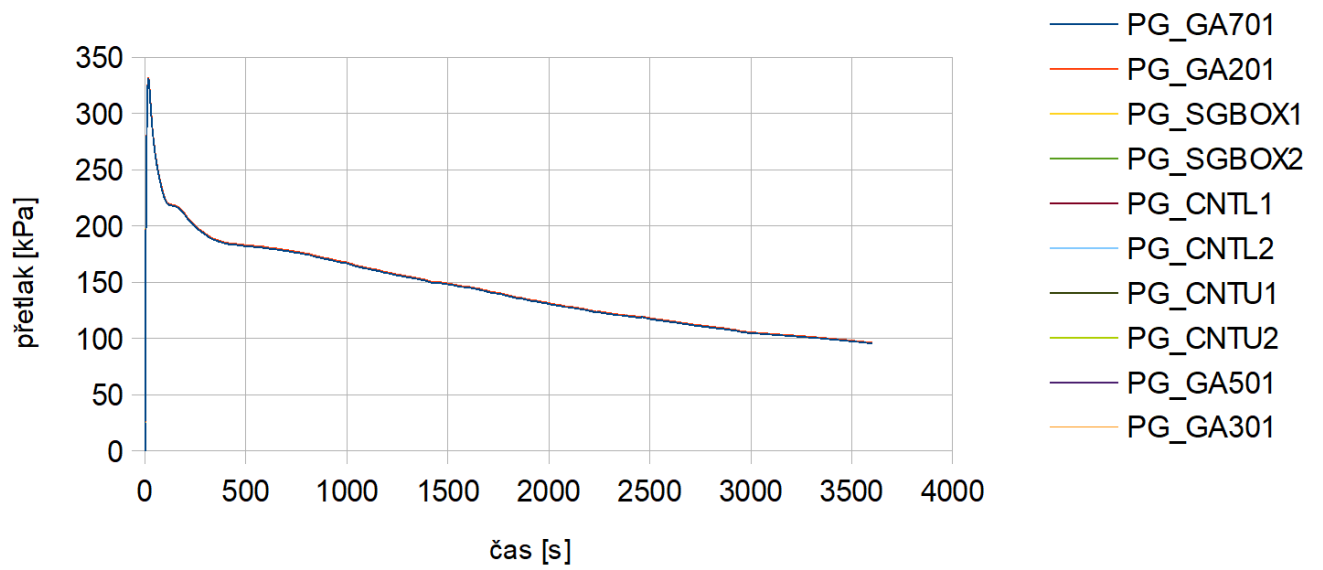
Název zóny	Popis zóny
GA701	Reaktorový sál
GA201	Jímka sprchových vod
SGBOX-1	Box parogenerátoru 1
SGBOX-2	Box parogenerátoru 2
CNT-L1	Spodní část kontejnmentu
CNT-L2	Spodní část kontejnmentu

Název zóny	Popis zóny
CNT-U1	Střední část kontejnmentu
CNT-U2	Střední část kontejnmentu
GA501	Horní část šachty reaktoru
GA301	Dolní část šachty reaktoru

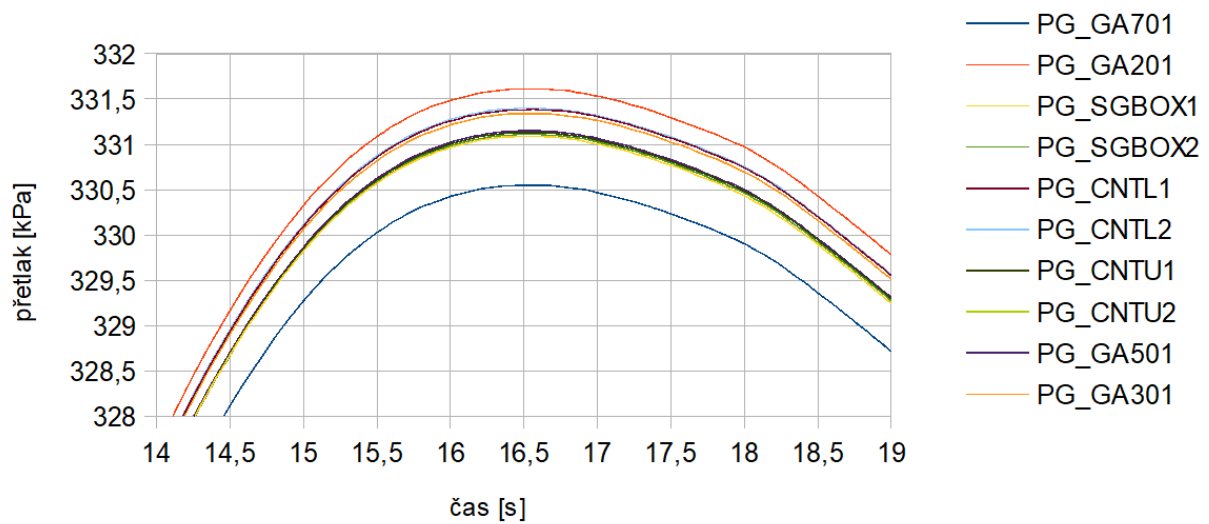
Nárůst teploty a tlaku v důsledku úniku chladiva do volného objemu kontejnmentu se konal prakticky současně, s mírně rychlejším dosažením maxima u teploty. Maximální přetlak pro BE výpočet byl dosažen v nádrži kyseliny borité GA201 v čase 16,4 s po iniciační události a rovnal se 331,6 kPa (Obr. 4). Hodnoty přetlaku byly v jednotlivých zónách velmi vyrovnané (Obr. 3), pravděpodobně díky dobrému propojení zón: rozdíl mezi maximální (v zóně GA201) a minimální (v zóně GA701) hodnotou tlaku činil přibližně 1,5 kPa.

V případě teploty byly patrný mnohem větší rozdíly (Obr. 5, Obr. 6). Maximální hodnota teploty činila přibližně 200 °C a byla dosažena v čase 15,6 s v objemu šachty reaktoru GA501. Minimální hodnota teploty v okamžiku 15,6 byla dosažena v objemu GA201. Její hodnota se rovnala přibližně 160 °C, byla tedy téměř o 40 °C nižší než teplota maximální.

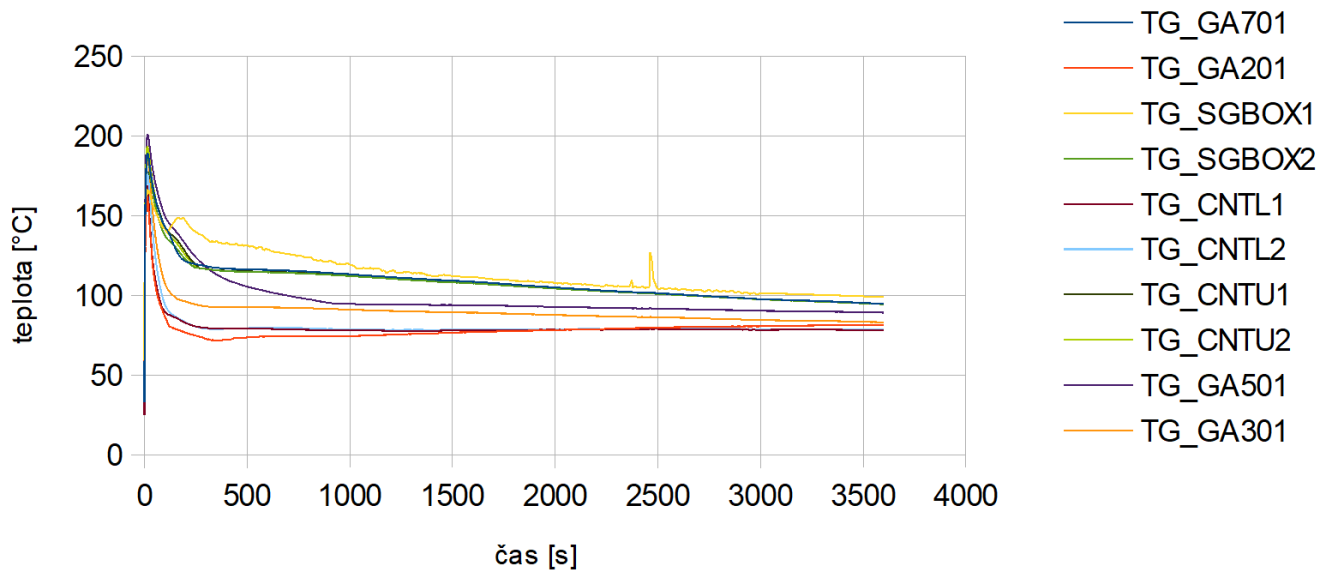
Po nárůstu přetlaku a teploty následoval prudký pokles, a to jednak v důsledku kondenzace parovzdušné směsi ve volném objemu a na vnitřních površích kontejnmentu, tak i díky zapojení sprchového systému. Tlak po dosažení maxima klesal, s nepatrným sekundárním tlakovým píkem kolem 150 s, až do konce výpočtu, pokles teploty byl však pomalejší. Stabilizace tlaku a teploty pokračovala až do konce výpočtu. Konečný přetlak ve všech zónách byl téměř stejný (přibližně 100 kPa), teplota se nacházela v rozmezí 75–100 °C v závislosti na konkrétní zóně.



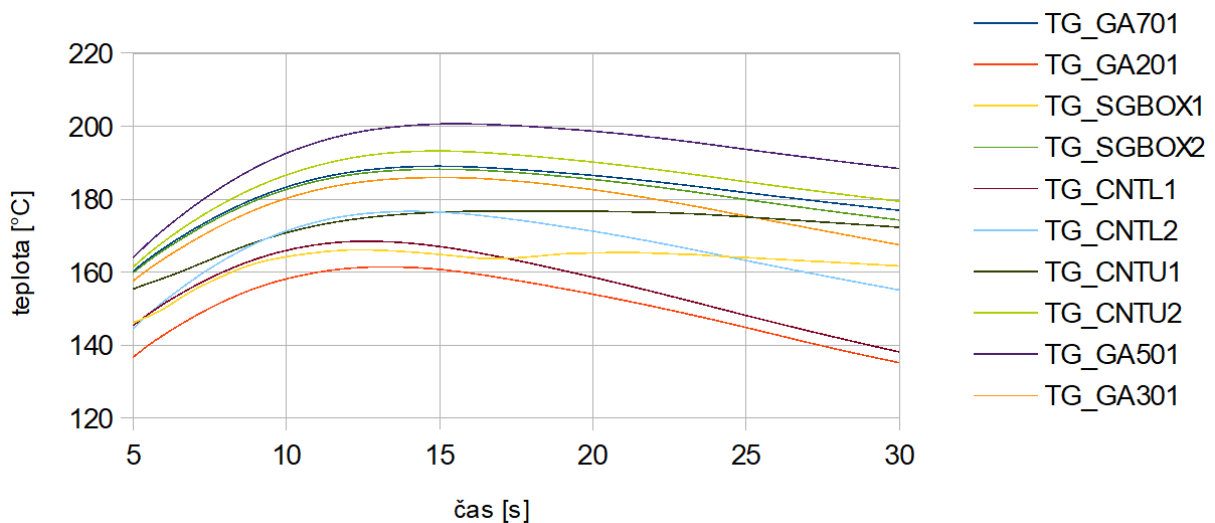
Obr. 3: BE výpočet přetlaku v zónách kontejnmentu, 0–3600 s [11]



Obr. 4: BE výpočet přetlaku v zónách kontejnmentu, 14–19 s [11]



Obr. 5: BE výpočet teploty v zónách kontejnmentu, 0–3600 s [11]

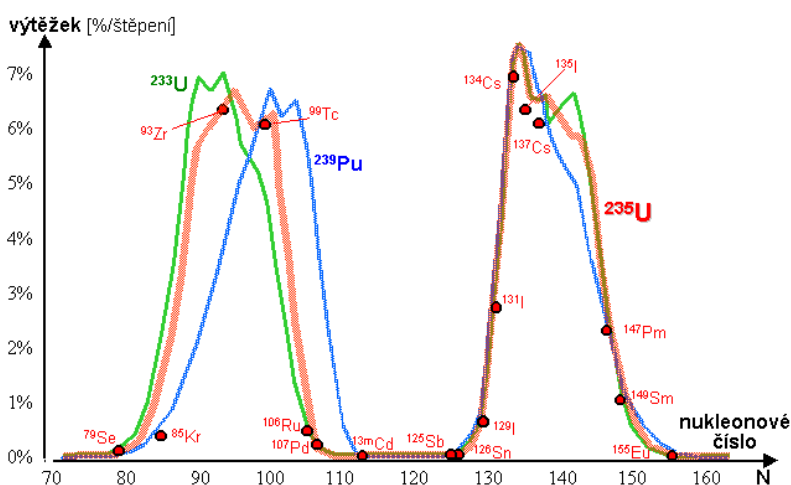


Obr. 6: BE výpočet teploty v zónách kontejnmentu, 5–30 s [11]

2.1.6. Jód jako štěpný produkt

Jód je prvek, který má pouze 1 stabilní izotop a patří do skupiny halogenů. Vzniká v aktivní zóně jaderného reaktoru štěpením jaderného paliva tepelnými neutrony, přičemž tento proces je charakterizován vysokým výtěžkem vznikajícího štěpného produktu (přibližně 6 až 7 %, viz Obr. 7), případně radioaktivní přeměnou jader jiných prvků. Většina vznikajících izotopů jódu je krátkodobých (poločas rozpadu se pohybuje v řádu do několika hodin). Radioaktivní izotopy jódu úzce souvisejí s radiačními následky nehod na jaderných elektrárnách, a to kvůli silné bioaktivitě. Metabolické procesy v lidském těle vedou ke koncentraci jódu ve štítné žláze, což

může vést k nekontrolovanému zevnímu či vnitřnímu ozáření jedince. Na rozdíl od jiných štěpných produktů, které se mohou uvolnit z reaktoru, následky vnitřního ozáření radioaktivními izotopy jódu lze značně redukovat. Ochranou proti této formě ozáření je jódová profylaxe, která je součástí havarijního plánování. [12] Mezi významné izotopy s vysokým výtěžkem patří například ^{131}I , který díky svému poločasu (přibližně 8 dní) má poměrně vysokou bioaktivitu.



Obr. 7: Výtěžek štěpení radionuklidů ^{233}U , ^{239}Pu a ^{235}U tepelnými neutrony [13]

Chemicko-fyzikální vlastnosti jódu silně ovlivňují transport tohoto prvku skrze primární okruh jaderné elektrárny a následně uvnitř prostoru kontejnmentu. Problematika transportu jódu představuje multidisciplinární problém, který vyžaduje hluboké znalosti širokého spektra vzájemně provázaných fyzikálních a chemických procesů. Správné pochopení a aplikace těchto znalostí je nutná pro určení zdrojového členu kontejnmentu a navazujících radiačních následků, které představují konečný článek celého řetězce bezpečnostních analýz.

2.1.7. Zdrojový člen

Zdrojový člen (accident source term) je definován Americkým jaderným regulačním úřadem (NRC, U.S. Nuclear Regulatory Commission) jako únik štěpných produktů z aktivní zóny reaktoru do atmosféry kontejnmentu, je charakterizován složením a množstvím uniklých štěpných produktů, jejich chemickými a fyzikálními vlastnostmi a dobou, po kterou jsou štěpné produkty uvolňovány do kontejnmentu. Výše zmíněné faktory souvisí s typem sledované nehody. Pro únik štěpných produktů z primárního okruhu do objemu kontejnmentu se používá výraz in-containment accident source term, zdrojový člen definující únik mimo prostor kontejnmentu se nazývá containment accident source term, případně ex-containment accident

source term. Uvedená definice se používá v mnoha zemích včetně České republiky a je součástí české legislativy. [14], [15]

Hlavními složkami zdrojového členu souvisejícími s LOCA haváriemi na lehkovodních reaktorech jsou vzácné plyny (například xenon a krypton), halogeny (například jód a brom) a alkalické kovy (například cesium a rubidium). Do zdrojového členu mohou přispívat i jiné chemické prvky, nicméně jejich podíl na úniku hmoty z aktivní zóny je mnohém nižší. Množství radionuklidů uvolněných z aktivní zóny do prostoru kontejnmentu závisí na stupni poškození paliva a pokrytí paliva. Podrobnější seznam chemických prvků, které se uvažují jako součást zdrojového členu při LOCA havárii je uveden v Tab. 2. [14]

Tab. 2: Přehled vybraných chemických prvků obecně uvažovaných při haváriích v lehkovodních reaktorech [14]

Skupina	Prvky
Vzácné plyny	Xe, Kr
Halogeny	I, Br
Alkalické kovy	Cs, Rb
Kovy alkalických zemin	Ba, Sr
Vzácné kovy	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
-	Ce, Pu, Np
Lanthanoidy	La, Pr, Nd, Pr apod.
Jiné	Te, Sb, Si

2.2. Úvod do bezpečnostních analýz

Bezpečnostní analýzy jsou definovány Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (IAEA) jako analytická vyhodnocení fyzikálních jevů, jež se vyskytují během činnosti jaderných elektráren. [16]. Účelem bezpečnostních analýz je prokázat, že kritéria přijatelnosti stanovené současnou legislativou a bezpečnostní požadavky (například zajištění integrity bariér, které chrání okolí jaderné elektrárny před únikem radioaktivních látek) jsou splněny pro všechny předpokládané iniciační události, které se mohou vyskytnout v širokém spektru provozních stavů včetně různých úrovní dosažitelnosti bezpečnostních systémů a mohou vést ke vzniku abnormálního provozu nebo havarijních podmínek. Příkladem iniciační události může být chyba operátora, selhání libovolného systému či zařízení apod. Existují dva typy

bezpečnostních analýz, deterministické a pravděpodobnostní. Tyto dva typy se v řetězci bezpečnostních analýz mohou různě kombinovat. [16]

Deterministické bezpečnostní analýzy předpovídají odezvu jaderné elektrárny na konkrétní předpokládané iniciační události prostřednictvím počítačového modelování a jsou těsně spjaty se specifikovanými předpisy, předpoklady a kritérii přijatelnosti. Typicky jsou zaměřeny na neutronové, termohydraulické a termomechanické aspekty provozu elektrárny, dále na radiační následky havárií a chování konstrukce samotné jaderné elektrárny. Obecně se provádí pomocí výpočetních kódů a programů. Výpočty se realizují pro předem stanovené provozní stavy elektrárny. Výsledky jsou závislé na fyzikálních proměnných jako např. tlak, teplota, fyzikální a chemické složení komponent, dávka na pracovníky elektrárny nebo okolní obyvatele apod. Deterministické bezpečnostní analýzy pro projektové účely musejí být charakterizovány konzervativními předpoklady v kombinaci se sadou konzervativních nebo BE předpokladů pro počáteční a okrajové podmínky (pro podrobnější popis viz Tab. 3). Na rozdíl od deterministických analýz, které musejí ověřit pokrytí určitých kritérii přijatelnosti, analýzy pravděpodobnostní musejí stanovit pravděpodobnost poškození každé bariéry. [16]

Podstatou konzervativního přístupu je značné zjednodušení řešených výpočtů v kombinaci s počátečními a okrajovými podmínkami, které vedou k nejméně příznivým výsledkům analýzy. Taková omezení vycházela z omezené výkonnosti počítačů v dobách počátků bezpečnostních analýz a měla za následek záměrné nadhodnocení bezpečnostních rezerv, což nemusí vést ke správnému hodnocení průběhu havárie. Nástupcem této metody je metoda kombinovaná, která používá pokrokovější BE výpočetní kódy, avšak počáteční a okrajové podmínky jsou voleny konzervativně. Metoda pravděpodobnostní s uvažováním neurčitostí vstupních dat (metoda risk informed) využívá výpočetní kódy, které pracují s realistickými hodnotami počátečních a okrajových podmínek včetně jejich neurčitostí, hodnocení bezpečnostních systémů vychází z pravděpodobnostního hodnocení (PSA, probabilistic safety assessment). Metoda použitá v této práci má název best-estimate plus uncertainties (BEPU), využívá deterministický přístup, realistické počáteční a okrajové podmínky a realistické BE výpočetní kódy [16], [11]. Podrobnější výklad BEPU metodiky obsahuje následující kapitola (2.3). Přehled všech dosud používaných přístupů k bezpečnostním analýzám je uveden v Tab. 3.

Tab. 3: Přehled metod bezpečnostních analýz [16], [11]

Metoda	Výpočetní program	Dosažitelnost bezpečnostních systémů	Počáteční a okrajové podmínky	Přístup
Konzervativní	Konzervativní	Konzervativní předpoklad	Konzervativní	Deterministický
Kombinovaná	Best estimate	Konzervativní předpoklad	Konzervativní	Deterministický
Best estimate	Best estimate	Konzervativní předpoklad	Realistické s uvážením neurčitostí	Deterministický
Risk informed	Best estimate	Předpoklad na základě PSA	Realistické vstupní data s uvážením neurčitostí	Pravděpodobnostní

2.3. Metodika best-estimate plus uncertainties

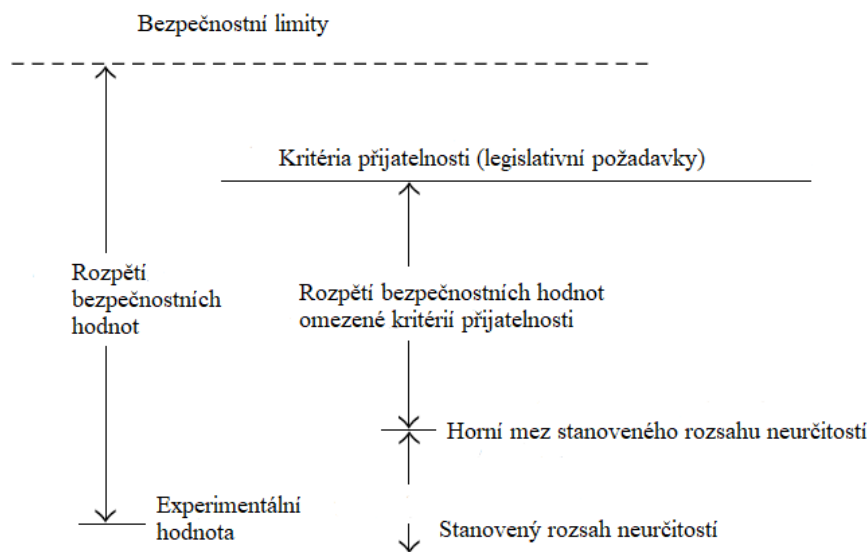
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, metodika BEPU je založena na využití výpočetních programů a stanovení vstupních dat s uvážením neurčitostí a ohledem na realističnost. Výpočetní kódy určené k modelování jsou vyvíjeny na základě údajů získaných v rámci experimentů, které simulují komplexní chování prvků jaderné elektrárny v havarijních podmínkách. [17] Výhodou této metody oproti metodě konzervativní je především možnost stanovit i zkoumat i na první pohled méně závažné problémy, které ovšem mohou způsobit velké škody. Jako příklad lze uvést havárii na elektrárně TMI-2 (Three Mile Island Unit 2) v roce 1979 v USA, kde v důsledku poruchy jednoho z ventilů, chyb obsluhy reaktoru a následného nedostatečného chlazení aktivní zóny došlo k jejímu roztavení. Je tedy potřeba věnovat pozornost i na první pohled méně významným událostem, a to z důvodu větší pravděpodobnosti jejich výskytu a odlišného průběhu přechodových procesů. Uvedené faktory mohou vést k méně příznivým radiačním následkům nežli nehoda na první pohled závažnější.

Metoda BEPU pracuje s realistickými daty, které zahrnují počáteční a okrajové podmínky zkoumané události, parametry elektrárny a realistickým scénářem havárie, přičemž se z hlediska dostupných bezpečnostních systémů i nadále uvažuje konzervativní přístup, jelikož se jedná o bezpečnostní hodnocení. Pojem nejlepšího odhadu znamená dosažení nejlepší predikce v podmínkách neurčitosti. V ideálním případě se jedná o predikci bez neurčitostí, tzn. o shodu experimentálních a výpočetních výsledků. [18]

2.3.1. Neurčitostní analýzy

Neurčitosti, které se mohou vyskytnout v průběhu analýzy, mohou pocházet například z rozptylu naměřených hodnot, modelovaných aproximací, nepřesného stanovení konkrétních počátečních a okrajových podmínek apod. Jedním z hlavních cílů neurčitostních analýz je identifikace a kvantifikace potenciálně důležitých neurčitých parametrů a počátečních a okrajových podmínek. Jejich zpracování v rámci počítačových výpočtů poté poskytuje pravděpodobnostní rozdělení a rozsah vypočítaných výsledků. [11], [17]

Zjednodušený popis principu neurčitostních analýz poskytuje schéma na Obr. 8. Bezpečnostní limity jsou maximální horní hranici, které lze dosáhnout v rámci sledované události a při které stále nedojde k poškození bezpečnostní bariéry. Kritéria přijatelnosti jsou brány z hlediska regulačních orgánů – jako legislativní požadavky. Stanovený rozsah neurčitostí zahrnuje reálnou experimentální hodnotu a je charakteristický právě pro BE výpočty. Bezpečnostní rezervou je rozdíl mezi experimentální hodnotou a horní mezí rozsahu neurčitostí. [17]



Obr. 8: Koncept neurčitostního přístupu k bezpečnostním analýzám [17]

Metody neurčitostní analýzy lze na základě uvažovaných dat rozdělit na 2 skupiny:

- Šíření vstupních neurčitostí (propagation of input uncertainties) – neurčitosti plynou ze samotné identifikace vstupních parametrů se stanoveným rozsahem a/nebo distribucí pravděpodobnosti těchto parametrů. Zdrojem neurčitostí může také být provedení

výpočtů, ve kterých jsou použity různé variace vstupních parametrů. Na tomto principu je postavena tzv. GRS metoda, která je využita v této práci.

- Extrapolace výstupních neurčitostí (extrapolation of output uncertainties) – neurčitosti jsou založeny na porovnání výsledků výpočtů a významných experimentálních údajů. [19]

2.3.2. GRS metoda

Statistická pravděpodobnostní metoda GRS byla vyvinuta německou společností Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH pro určení nejistot týkajících se konkrétních počátečních a okrajových podmínek (parametrů) studované nehody. Popis každého neurčitostního parametru obsahuje rozsah a pravděpodobnostní rozdělení hodnot. Neurčitosti výsledků plynou z provedení určitého množství výpočtů, přičemž pro každý výpočet se používá jiná variace hodnot neurčitostních parametrů. [11], [17]

Výběr hodnot parametrů závisí na jejich pravděpodobnostním rozdělení, jejich vzájemném vlivu a propojení a vyhodnocení výsledků výpočtů. Množství provedených výpočtů je přitom nezávislé na počtu neurčitostních parametrů, ale je stanoveno požadovanou pravděpodobností, což je velkou výhodou této metody. Pro stanovení množství nacházejících výpočtů lze využít Wilksovy rovnice (1), v níž n značí počet výpočtů potřebných k dosažení určité přesnosti, koeficienty α a γ značí toleranční meze, β je koeficient spolehlivosti, m je řád rovnice. Požadujeme, aby pro úroveň spolehlivosti vyjádřenou výrazem $100 \cdot (1 - \gamma)$ platilo, že $100 \cdot \alpha$ % elementů populace pokrývá rozsah hodnot mezi nejmenší a největší hodnotou výběru. Poté pomocí Wilksovy rovnice lze zjistit potřebné množství výpočtů. [11], [17]

$$\alpha = 1 - \sum_{i=n-m+1}^n \binom{n}{i} \gamma^i (1 - \gamma^{n-i}) \quad (1)$$

První řád Wilksovy rovnice je vhodný pro jednostranný interval, minimální hodnota je okrajem výběru. Další výběry jsou umístěny s danou pravděpodobností mezi minimální hodnotou a největší vybranou hodnotou. Pro $m = 1$ tedy platí vztah (2):

$$\alpha = 1 - \gamma^n \quad (2)$$

Druhý řád rovnice ($m = 2$) má tvar (3) a určuje interval omezený minimální a maximální hodnotou, tedy dvoustranný interval.

$$\alpha = 1 - n\gamma^{n-1} - (n-1)\gamma^n \quad (3)$$

Řešení Wilksovy rovnice pro jednostranný ($m = 1$) a dvoustranný ($m = 2$) interval lze najít v Tab. 4. Vhodnou hodnotou koeficientů α a β je 0,95, což v bezpečnostních analýzách platí obecně. Pro jednostranný interval to tedy znamená provedení minimálně 59 opakovaných výpočtů, pro interval dvoustranný 93 výpočtů. [11], [17]

Tab. 4: Množství výpočtů potřebné pro $m = 1$ a $m = 2$ [17]

m	1			2		
α	0,90	0,95	0,99	0,90	0,95	0,99
β						
0,90	22	45	230	38	77	388
0,95	29	59	299	46	93	473
0,99	44	90	459	64	130	662

Jelikož hodnoty počátečních a okrajových podmínek uvažované v této diplomové práci jsou omezeny minimální a maximální možnou hodnotou, výpočty bylo potřeba vyhodnotit pomocí dvoustranného intervalu. Jak již bylo uvedeno výše, v bezpečnostních analýzách obecně platí následující standard: 95 % elementů populace (vygenerovaných hodnot počátečních a okrajových podmínek) musí pokrýt uvedený rozsah mezi minimální a maximální hodnotou výběru s 95% pravděpodobností. Bylo tedy potřeba provést a vyhodnotit minimálně 93 výpočtů.

2.3.3. Citlivostní analýzy

Citlivost systému jako celku na dílčí vstupní veličiny lze zjistit pomocí provedení tzv. citlivostní (korelační) analýzy, která obecně slouží k hodnocení vztahu dvou a více spojitých náhodných veličin. Pro tyto účely lze použít například Spearmanův korelační koeficient, který vyhodnocuje pořadí sledovaných hodnot, je robustní vůči odchylkám od monotónní funkce a lze ho vypočítat i pro nelineární závislost. [18]

Nechť $(x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ je náhodný výběr ze spojitého dvojrozměrného rozdělení. Sledujeme dvojice náhodných veličin x_i, y_i , kde $i = 1, 2, \dots, n$, přičemž cílem je otestovat hypotézu, že x_i a y_i jsou nezávislé náhodné veličiny. Pro každé číslo x_i se určí číslo x_{ri} , které odpovídá pořadí hodnoty x_i v rámci vzestupně uspořádaných hodnot x_1, \dots, x_n . Stejný postup platí pro nalezení

pořadí y_{ri} pro každé y_i v intervalu y_1, \dots, y_n . Následně je vypočtena diference pořadí sledovaných hodnot $d_i = x_{ri} - y_{ri}$. Spearmanův korelační koeficient r se následně vypočte pomocí vztahu (4):

$$r = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n d_i^2 \quad (4)$$

Hodnoty r se pohybují v rozmezí od -1 do 1, kde $r = 0$ znamená, že pořadí hodnot je náhodné a mezi pozorovanými veličinami není žádná souvislost. Hodnoty -1 a 1 znamenají, že mezi hodnotami může existovat určitá souvislost a jedna z veličin může být monotónní funkcí druhé veličiny. Další důležitou vlastností koeficientu r je skutečnost, že rovnice (4) platí pouze pro neopakované hodnoty. [18], [20]

Kritická hodnota Spearmanova korelačního koeficientu je hodnota, při které nelze uvažované veličiny brát jako nezávislé. Pro $n \leq 30$ platí rozsah tabelovaných kritických hodnot. Pokud je absolutní hodnota r větší nebo rovná tabelované kritické hodnotě, lze uvažovat, že mezi veličinami může existovat určitá závislost. Pokud je $n \geq 30$, pro kritickou hodnotu koeficientu r_{krit} platí vzorec (5):

$$|r_{krit}| = \frac{u(\alpha/2)}{\sqrt{n-1}}, \quad (5)$$

kde $u(\alpha/2)$ je kritická hodnota rozdělení $N(0, 1)$. [18]

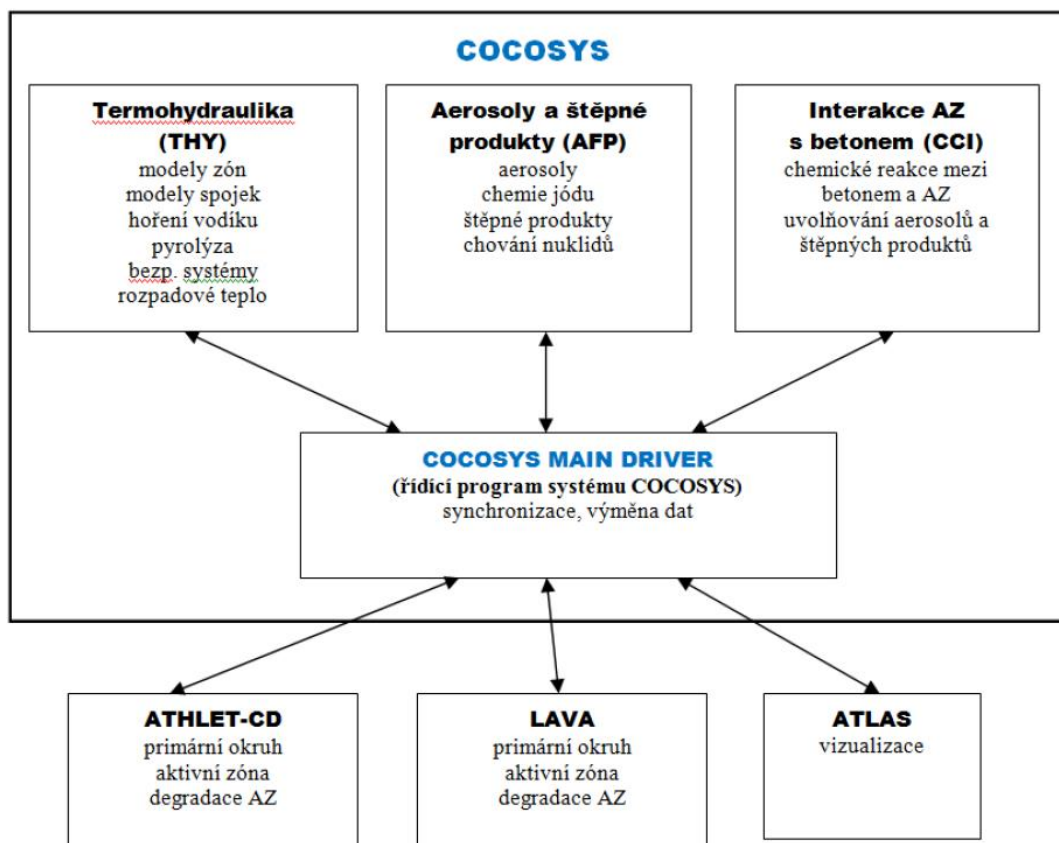
Pro hladinu významnosti 0,05 a množství dvojic sledovaných veličin $n = 93$ se kritická hodnota $u(\alpha/2)$ rovná 1,96 a kritická hodnota Spearmanova korelačního koeficientu $|r_{krit}|$ se rovná 0,204. [18]

2.4. Použitý software

Výpočty procesů probíhající v kontejnmentu a analýza výsledků byly provedeny pomocí dvou výpočetních kódů. Program COCOSYS byl použit pro modelování odezvy kontejnmentu na LOCA havárii a výpočty množství jódu uvolněného mimo hermetickou zónu. Program SUSANA slouží k vygenerování hodnot počátečních a okrajových podmínek a následné neurčitostní a citlivostní analýze výsledků výpočtů. Oba programy jsou vyvíjeny německou společností GRS mbH k účelům deterministických a BE bezpečnostních analýz. Tato kapitola obsahuje krátký popis obou programů.

2.4.1. COCOSYS 2.4v5

COCOSYS (Containment Code System) je výpočetní kód vyvíjený od roku 1994. Pro účely diplomové práce byla použita verze COCOSYS 2.4v5. Kód je založen na bázi mechanistických modelů, je používán pro simulaci procesů v kontejnmentech a hermetických boxech jaderných elektráren a uvažuje vzájemný vliv jednotlivých procesů. Hlavními analyzovanými jevy jsou termohydraulické procesy, chování aerosolů a štěpných produktů a interakce korie (roztaveného obsahu aktivní zóny) s betonem. Zkoumaný objem (kontejnment, hermetická zóna, experiment) je v programu rozdělen do virtuálních objemů, které jsou reprezentovány stavovými veličinami. Tyto veličiny lze definovat zvlášť pro každý zkoumaný objem. Výpočetní kód obsahuje 3 hlavní samostatně spustitelné moduly (soubory funkcí). Popis jednotlivých modulů kódu COCOSYS, propojení modulů a programů používaných ke zpracování získaných dat znázorňuje Obr. 9. [21]



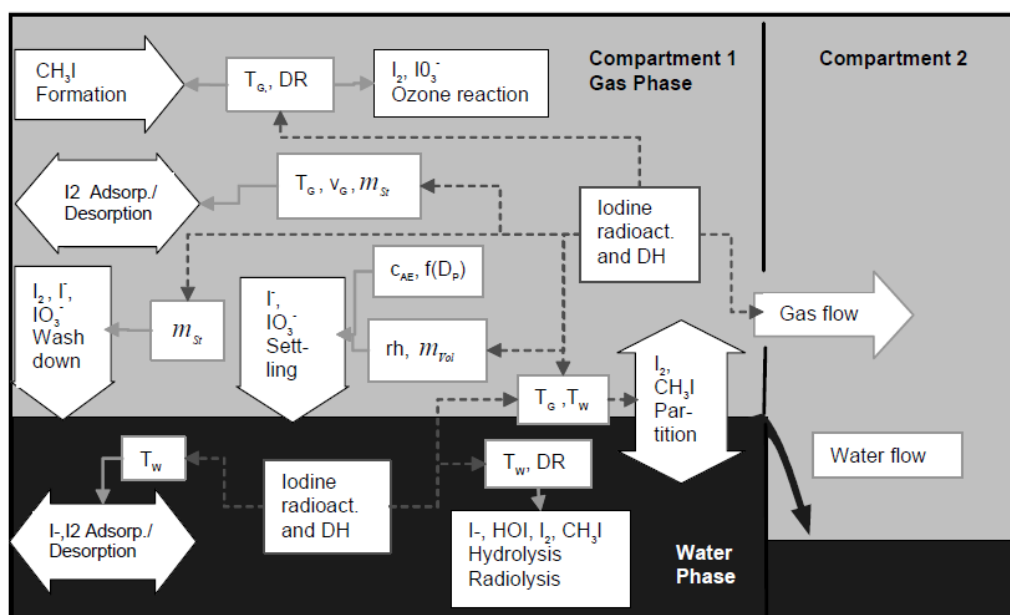
Obr. 9: Schéma výpočetního kódu COCOSYS [22]

Modul AIM-3 (Advanced Iodine Model, 3rd version) je součástí velkého modulu AFP (viz Obr. 9) a slouží k simulaci chemických reakcí a transportních procesů souvisejících s jódem a jeho

sloučeninami. Transport jódu probíhá ve virtualizovaných výpočetních objemech, které odpovídají modelované geometrii – tzv. kompartmentech. [21], [23]

Modul je schopen popsat 52 chemických reakcí a 18 fyzikálních procesů (např. depozice na povrchu), jichž se účastní 26 sloučenin. Tyto sloučeniny obsahují 8 základních chemických forem jódu: I_2 (molekulární jód), I^- (jodidy), IO_3^- (jodičnany), CH_3I (v COCOSYS značí všechny organické jodidy), AgI (málo rozpustný jodid stříbrný), HOI (kyselina jodná), I_{FeI2} (jód chemisorbovaný na ocel) a I_{chs} (jód chemisorbovaný na barvu). Sloučeniny mohou být v různém skupenství, a tak jsou v COCOSYS brány jako různé sloučeniny kvůli odlišným reakcím, kterým mohou podléhat v různých skupenstvích. Reakce mohou probíhat také například s produkty radiolýzy vody a organickými nečistotami, proto modul obsahuje sloučeniny jako O_3 , CH_3 apod. [21], [23]

Komplexní chování jódu v modelovaných kompartmentech a při transportu mezi nimi zjednodušeně popisuje Obr. 10, kde T_g je teplota plynné fáze, T_w je teplota kapalná fáze, rh je relativní vlhkost plynné fáze, DR je dávkový příkon, m_{st} a m_{vol} jsou hodnoty vyjadřující stupeň kondenzace na zdech kontejnmentu a v určitém objemu, v_g je rychlost vzduchu podél zdí, c_{ae} je koncentrace aerosolů, $f(D_p)$ je funkce popisující distribuci velikosti částic a DH je teplo produkované radioaktivním rozpadem. [24]



Obr. 10: Zjednodušený diagram přeměn jódu v kontejnmentu [24]

Mezinárodní normy IAEA [25] vyžadují provedení validace (ověření výpočetních schopností) všech počítačových kódů, které se využívají pro deterministické bezpečnostní analýzy chování

jaderných elektráren. Účelem validace je prokázání schopnosti výpočetního programu předpovídat hodnoty určitých parametrů, například bezpečnostních. Je také potřeba stanovit přesnost vypočítaných parametrů. Například práce [26] byla zaměřena na problematiku adsorpce jódu na barvených površích, validaci modulu pro simulaci chemických procesů a šíření jódu AIM-3 a modifikaci hodnot výpočetních parametrů souvisejících s adsorpcí a desorpcí jódu na površích barvených epoxidovým nátěrem Ameron Amerlock, který se používá na jaderné elektrárně Temelín.

2.4.2. SUSANA

Neurčitostní a citlivostní analýzy vyžadují kvantifikaci vzájemného vlivu zdrojů neurčitostí a jejich vyhodnocení podle toho, v jaké míře jednotlivé zdroje ovlivňují výslednou neurčitost. SUSANA (Software for Uncertainty and Sensitivity analysis) provádí uživatele hlavními kroky neurčitostních a citlivostních analýz. Mezi hlavní body patří:

- Identifikace všech jevů, procesů, předpokladů pro modelování parametrů, které se mohou podílet na míře výsledné neurčitosti výsledku výpočtů, tzn. reprezentaci všech zdrojů neurčitosti. Výsledkem identifikace je sada neurčitostních parametrů, která také zahrnuje počáteční a okrajové podmínky;
- Kvantifikace poznatků o neurčitostních parametrech, například jejich pravděpodobnostní rozdělení;
- Vytvoření sady vstupních hodnot neurčitostních parametrů na základě získaných poznatků (viz předchozí krok);
- Provedení samotných výpočtů pro každou sadu hodnot parametrů a počátečních a okrajových podmínek;
- Kvantifikace neurčitostí výsledků výpočtů (neurčitostní analýza);
- Vyhodnocení parametrů s ohledem na jejich vliv na celkovou neurčitost výsledku (citlivostní analýza);
- Rozsáhlá evidence kroků analýzy pro kontrolu výsledků. [27]

3. VSTUPNÍ DATA PRO BE ANALÝZU

Následující kapitola poskytuje popis výpočetního modelu a přehled přípravy vstupních dat pro provedení BE analýzy úniku jódu do okolí jaderné elektrárny Temelín v důsledku havárie s únikem chladiva. V rámci modelované nehody se uvažovalo prasknutí studené větve primárního okruhu, spouštění sprchového systému a únik vybraných sloučenin jódu z mezery palivo pokrytí do kontejnmentu a následně netěsnostmi kontejnmentu do okolí.

Pro provedení veškerých potřebných výpočtů byl nejdříve vytvořen seznam počátečních a okrajových podmínek, které by teoreticky mohly mít vliv na zkoumaný zdrojový člen. Jednalo se například o teplotu vzduchu a vody uvnitř kontejnmentu, relativní vlhkost vzduchu, dávkový příkon ve vzduchu a vodě apod. Poté pomocí dat z ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav), technické dokumentace a vybraných zpráv ÚJV byly stanoveny BE hodnoty a rozsah hodnot pro počáteční a okrajové podmínky, také bylo určeno rozložení hodnot (normální nebo lineární) a vazba mezi jednotlivými počátečními a okrajovými podmínkami (ve všech případech kladná). Celkem bylo určeno 75 počátečních a okrajových podmínek, jejichž seznam je uveden v Příloze (Tab. 11). Následně byly pomocí programu SUSA vygenerovány konkrétní náhodné hodnoty v rámci stanovených rozpětí a pravděpodobnostních rozložení pro každou počáteční a okrajovou podmínku. Dalším krokem bylo vytvoření vstupních souborů, obsahujících již vygenerované sady hodnot počátečních a okrajových podmínek.

3.1. Termohydraulický model

Vstupní termohydraulický model reprezentuje kontejnment v programu COCOSYS a obsahuje zóny, tzv. nody, tepelné struktury, spojky mezi zónami apod. Je potřeba zmínit, že ve zkoumaném případě se jedná o zjednodušení reálné situace. Pro použitý model platí, že stavové veličiny jsou středovány pro jednotlivé nody. Model použitý v této diplomové práci byl převzat ze zdroje [28]. Filozofie modelu zakládá na realistické reprezentaci kontejnmentu menším počtem zón s ohledem na možnost rychlého výpočtu a provádění citlivostních studií. Model zahrnuje samotnou hermetickou obálku elektrárny a její okolí, přičemž prostor kontejnmentu je rozdělen do jednotlivých místností tak, aby model odpovídal stavbě ochranné obálky a zároveň neobsahoval příliš mnoho zón z důvodu výpočetní náročnosti. Model se skládá z 24 nodů, které jsou navzájem propojeny více než 100 atmosférickými a vodními spojkami, a zahrnuje také sprchové systémy, ventilaci, netěsnosti kontejnmentu apod.

Dominantním objemem modelu kontejnmentu je reaktorový sál GA701, šachta reaktoru je rozdělena na horní a spodní část a je reprezentována místnostmi GA501 a GA301A. Horní část prstence kontejnmentu reprezentují místnosti CNT-U1 a CNT-U2, střední část je modelována pomocí místností CNT-M1 a CNT-M2. Spodní část se skládá z místností CNT-L1 a CNT-L2 (součást prstence), GA311, GA306-1, GA306-2 a GA306-3. Boxy parogenerátoru tvoří zóny SGBOX-1 a SGBOX-2. Bazény vyhořelého jaderného paliva jsou modelovány pomocí místnosti GA4012A a jímka sprchových vod (nadrž havarijní zásoby) obsahující kyselinu boritou H_3BO_3 je reprezentována místností GA201. Schéma nodalizace je přítomno na Obr. 11, seznam modelovaných zón a jejich stručný popis obsahuje Tab. 5. Systémy TQ na Obr. 11 (v horní a dolní části: TQNall, TQN1, TQNx) jsou sprchové systémy. Spojky mezi jednotlivými nody jsou vyznačeny šipkami.

Pro simulaci netěsnosti kontejnmentu byla v programu COCOSYS vytvořena spojka J_LEAK1 mezi ochrannou obálkou, konkrétně zónou reprezentující reaktorový sál GA701, a okolím ENVIRON (viz Obr. 11). V rámci simulace se počítalo pouze s únikem netěsnostmi, možné úniky přes ventilační systémy byly zanedbány.

Model okolí kontejnmentu se skládá ze dvou zón: ENVIRON a BUILDING. Zóna ENVIRON představuje samotné okolí elektrárny, tudíž je modelována jako zóna s podstatně větším objemem vůči jiným zónám ($2 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$), a slouží jako okrajová podmínka. Zóna BUILDING představuje části přiléhajících budov elektrárny mimo hermetickou zónu.

Tab. 5: Popis modelovaných zón [28]

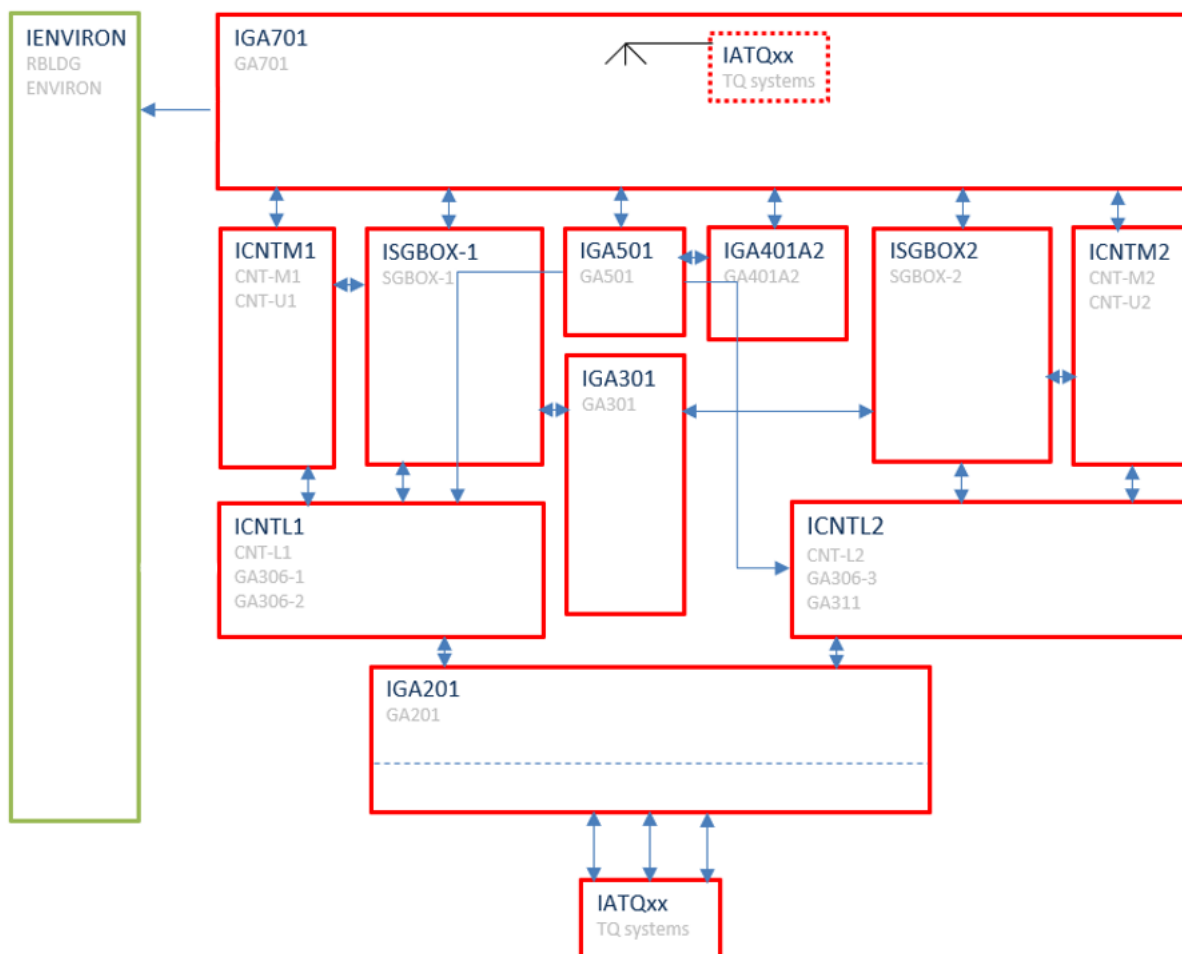
Název zóny	Popis zóny
ENVIRON	Okolí elektrárny
ENV22	Okolí elektrárny spojené s ventilačním systémem TL22
ENV	Okolí elektrárny spojené s ventilačním systémem TL42
RBLDG	Budovy přiléhající na kontejnment
GA701	Reaktorový sál
GA501	Horní část šachty reaktoru
GA301A	Spodní část šachty reaktoru
GA401A2	Bazény vyhořelého jaderného paliva
SGBOX-1	Box parogenerátoru 1
SGBOX-2	Box parogenerátoru 2
CNT-U1	½ horní části kontejnmentu (výška +27,50 až 36,90 m)
CNT-U2	½ horní části kontejnmentu (výška +27,50 až 36,90 m)
CNT-M1	½ střední části kontejnmentu (výška +19,54 až 27,50 m)
CNT-M2	½ střední části kontejnmentu (výška +19,54 až 27,50 m)
CNT-L1	½ spodní části kontejnmentu (výška až +19,54 m)
CNT-L2	½ spodní části kontejnmentu (výška až +19,54 m)
GA311	Spodní část kontejnmentu
GA306-1	Spodní část kontejnmentu
GA306-2	Spodní část kontejnmentu
GA306-3	Spodní část kontejnmentu
TL22P	Potrubí ventilačního systému pro vytvoření podtlaku
TL01SP	Společné sání ventilačního systému
GA201	Jímka sprchových vod

3.2. Model pro výpočty šíření jódu

Chemické a fyzikální procesy, kterým podléhají sloučeniny jódu, probíhají v COCOSYS v tzv. kompartmentech – virtualizovaných výpočetních objemech. Objemy mohou reprezentovat jednotlivé termohydraulické nody, v případě blízkých či téměř totožných termohydraulických podmínek nody mohou být sloučeny do jednoho většího kompartmentu. Každý kompartment je charakterizován jednotlivými zónami, geometrickými faktory, typy povrchů apod.

Pro simulaci šíření jódu bylo potřeba provést nodalizaci s ohledem na modelovanou geometrii termohydraulického modelu. Na Obr. 12 je představena výsledná separátní nodalizace pro

výpočet šíření jódu během zkoumané události. Červeně jsou vyznačeny kompartmenty obsažené v hermetické zóně, zeleně okolí elektrárny. [28]



Obr. 12: Separatní nodalizace pro výpočty šíření jódu [28]

3.3. Únik štěpných produktů do kontejnmentu

Prasknutí primárního potrubí vede k uvolnění chladiva a štěpných produktů do volného objemu kontejnmentu. V rámci výše popsaného modelu štěpné produkty a chladivo unikají do boxu parogenerátoru, konkrétně do zóny SGBOX-1.

Zdrojový člen se může značně lišit v závislosti na uvažovaném poškození palivových kazet a jejich povlaku. Pro typ nehod zkoumaných v této práci je uvažováno pouze poškození pokrytí palivových proutků a únik štěpných produktů z mezery palivo pokrytí. Jiné poškození paliva, jako je například natavení, není uvažováno. Shrnutí uvažovaných štěpných produktů a podíl hmoty uvolněné z mezery palivo pokrytí do prostoru kontejnmentu obsahuje Tab. 6. V případě vzácných plynů, halogenů a alkalických kovů je tento podíl roven 5 %. [14]

Tab. 6: Stručný přehled vybraných chemických prvků uvažovaných při haváriích v lehkovodních reaktorech [14]

Skupina	Prvky	Frakce uvolněná během fáze úniku z mezery poškozeného palivového pokrytí
Vzácné plyny	Xe, Kr	0,05
Halogeny	I, Br	0,05
Alkalické kovy	Cs, Rb	0,05

Uvažované štěpné produkty se nachází v plynném stavu a uvolňují se z mezery palivo-pokrytí do prostoru kontejnmentu. Jejich množství tvoří 5 % od celkového inventáře jódu v aktivní zóně. U úniku jódu dále rozlišujeme jeho chemické složení, přičemž CsI tvoří 95 % uniklého množství, I₂ 4,85 % a CH₃I 0,15 %. CsI se uvolňuje ve formě aerosolu, I₂ a CH₃I jsou volatilními sloučeninami v plynném stavu.

Přesný okamžik uvolnění štěpných produktů a doba trvání fáze úniku z mezery palivo pokrytí jsou pro studovaný typ havárií pevně dany zprávou NRC [14]. Havárie začíná v čase $t = 0$ s, uvolnění štěpných produktů začíná po 30 s (v čase $t = 30$ s) a trvá 1 770 s (do času $t = 1 800$ s).

3.4. Počáteční a okrajové podmínky výpočtů

Příprava vstupních dat zahrnuje nejen samotný výběr vhodných počátečních a okrajových podmínek, ale také jejich pravděpodobnostní rozsah. Všechny počáteční a okrajové podmínky uvedené v Příloze v Tab. 11 byly voleny s maximálně možnou realističností a pocházejí ze skutečných měření, okrajové hodnoty byly stanoveny inženýrským odhadem.

Výpočty byly provedeny pro LB LOCA na jaderné elektrárně Temelín s tlakovodními reaktory VVER-1000 typu V-320. Vnější počáteční a okrajové podmínky tedy zahrnují teplotu vzduchu, absolutní atmosférický tlak a relativní vlhkost vzduchu v okolí ETE. Potřebná data o počasí v okolí ETE byla převzata z webu českého hydrometeorologického ústavu [29].

Jelikož kontejnment je trvale udržován na mírném podtlaku 150 Pa, hodnota tlaku uvnitř ochranné obálky je přímo závislá na vnějším atmosférickém tlaku v lokalitě Temelín. S ohledem na data ČHMÚ hodnoty tlaku uvnitř kontejnmentu se pohybují v rozmezí 91,6 až 98,6 kPa, BE odhad byl 97,1 kPa. Pro výpočty platí úvaha, že počáteční tlak uvnitř celého objemu kontejnmentu je stejný. [11], [29]

Teplota okolí kontejnmentu je další variovanou počáteční a okrajovou podmínkou, jejíž hodnoty pro Jihočeský kraj leží v rozsahu -33,3 až 36,8 °C [29]. Pro výpočet byl však volen interval 0 až 36,8 °C, jelikož výpočetní kód COCOSYS neumožňuje práci se zápornými hodnotami. BE hodnotou je brána průměrná teplota pro lokalitu Temelín, která činí 10,1 °C [30]. V úvahu byla také vzata relativní vlhkost vzduchu v rozsahu 26 – 99,9 % (stanovení hodnoty relativní vlhkosti přesně na 100 % vedlo dle předešlých zkušeností s programem COCOSYS ke vzniku numerických chyb během provedení výpočtů, a tak byla horní mez vlhkosti vzduchu posunuta na hodnotu 99,9 %). BE hodnota vlhkosti činila 76,7 %. [29]

Dalším úkolem bylo určení hodnot teploty a relativní vlhkosti vzduchu uvnitř kontejnmentu. Hodnoty byly stanoveny pro každou jednotlivou místnost uvnitř hermetické zóny kontejnmentu. Rozsah teplot vzduchu byl stanoven na 15–60 °C, rozsah hodnot vlhkosti na 10–90 % [28]. Bylo potřeba také zohlednit vliv dávkového příkonu na zkoumaný zdrojový člen. Dostupné údaje o dávkovém příkonu zahrnovaly pouze horní mez rozsahu, a tak byla nejnižší hodnota dávkového příkonu stanovena na 0 kGy/h [31]. Do seznamu počátečních a okrajových podmínek byla také zahrnuta data [7] o úhlu rozstříku kapaliny ze sprchových trysek a velikosti rozstříkovaných kapek. Poslední uvažovanou podmínkou bylo pH kapalin v jímkách kontejnmentu. Rozsah hodnot pH byl stanoven na základě interních provozních údajů poskytnutých ETE [32], [33] na hodnoty 5,0 – 9,0. BE hodnota byla stanovena jako průměr minima a maxima na hodnotu 7,0. Hodnota pH byla uvažována konstantní po celou dobu výpočtu.

Jelikož všechny místnosti uvnitř hermetické zóny jsou provázány, počáteční a okrajové podmínky uvnitř jednotlivých zón nelze považovat za nezávislé. Je tedy potřeba zohlednit vzájemnou vazbu počátečních a okrajových podmínek uvnitř jednotlivých zón, a to vazbu pozitivní nebo negativní. Ve všech případech se jednalo o pozitivní vazbu, tj. zvýšení teploty uvnitř jedné zóny doprovázelo zvýšení teploty v připojené zóně.

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, u zkoumaného zdrojového členu rozlišujeme i jeho chemické složení, přičemž CsI tvoří 95 %, I₂ 4,85 % a CH₃I 0,15 % celkového množství jódu uvolněného z mezery palivo pokrytí. Práce v programu SUSANA však předpokládala určitá omezení, a tak nebylo možné plynule měnit složení zdrojového členu tak, aby chemické formy CsI, I₂ a CH₃I byly zastoupeny ve výše uvedeném poměru v každém vygenerovaném vstupním souboru. Proto uvedené zastoupení forem bylo využito pouze pro referenční BE výpočet. Při tvorbě vstupních souborů za účelem následné BE analýzy byla vždy vybrána pouze jedna

sloučenina ze tří uvedených, přičemž se vždy uvažoval únik 100 % vybrané chemické formy jódu. Výběr sloučeniny pro každý vstupní soubor byl proveden programem SUSANA, stejně jako i v případech výběrů ostatních veličin, náhodně s ohledem na definované pravděpodobnostní rozdělení.

4. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

Vytvořené vstupní soubory obsahující vygenerované hodnoty počátečních a okrajových podmínek byly dávkově zpracovány výpočetním kódem COCOSYS. Navazující vyhodnocení, které bylo potřeba provést pomocí dvoustranné toleranční meze s limity 0,95 vyžadovalo provedení minimálně 93 výpočtů, ale vzhledem k možnosti výskytu numerických chyb a následnému možnému nedokončení chybných výpočtů bylo vytvořeno 100 vstupních souborů. Všechny vstupní soubory byly založeny na jednom vzoru, lišily se pouze hodnoty počátečních a okrajových podmínek vygenerované programem SUSA.

Všechny výpočty proběhly správně a do konce, nicméně pro účely bezpečnostních analýz stačilo vyhodnotit 93 výpočtů z provedených 100. Kromě uvedených neurčitostních a citlivostních analýz uskutečněných pomocí softwaru SUSA bylo nutné provést i referenční BE výpočet, který zakládal na BE hodnotách všech uvažovaných počátečních a okrajových podmínek. Kapitola 4.1 je věnována pouze BE výpočtu, konkrétně jeho termohydraulickým podmínkám, distribuci jódu v hermetické zóně a úniku jódu do okolí kontejnmentu. Kapitoly 4.2.1 a 4.2.2 se zabývají neurčitostní a citlivostní analýzou sady 93 výpočtů.

Výpočty v programu COCOSYS byly provedeny pro prvních 10 000 sekund havárie. Únik jódu do kontejnmentu začal v čase $t = 30$ s po iniciační události a byl ukončen v čase $t = 1\,800$ s, přičemž vždy probíhal konstantní rychlostí. Uvedený časový interval se ukázal jako dostačující z pohledu chování úniku jódu do životního prostředí.

4.1. Referenční BE výpočet

Hlavní vyhodnocovanou veličinou byla frakce jódu uvolněného z kontejnmentu vztažená na počáteční inventář, která byla označena jako w a byla vždy vyjádřena v hmotnostních procentech [%]. Okolí elektrárny v modelu COCOSYS je reprezentováno zónou ENVIRON a jodovým kompartmentem IENVI. V případě referenčního BE výpočtu se vycházelo ze zprávy NRC [14], tj. uvolněná látka obsahovala všechny 3 speciace, přičemž CsI tvořil 95 % uniklého množství, I₂ 4,85 % a CH₃I 0,15 %. Je potřeba zdůraznit, že I⁻ v této kapitole značí jód, který je součástí CsI, do výpočtu hmotnostních procent se tedy nezapočítává hmotnost cesia, ale pouze jódu ve formě jodidu.

Pozornost byla věnována i transportu jódu uvnitř kontejnmentu, která byla provedena v šesti časových krocích, přičemž v každém kroku byla provedena grafická reprezentace množství jódu v jednotlivých kompartmentech.

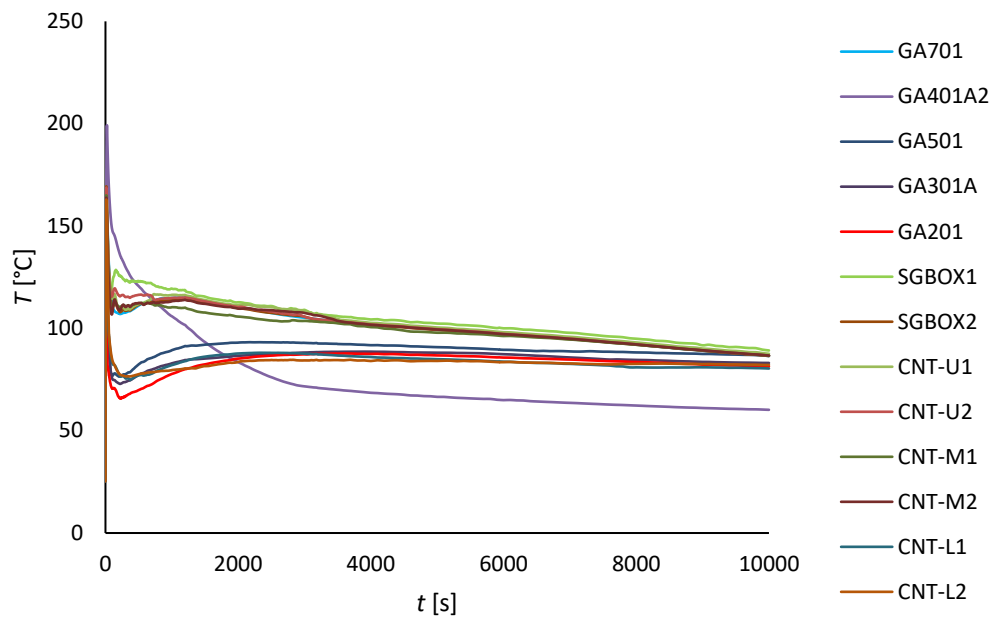
Kromě úniku a distribuce jódu byly také vyhodnoceny vybrané termohydraulické veličiny, konkrétně teplota, tlak a relativní vlhkost vzduchu uvnitř kontejnmentu, a činnost sprchových systémů. Změny těchto veličin byly sledovány pro vybrané zóny po dobu 10 000 s a následně vyneseny do grafů. Pozornost byla také věnována časovým úsekům, ve kterých docházelo k výrazným změnám sledovaných veličin.

4.1.1. Analýza termohydraulických podmínek

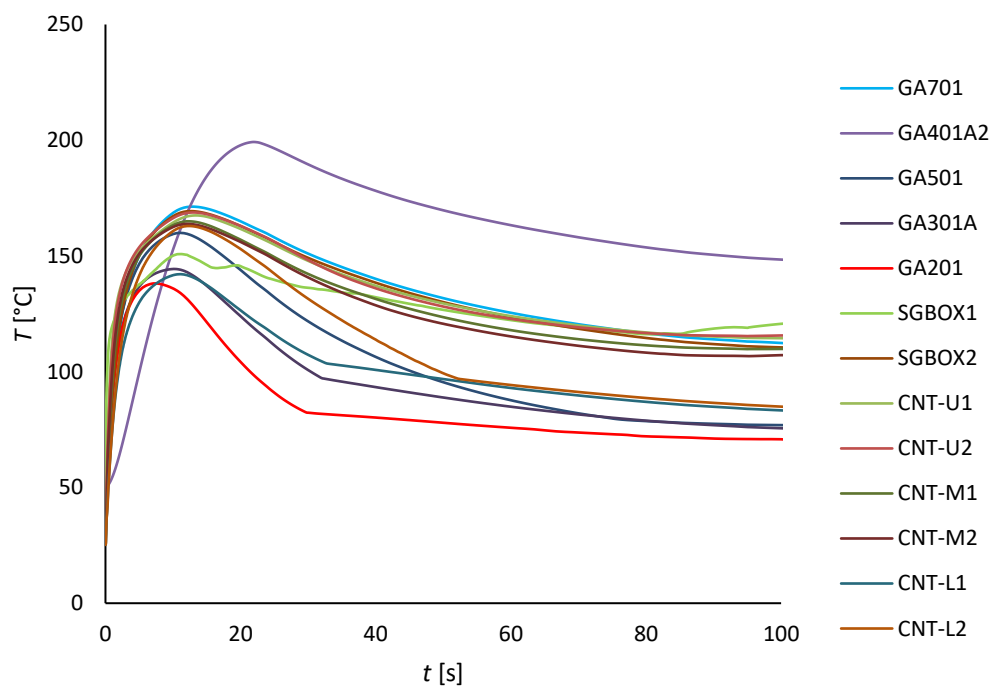
První vyhodnocovanou veličinou byla teplota vzduchu (T , [°C]), jejíž časový průběh lze vidět na Obr. 13 a Obr. 14. Ze začátku došlo k prudkému nárůstu teploty, a to ve všech vyhodnocovaných zónách. Poté následoval prudký pokles teploty v důsledku kondenzace parovzdušné směsi na vnitřních površích kontejnmentu a v celém objemu a také díky zapojení sprchového systému. Následně, během prvních 1000 sekund od začátku výpočtu docházelo k dalšímu výraznému kolísání teploty v téměř všech zónách. Průběh teploty se ustálil přibližně po 1500 s a stabilně klesal až do konce výpočtu.

Na Obr. 14, který popisuje průběh teploty do 100 sekund výpočtu lze vidět, že maximální teplota 199,2 °C byla dosažena v zóně GA401A2 reprezentující bazén vyhořelého paliva, nicméně k dosažení maximální hodnoty v GA401A2 došlo o 10 sekund později než v jiných zónách. V dominantním objemu kontejnmentu, reaktorovém sále (GA701), bylo maximum odpovídající hodnotě 171,3 °C dosaženo v čase 12,6 s.

Nejnižší maximální hodnota teploty v čase 12,6 s byla dosažena v jímce sprchových vod (GA201), kde jsou termohydraulické podmínky silně ovlivněny přítomností velkého množství vody, se rovnala 129,7 °C, rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou teploty činil více než 40 °C. Tato skutečnost koresponduje s prací [11], v níž bylo zkoumáno chování kontejnmentu v návaznosti na LOCA havárii. Výsledky práce [11] byly stručně popsány v kapitole 2.1.5.



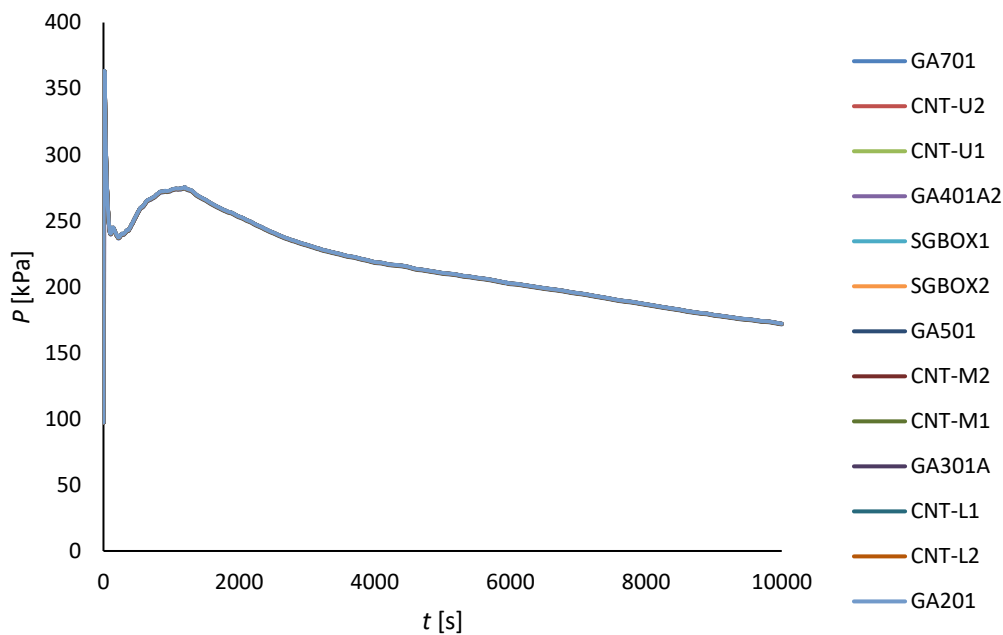
Obr. 13: BE výpočet teploty vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s)



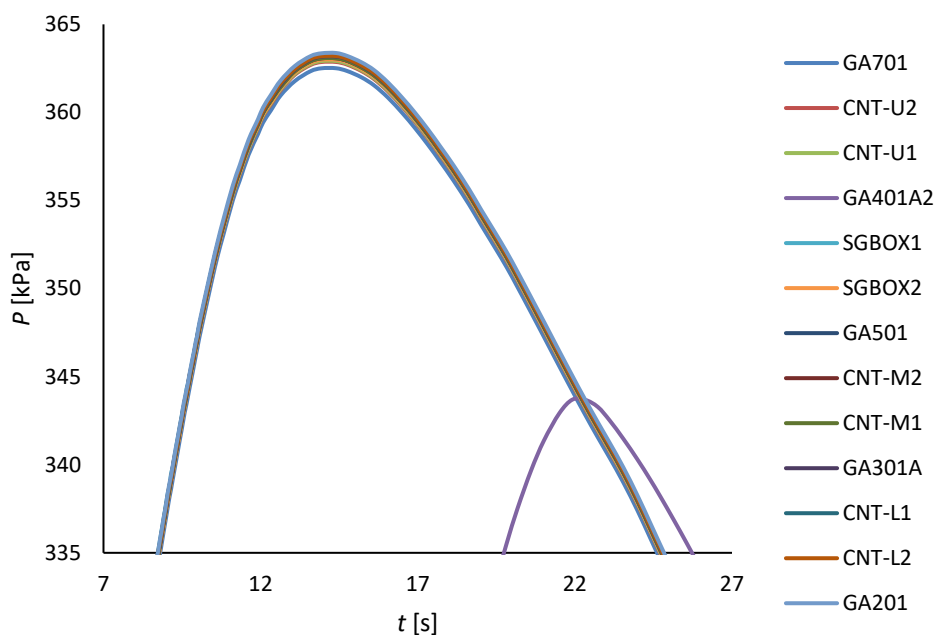
Obr. 14: BE výpočet teploty vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 100 s, dosažení maximálních hodnot)

Obr. 15 a Obr. 16 znázorňují průběh tlaku (P , [kPa]) v kontejnmentu. Počátečnímu tlaku odpovídá BE hodnota přibližně rovná 97 kPa. Stejně jako v případě teploty, k velmi prudkému nárustu tlaku došlo hned po iniciační události. Hodnoty tlaku dosáhly maxima s mírným zpožděním oproti maximálním hodnotám teplot, konkrétně v čase 14,8 s, přičemž díky dobrému propojení zón, rozdíl mezi hodnotami tlaku v jednotlivých místnostech nepřesahoval 2 kPa. Maximální hodnoty v čase 14,8 s se pohybovaly v rozmezí 362 až 364 kPa. I zde lze pozorovat stejný efekt jako v případě teploty, a to opožděné dosažení maxima v místnosti GA401A2. Na Obr. 16 lze vidět, že maximální tlak byl v GA401A2 dosažen s téměř desetisekundovým zpožděním. Na rozdíl od teploty v GA401A2, která byla vyšší než teplota v ostatních zónách, přetlak byl přibližně o 20 kPa nižší a činil 343 kPa.

Po dosažení maxima následoval prudký pokles, který se zastavil přibližně po 100 sekundách od začátku výpočtu. Následoval další nárůst tlaku, který není tak výrazný jako první, viz Obr. 15. Po dosažení druhého maxima 275 kPa v čase 1 200 s tlak klesal stabilně až do konce výpočtu.

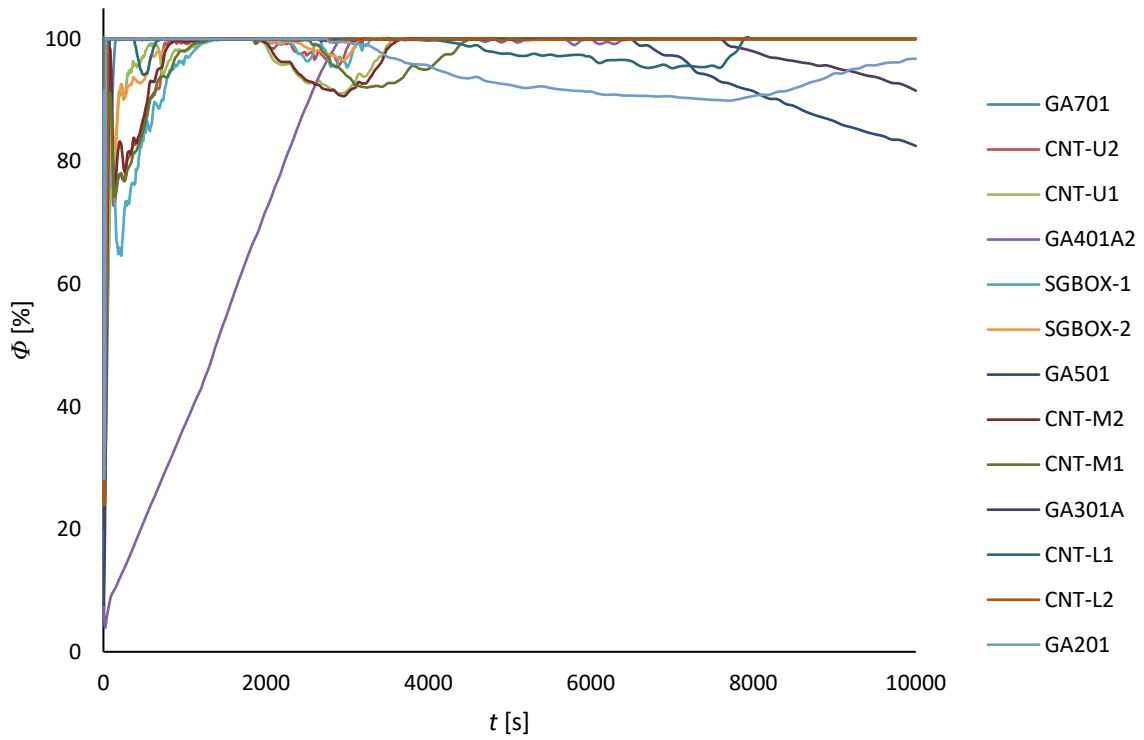


Obr. 15: BE výpočet tlaku v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s)

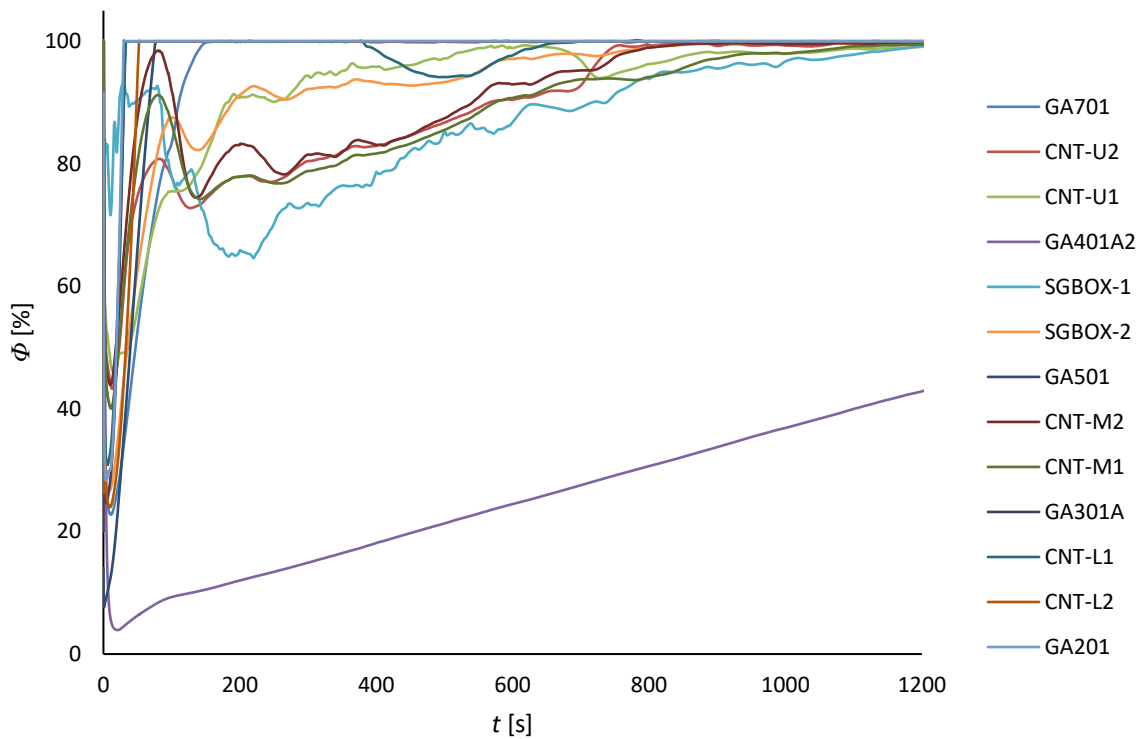


Obr. 16: BE výpočet tlaku v jednotlivých zónách (12 – 17 s, dosažení maximálních hodnot)

Další zkoumanou veličinou je relativní vlhkost vzduchu (Φ , [%]). Závislost hodnot vlhkosti v jednotlivých místnostech na čase lze pozorovat na Obr. 17, lepší přehled prvních 1200 sekund výpočtu poskytuje Obr. 18. V prvních 10 sekundách po iniciační události došlo k prudkému poklesu vlhkosti vzduchu, následně vlhkost začala velmi strmě růst, a to ve všech zónách, kromě GA401A2. Po nárůstu hodnot vlhkosti došlo k dalšímu poklesu, který však byl méně výrazný. K nejvýraznějšímu počátečnímu poklesu došlo právě v GA401A2 v čase 21,0 s, vlhkost vzduchu v tomto okamžiku klesla až na 3,93 %, následně začala pomalu růst až na maximum 100 % v čase 3291,5 s. Vlhkost vzduchu v zóně SGBOX-1 reprezentující parogenerátor byla jednou z nejvíce volatilních, pravděpodobně proto, že právě v SGBOX-1 došlo k prasknutí potrubí. Po ustálení vlhkosti v čase 1 400 s následovaly další výkyvy, které však nepřesahovaly hodnotu 10 %. Na konci výpočtu se hodnoty vlhkosti vzduchu ustálily na 100 % téměř ve všech místnostech. Výjimku tvořily jímka sprchových vod GA201 a šachta reaktoru (dolní část GA301A a horní část GA501). Vlhkost vzduchu se ustálila na maximální hladině téměř ve všech zónách bez ohledu na počáteční hodnotu.

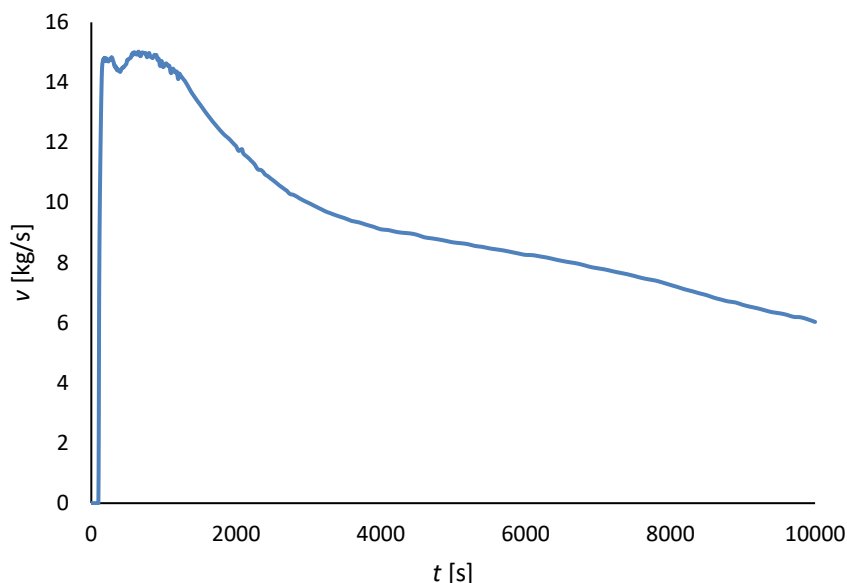


Obr. 17: BE výpočet relativní vlhkosti vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 10 000 s)



Obr. 18: BE výpočet relativní vlhkosti vzduchu v jednotlivých zónách (0 – 1200 s)

Pro vyhodnocení činnosti sprchových systémů byla zkoumána rychlost kondenzace páry v , která byla vyjádřena v jednotkách kg/s. Průběh rychlosti kondenzace páry v reaktorovém sále GA701 lze sledovat na Obr. 19. Sprchové systémy byly zapojeny v čase $t = 100$ s, což na Obr. 19 doprovází velmi prudký nárůst v na hodnotu 14,8 kg/s. Maximální hodnota 15,0 kg/s byla dosažena v čase 593,0 s, po čemž následoval plynulý pokles. Konečná hodnota rychlosti kondenzace se rovnala 6,0 kg/s.



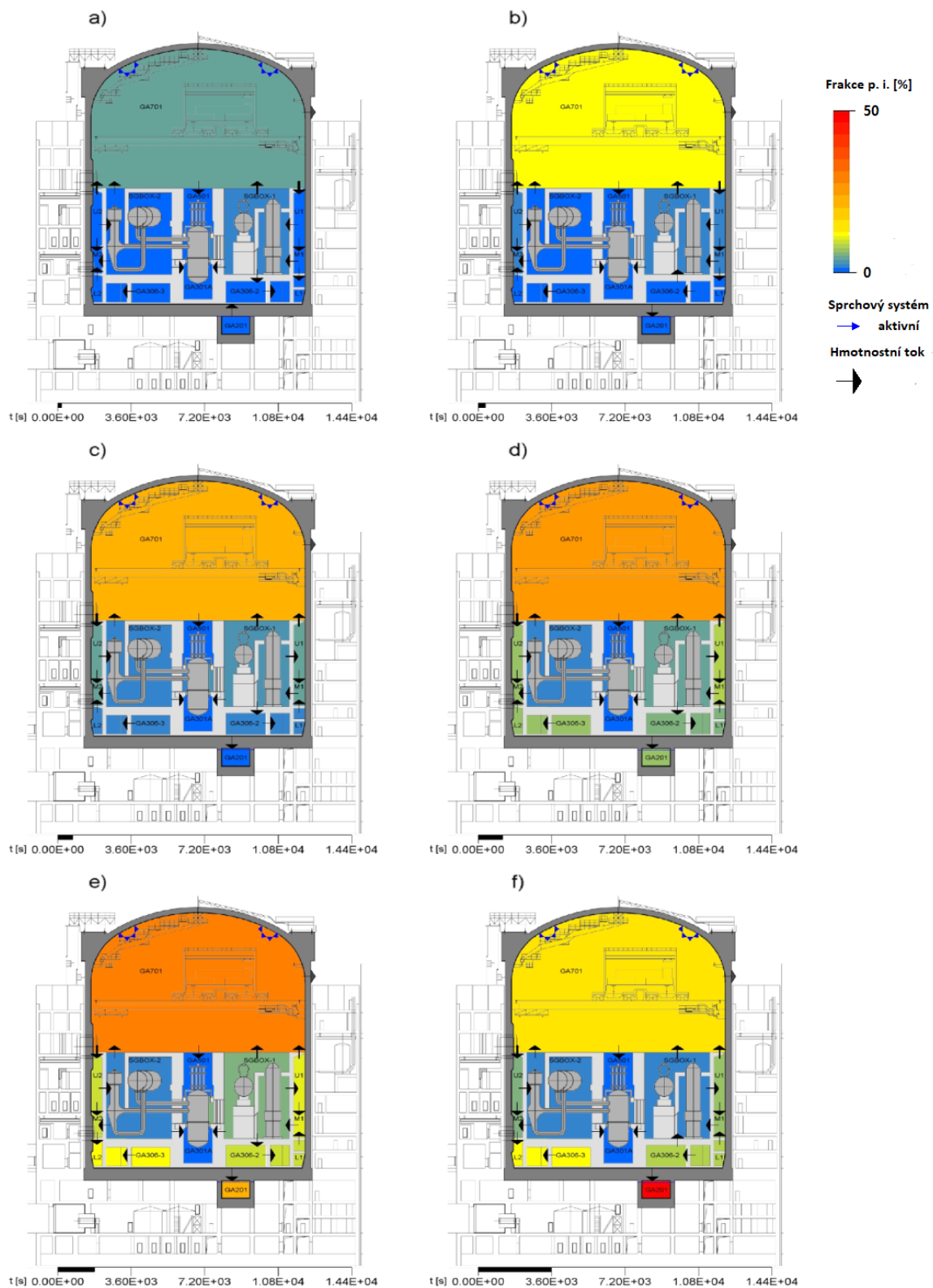
Obr. 19: BE výpočet rychlosti kondenzace páry v zóně GA701

4.1.2. Transport jódu uvnitř kontejnmentu během zkoumané události

Vstřík sloučenin obsahujících jód byl spuštěn v čase 30 s od iniciační události v kompartmentu ISGBOX1 reprezentující box parogenerátoru a ukončen v čase 1 800 s. Z Obr. 20 lze získat představu, jak probíhala distribuce jódu uvnitř hermetického prostoru v čase. Obr. 20 reprezentuje transport jódu v 6 časových krocích, konkrétně 180 s, 360 s, 720 s, 1 200 s, 1 800 s a 3 600 s od iniciační události. Jednotlivé obrázky popisující stav kontejnmentu z hlediska distribuce jódu jsou uvedeny v abecedním pořadí, pod každým obrázkem se nachází časová osa t [s]. Frakce p.i. v legendě znamená frakci počátečního inventáře w [%], červená barva na barevné škále odpovídá 50 % a modrá barva 0 % počátečního inventáře.

Na Obr. 20a, který reprezentuje distribuci jódu v čase 180 s, je jód přítomen prakticky pouze v reaktorovém sále IGA701 a v menším množství v boxu parogenerátoru ISGBOX-1, kde dochází k samotnému úniku jódu. V čase 360 s (Obr. 20b) došlo v reaktorovém sále

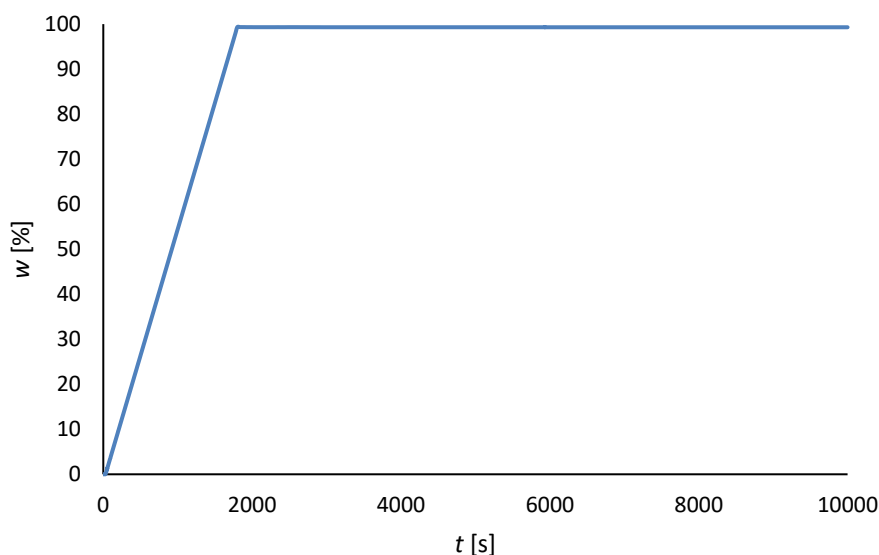
k nahromadění většího množství jódu (přibližně desetina počátečního inventáře), zároveň jód začal pronikat do střední částí kontejnmentu reprezentované kompartmenty ICNTM1 a ICNTM2. Na Obr. 20c reprezentující situaci v čase 720 s je jód přítomen prakticky v celé hermetické zóně s výjimkou šachty reaktoru (IGA501 a IGA301A) a jímky sprchových vod IGA201, v reaktorovém sále se již nacházela přibližně pětina až čtvrtina počátečního inventáře. V čase 1 200 s se již významněji projevuje vliv činnosti sprchových systémů a stékání kondenzátu obsahujícího jód (Obr. 20d) do jímky, která v tomto čase obsahovala přibližně desetinu počátečního inventáře. Klesající množství uniklé parovodní směsi v boxu parogenerátoru a stékání kondenzátu zapříčinil přítomnost jódu i v boxu parogenerátoru ISGBOX1. Únik jódu z aktivní zóny do kontejnmentu byl ukončen v čase 1 800 s (Obr. 20e), v tomto čase již došlo k značnému poklesu přetlaku a nahromadění ještě většího množství jódu v jímce vlivem sprchování a stékání kondenzátu. Jód byl přítomen téměř v celé hermetické zóně, reaktorový sál obsahoval přibližně čtvrtinu počátečního inventáře, nepatrně menší množství jódu se nacházelo v jímce. K poklesu množství jódu v hermetické zóně kontejnmentu došlo později, konkrétně na Obr. 20f, který znázorňuje distribuci jódu v čase 3 600 s. Transport jódu a většina termohydraulických procesů se již v této době stabilizovaly, tedy do konce výpočtu v čase 10 000 s nedocházelo k výrazným změnám. Na Obr. 20f lze vidět, že v čase 3 600 s jímka obsahovala polovinu počátečního inventáře. Přibližně 15 % počátečního inventáře se nacházelo v reaktorovém sále, pravděpodobně v důsledku přítomnosti velkého množství povrchů, na které se jód mohl sorbovat, a taktéž díky vzniku jímky na podlaze. Velké množství jódu se dostalo do spodní části kontejnmentu, která zahrnovala kompartmenty ICNTL1 a ICNTL2.



Obr. 20: Transport jódu uvnitř kontejnmentu (v abecedním pořadí: 180 s, 360 s, 720 s, 1 200 s, 1 800 s a 3 600 s od iniciační události)

4.1.3. Analýza zdrojového členu

Uvažované jódové sloučeniny (CsI , I_2 , CH_3I) byly vstříkovány do boxu parogenerátoru (zóna SGBOX-1) konstantní rychlostí v časovém úseku 30 – 1 800 s. Po ukončení vstříku se množství jódu přítomného v kontejnmentu prakticky nezměnilo, jelikož úniky jsou při těsném kontejnmentu minimální. Vše je ilustrováno na Obr. 21.



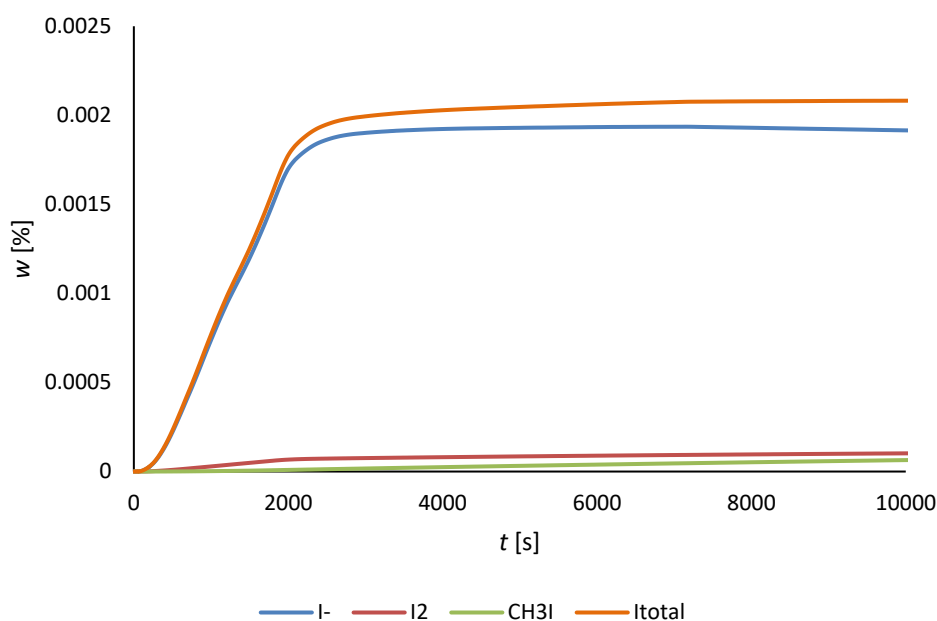
Obr. 21: Časový nárůst frakce jódu přítomné v kontejnmentu (% počátečního inventáře)

Výpočet byl založen na BE hodnotách uvedených v Tab. 11. Výsledky BE výpočtu jsou uvedeny na Obr. 22 a představují závislost frakce uvolněné látky vůči počátečnímu inventáři w [%] na čase t [s]. Do kompartmentu IENVI reprezentujícího okolí ENVIRON se v koncovém čase $t = 10\,000$ s uvolnilo $1,92 \cdot 10^{-3}$ % I^- , $1,02 \cdot 10^{-4}$ % I_2 a $6,43 \cdot 10^{-5}$ % CH_3I od původní celkové hmotnosti jódu v aktivní zóně. Celková frakce jódu uvolněného do okolí (na Obr. 22 je označeno I_{total}) v koncovém čase $t = 10\,000$ s činila $2,08 \cdot 10^{-3}$ %. Souhrn výsledných hodnot w týkajících se referenčního BE výpočtu je také uveden v Tab. 7.

Pomocí dat v Tab. 7 lze usoudit, že zastoupení I^- v celkovém úniku pokleslo na téměř 92 % z původních 95 %, což lze pozorovat i na Obr. 22. Zastoupení I_2 se prakticky nezměnilo. Největší změna byla zaznamenána v případě CH_3I , jeho zastoupení vzrostlo z 0,15 % na 3,09 %, čili více než dvacetkrát vůči původnímu zastoupení.

Tab. 7: Výsledné hodnoty w [%] odpovídající jednotlivým chemickým formám jódu

Speciace	Množství uniklého jódu w [%]	Původní zastoupení jednotlivých forem [%]	Konečné zastoupení jednotlivých forem [%]
I^-	$1,92 \cdot 10^{-3}$	95,00	91,98
I_2	$1,02 \cdot 10^{-4}$	4,85	4,93
CH_3I	$6,43 \cdot 10^{-5}$	0,15	3,09
I_{total}	$2,08 \cdot 10^{-3}$	100	100



Obr. 22: BE výpočet frakce jódu uvolněné do okolí ETE (% počátečního inventáře)

Na Obr. 22 lze vidět pomalý pokles křivky reprezentující I^- , což znamená, že s velkou pravděpodobností docházelo ke změně chemické formy. Množství I_2 a CH_3I v zóně ENVIRON narůstalo pomalým tempem. Je zajímavé, že konečné zastoupení CH_3I v zóně ENVIRON je mnohem vyšší než počáteční zastoupení, zároveň se téměř nezměnila frakce I_2 . Je tedy zřejmé, že CH_3I uniká z kontejnmentu v mnohem větší míře než jiné zkoumané speciace jódu, pravděpodobně díky své volatilitě. Tento poznatek podporují i dřívější měření po nehodě na TMI [34]. Mírnější únik molekulárního I_2 , který je rovněž volatilní sloučeninou, mohla způsobit například jeho adsorpce na površích uvnitř kontejnmentu. Problematika adsorpce a desorpce molekulárního I_2 byla zkoumána v práci [26], přičemž pro uvedenou studii byl rovněž použit výpočetní program COCOSYS.

4.2. Citlivostní a neurčitostní analýza

Tato kapitola je věnována hlavnímu cíli této diplomové práce – neurčitostní a citlivostní analýze provedené v rámci metodiky BEPU. Metodika byla aplikována na sadu 93 výpočtů, kterou bylo potřeba vyhodnotit pro dosažení 95% pravděpodobnosti pokrytí oblasti neurčitosti 95 % hodnot počátečních a okrajových podmínek.

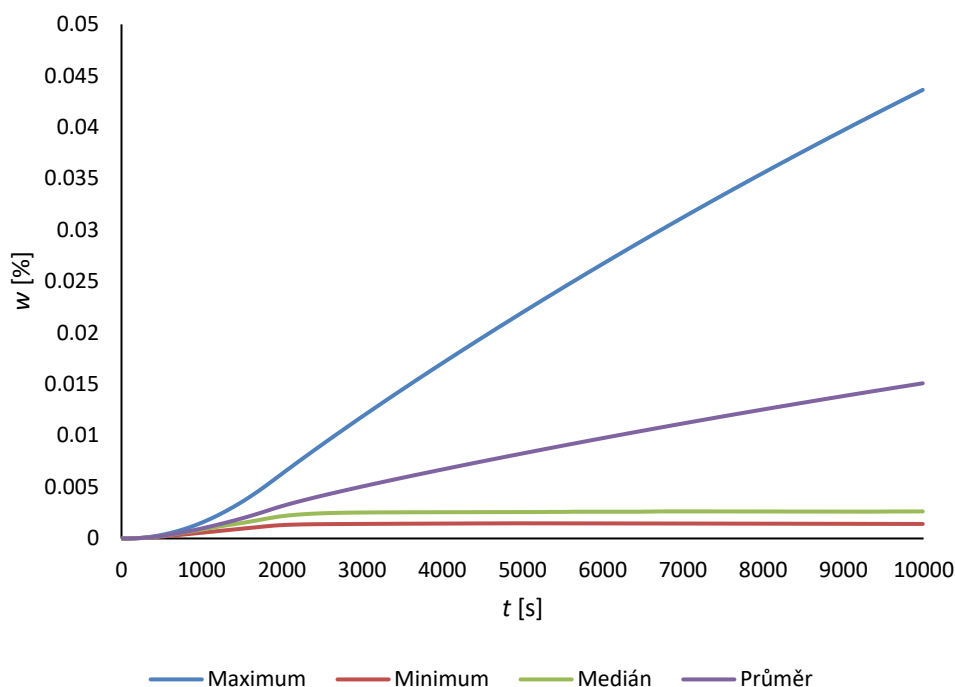
4.2.1. Neurčitostní analýza

Analýza neurčitostí vstupních počátečních a okrajových podmínek byla provedena pomocí programu SUSIA. Vyhodnocovanou veličinou je, jako v případě BE výpočtu, frakce uniklého jódu vůči počátečnímu inventáři w [%] v čase t , konkrétně 10 000 s od iniciační události.

Výsledky neurčitostní analýzy jsou představeny a na Obr. 23 a zakládají na výsledcích 93 vyhodnocených výpočtů. Vyhodnocení zahrnuje maximum, minimum, medián a průměr frakce počátečního inventáře w uvolněné do zóny ENVIRON reprezentující životní prostředí v okolí elektrárny. Tab. 8 obsahuje hodnoty w v okamžiku ukončení výpočtů.

Tab. 8: Výsledné hodnoty odpovídající maximu, minimu, mediánu a průměru vyhodnocované frakce w

	Koncová hodnota w [%]
Maximum	0,0436
Minimum	0,0014
Medián	0,0026
Průměr	0,0151



Obr. 23: Neurčitostní analýza frakce jódu uvolněné do okolí ETE (% počátečního inventáře)

Provedená analýza poukázala na poměrně velký rozptyl konečných hodnot w . Z vyhodnocení na Obr. 23 plyne, že maximální uvolněná frakce byla 0,0436 %. Minimální uvolněná frakce činila 0,0014 %, což znamená více než 20tinásobný rozdíl mezi maximální a minimální uvolněnou frakcí. Pravděpodobným důvodem takto velkého rozptylu konečných hodnot je velký rozsah volených počátečních a okrajových podmínek. Dle provedeného vyhodnocení nelze říct, jaký vliv měla například činnost sprchových systémů, adsorpce uvnitř kontejnmentu, transport volatilních forem mezi kapalnou a plynnou fází v kontejnmentu a další faktory, z čehož plyne nutnost navazujícího podrobného zkoumání v rámci citlivostní analýzy.

4.2.2. Citlivostní analýza

Analýza citlivosti množství uniklého jódu do okolí elektrárny na zkoumané počáteční a okrajové podmínky byla rovněž provedena pomocí výpočetního kódu SUSA a vycházela ze stejných předpokladů jako neurčitostní analýza. Citlivostní analýza spočívala ve výpočtu hodnot Spearmanova korelačního koeficientu pro vybrané počáteční a okrajové podmínky a množství jódu uvolněného do zóny ENVIRON. Největší význam pro výsledky analýzy mají koncové hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu, tedy hodnoty v čase $t = 10\,000$ s. Pokud koncová hodnota r je větší než absolutní hodnota kritické hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu $|r_{\text{krit}}| = 0,204$, lze předpokládat, že vyhodnocovaná podmínka může mít

vliv na velikost konečného zdrojového členu. Pokud jsou hodnoty nižší, tak se předpokládá, že uvažovaná podmínka nemá vliv na zkoumanou veličinu. Více o této metodě je uvedeno v kapitole 2.3.3

Během analýzy bylo zjištěno, že časový průběh a koncové hodnoty r jsou stejné pro všechny podmínky zastupující teplotu vzduchu v různých místnostech kontejnmentu, což zjednodušilo vyhodnocení citlivosti úniku jódu vůči všem podmínkám reprezentujícím teplotu. Stačilo vyhodnotit vliv pouze jedné podmínky. Pro vyhodnocení citlivosti zdrojového členu vůči teplotě vzduchu a vody v kontejnmentu byla vybrána podmínka č. 5, která představovala teplotu vzduchu v majoritním objemu GA701 (reaktorový sál). Totéž platilo pro relativní vlhkost vzduchu, dávkový příkon ve vzduchu a dávkový příkon ve vodě.

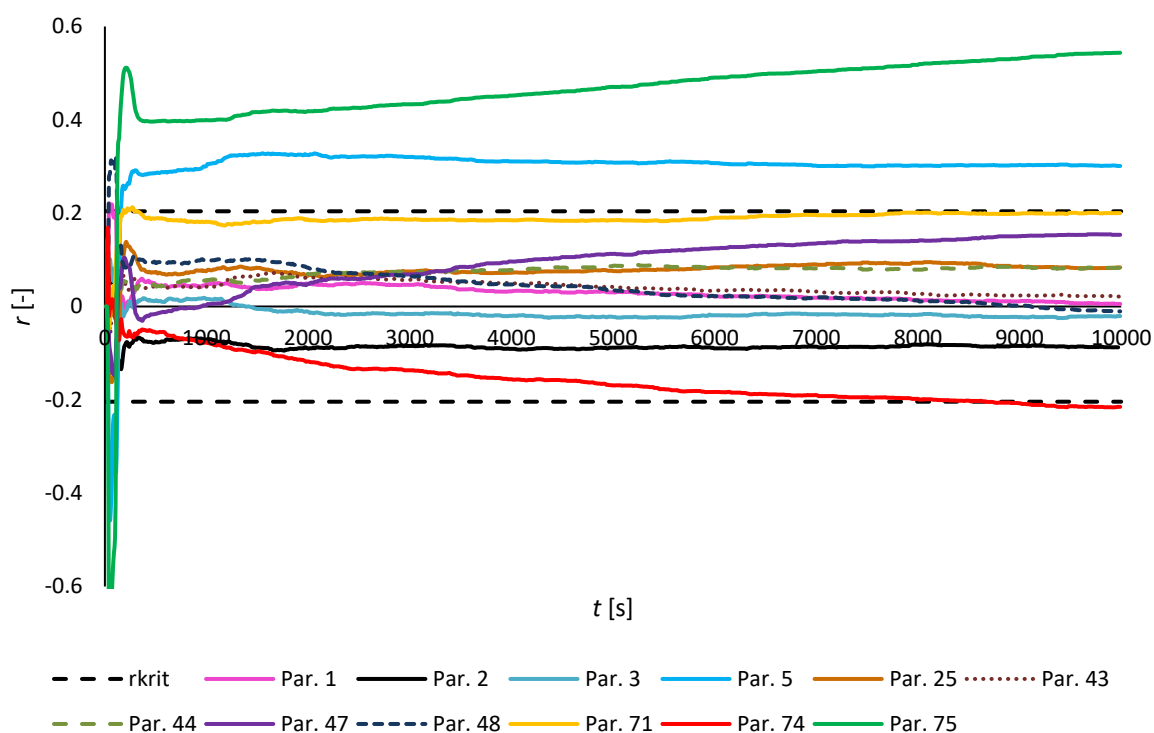
Ze 75 uvažovaných počátečních a okrajových podmínek (Tab. 11) bylo vyhodnoceno 12 podmínek. Jejich seznam je uveden v Tab. 9. Jak již bylo zmíněno výše, sloučenina jódu byla pro každý vstupní soubor vybrána náhodně. Tento výběr v Tab. 9 představuje podmínka č. 75. Této podmínce byly přiřazeny hodnoty typu INTEGER v rozmezí 1 až 3 v závislosti na tom, jakou sloučeninu vybere program SUSA pro každý konkrétní vstupní soubor. Hodnota 1 odpovídá CsI, hodnota 2 I₂, hodnota 3 CH₃I. V případě předpokládaného uvolnění velkého obsahu počátečního inventáře ve formě CH₃I, které vychází z předešlých výpočtů, lze očekávat pozitivní vazbu podmínky 75 s vyhodnocovaným zdrojovým členem.

Tab. 9: Počáteční a okrajové podmínky zkoumané v rámci citlivostní analýzy úniku jódu

Číslo podmínky	Popis	Číslo podmínky	Popis
1	Venkovní tlak	44	Úhel rozstříku trysek
2	Venkovní teplota	47	Průměr kapiček sprch. systému
3	Venkovní vlhkost vzduchu	48	Dávkový příkon ve vzduchu v GA701
5	Teplota vzduchu v GA701	71	Dávkový příkon ve vodě v GA201
25	Vlhkost vzduchu v GA701	74	pH vody v GA201
43	Objem GA201	75	Počáteční speciace jódu

Časový průběh koeficientů r pro všechny uvažované počáteční a okrajové podmínky je uveden na Obr. 24. Černá přerušovaná čára značí kritickou hodnotu Spearmanova korelačního koeficientu, pod níž nelze uvažovat vliv zkoumané podmínky na velikost zdrojového členu. Na

Obr. 24 je rovněž uveden seznam všech uvažovaných počátečních a okrajových podmínek (par. 1 – 75) z Tab. 9.



Obr. 24: Časový průběh Spearmanova korelačního koeficientu reprezentující vliv vybraných počátečních a okrajových podmínek na zdrojový člen

Pro zde řešenou citlivostní analýzu jsou podstatné hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu v koncovém okamžiku simulace. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10. Počáteční a okrajové podmínky, které překročily kritickou hodnotu koeficientu a mohou být důležité z hlediska úniku jódu jsou označeny v Tab. 10 ve sloupci Významnost.

Tab. 10: Hodnoty Spearmanova koeficientu v čase $t = 10\,000\text{ s}$

Číslo podmínky	Popis podmínky	Hodnota r v koncovém bodě [-]	Významnost
1	Venkovní tlak	0,005	Ne
2	Venkovní teplota	-0,087	Ne
3	Venkovní vlhkost vzduchu	-0,021	Ne
5	Teplota vzduchu v GA701	0,301	Ano
25	Vlhkost vzduchu v GA701	0,084	Ne
43	Objem GA201	0,021	Ne
44	Úhel rozstříku trysek	0,083	Ne

Číslo podmínky	Popis podmínky	Hodnota r v koncovém bodě [-]	Významnost
47	Průměr kapiček sprch. systému	0,154	Ne
48	Dávkový příkon ve vzduchu v GA701	-0,010	Ne
71	Dávkový příkon ve vodě v GA201	0,200	Ne
74	pH vody v GA201	-0,215	Ano
75	Počáteční speciace jódu	0,544	Ano

Citlivostní analýza ukázala, že pouze 3 počáteční a okrajové podmínky vykazují možnou významnost z pohledu velikosti zdrojového členu. Konkrétně se jedná o počáteční teplotu vzduchu v kontejnmentu (par. 5), hodnotu pH kapaliny (par. 74) a formu výskytu jódu, která byla vstříkována do zóny SGBOX-1 (par. 75). V případě teploty vzduchu a speciace jódu koncová hodnota r je kladná, což svědčí o pozitivní vazbě velikosti zdrojového členu na tyto podmínky. Vyšší teplota uvnitř kontejnmentu tedy vede k uvolnění většího množství jódu do okolí. Nejvyšší hodnota par. 75 odpovídá sloučenině CH_3I , což potvrzuje předpoklad již zmíněný dříve: CH_3I je velmi volatilní forma výskytu jódu, právě ona nejvíce uniká z kontejnmentu. Jiné uvažované speciace jódu se mohou uvolňovat do okolí v menší míře díky adsorpci molekulárního I_2 na barvené povrchy uvnitř kontejnmentu, v případě aerosolu CsI mohlo docházet k jeho vymytí do jímky v důsledku činnosti sprchového systému. V případě pH záporná koncová hodnota r vypovídá o negativní vazbě na tuto podmínku, tedy s klesajícím pH bude docházet k vyššímu úniku jódu do životního prostředí. Tento efekt byl pozorován například u experimentu RTF (Radioiodine Test Facility, zařízení pro provedení experimentů zkoumajících chování jódu v podmínkách radiační události). Podrobný popis experimentu lze najít v práci [35].

V případě průměru kapek sprchy (par. 47) a dávkového příkonu ve vodě (par. 71) se hodnota koeficientu stabilně blíží ke kladné hodnotě r_{krit} , nicméně v koncovém bodě ji nedosahuje. V obou případech se jedná o pozitivní vazbu, tj. s rostoucí velikostí kapek a hodnotou dávkového příkonu roste také velikost zkoumaného zdrojového členu. V případě par. 47 lze usoudit, že kapky s větším průměrem absorbují aerosolové částice v menší míře, jelikož menší množství kapek s větším objemem má menší plochu pro interakci s aerosolem, a tak dochází k většímu úniku zkoumaných sloučenin. Ohledně dávkového příkonu ve vodě platí, že může ovlivňovat vznik molekulárního I_2 z rozpuštěného I^- [21]. Volatilní I_2 se poté může dostat do atmosféry kontejnmentu, a tak je možné, že by při simulaci delšího časového úseku hodnota

r charakterizující vliv dávkového příkonu ve vodě na velikost zdrojového členu dosáhla kritické hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu.

Z vyhodnocení plyne, že počasí v okolí kontejnmentu (par. 1 – 3: venkovní tlak, teplota a relativní vlhkost vzduchu) nemá vliv na množství jódu uvolněného do okolí kontejnmentu, rovněž jako relativní vlhkost vzduchu uvnitř kontejnmentu (par. 25), objem jímky GA201 (par. 43), úhel rozstříku trysek sprchového systému (par. 44) a dávkový příkon ve vzduchu (par. 48). Koncové hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu související s uvedenými počátečními a okrajovými podmínkami nedosáhly požadované hodnoty r_{krit} .

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla BE analýza úniku jódu z kontejnmentu ETE do životního prostředí. Teoretická část práce je věnována popisu elektrárny s reaktorem VVER-1000/V-320 s důrazem na LOCA havárie, bezpečnostní systémy a jód jako součást zdrojového členu. Součástí práce je rešerše koncepce bezpečnostních analýz, popis metodiky BEPU a programů COCOSYS a SUSANA použitých pro provedení analýzy a vyhodnocení výsledků.

Určení zdrojového členu patří mezi nejzásadnější úkoly, které jsou řešeny v rámci řetězce bezpečnostních analýz. Vyžaduje vhodná vstupní data, počítačové modelování uvažované události a vyhodnocení výsledků. V této práci byla analýza provedena pomocí metody BEPU, tj. metody nejlepšího odhadu s odhadem neurčitosti. Pro její provedení bylo nutné určit seznam počátečních a okrajových podmínek, které by teoreticky mohly být významné z hlediska výsledného zdrojového členu, stanovit jejich rozsah a BE hodnoty, vygenerovat sadu vstupních souborů obsahující náhodné hodnoty ze stanoveného rozsahu s ohledem na použité rozložení a zpracovat vstupní soubory. Vstupní data jako počáteční a okrajové podmínky havárie a jejich rozsah byly stanoveny s ohledem na reálná data z provozu ETE, nicméně část počátečních a okrajových podmínek, jako například činnost bezpečnostních systémů, byly uvažovány konzervativně. Pro statistické zpracování byla aplikována metoda GRS, s jejíž pomocí bylo stanoveno množství výpočtů potřebné pro dosažení 95% pravděpodobnosti pokrytí rozsahu mezi minimální a maximální hodnotou výběru 95 % hodnot uvažovaných počátečních a okrajových podmínek.

Analýza zdrojového členu byla provedena BEPU metodou, k čemuž byly použity výpočetní programy COCOSYS a SUSANA. Zpracování vstupních souborů bylo provedeno pomocí výpočetního kódu COCOSYS a zahrnovalo simulaci prvních 10 000 s po iniciační události. Po ukončení výpočtů následovalo vyhodnocení výsledků simulace, které bylo uskutečněno rovněž pomocí programu SUSANA a zahrnovalo vyhodnocení referenčního BE výpočtu a BE vyhodnocení sady souborů, které spočívalo v provedení analýzy neurčitostí vstupních počátečních a okrajových podmínek a analýzy citlivosti zdrojového členu na tyto podmínky. Vyhodnocovanou veličinou byla frakce počátečního inventáře (hmotnostní zlomek, který vyjadřoval poměr hmotnosti jódu uvolněného do ovzduší v okolí kontejnmentu k celkové hmotnosti jódu uvolněného z mezery palivo pokrytí v aktivní zóně reaktoru).

Analýza referenčního výpočtu, který byl založen pouze na BE hodnotách počátečních a okrajových podmínek, zahrnovala vyhodnocení termohydraulických veličin, časové distribuce

jódu uvnitř hermetické zóny kontejnmentu a úniku jódu do okolí elektrárny. K největším změnám docházelo na začátku simulované události, všechny vyhodnocované veličiny se po určité době v důsledku poklesu množství přehřáté parovzdušné směsi stabilizovaly. Polovina počátečního inventáře byla na konci výpočtu obsažena v jímce sprchových vod, zbylá část jódu uvolněného z mezery palivo pokrytí se na konci výpočtu nacházela v dolní části kontejnmentu a v reaktorovém sále. Do ovzduší v okolí kontejnmentu se uvolnilo pouze $2,08 \cdot 10^{-3}$ % počátečního inventáře, přičemž zastoupení CH_3I ve zdrojovém členu bylo téměř dvacetkrát vyšší, než byl jeho původní obsah. Zastoupení I_2 se prakticky nezměnilo a frakce I^- v konečném zdrojovém členu mírně poklesla v porovnání s počátečním obsahem I^- v kontejnmentu.

Neurčitostní analýza zahrnovala vyhodnocení minima, maxima, mediánu a průměru frakce počátečního inventáře jódu. Jelikož počáteční a okrajové podmínky byly voleny ve velkém rozsahu a velkém množství, výsledkem neurčitostní analýzy byl velký rozptyl konečných hodnot hmotnostního zlomku. S ohledem na provedenou citlivostní analýzu je potřeba provést podrobnější výzkum problematiky zdrojového členu založený na užším výběru počátečních a okrajových podmínek, což s velkou pravděpodobností bude předmětem budoucího bádání.

Citlivostní analýza provedená pomocí určení Spearmanova korelačního koeficientu poukázala na skutečnost, že největší významnost z hlediska zdrojového členu má počáteční teplota uvnitř hermetického prostoru, pH sprchové kapaliny a počáteční speciace jódu. Zároveň bylo zjištěno, že je potřeba věnovat větší pozornost velikosti kapek sprchového systému a dávkovému příkonu ve vodě uvnitř kontejnmentu, jelikož dle provedeného vyhodnocení lze stanovit, že může existovat souvislost těchto veličin s výsledným zdrojovým členem, nicméně by bylo potřeba zkoumat dlouhodobější průběh události. Tyto výsledky mohou být užitečné pro budoucí práce spojené s výzkumem zdrojového členu a radiačních následků nehod na jaderných elektrárnách.

PŘÍLOHY

Tab. 11: Seznam uvažovaných počátečních a okrajových podmínek včetně minimálních, maximálních a BE hodnot

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
	Min	Max				
1 Tlak ENVIRON	Min	92830	Pa	Gauss	[29]	-
	Max	99640				
	BE	97071				
2 Teplota vzduchu ENVIRON	Min	0,1	°C	Gauss	[29], [30]	-
	Max	36,8				
	BE	10,1				
3 Vlhkost vzduchu ENVIRON	Min	26	%	Gauss	[29]	-
	Max	99,9				
	BE	76,7				
4 Teplota vzduchu RBLDG	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	23				
5 Teplota vzduchu GA701	Min	15	°C	Gauss	[28]	-
	Max	60				
	BE	35				
6 Teplota vzduchu GA501	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	53				
7 Teplota vzduchu GA301A	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	40				
8 Teplota vzduchu GA401A2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	50				
9 Teplota vzduchu CNT-U1	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	29				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
	Min	Max				
10 Teplota vzduchu CNT-U2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	29				
11 Teplota vzduchu SGBOX-1	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	36				
12 Teplota vzduchu SGBOX-2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	36				
13 Teplota vzduchu CNT-L1	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	25				
14 Teplota vzduchu CNT-L2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	25				
15 Teplota vzduchu CNT-M1	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	26				
16 Teplota vzduchu CNT-M2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	26				
17 Teplota vzduchu GA311	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	37				
18 Teplota vzduchu GA306-1	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	28				
19 Teplota vzduchu GA306-2	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	24				
20 Teplota vzduchu GA306-3	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	28				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
21 Teplota vzduchu TL22P	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	35				
22 Teplota vzduchu TL01SP	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	25				
23 Teplota vzduchu GA201	Min	15	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	60				
	BE	57				
24 Vlhkost RBLDG	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	50				
25 Vlhkost GA701	Min	10	%	Gauss	[28]	-
	Max	90				
	BE	30				
26 Vlhkost GA501	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	14				
27 Vlhkost GA301A	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	20				
28 Vlhkost GA401A2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	90				
29 Vlhkost CNT-U1	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	34				
30 Vlhkost CNT-U2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	36				
31 Vlhkost SGBOX-1	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	20				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
32 Vlhkost SGBOX-2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	20				
33 Vlhkost CNT-L1	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	35				
34 Vlhkost CNT-L2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	35				
35 Vlhkost GA201	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	90				
36 Vlhkost CNT-M1	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	45				
37 Vlhkost CNT-M2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	45				
38 Vlhkost GA311	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	20				
39 Vlhkost GA306-1	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	50				
40 Vlhkost GA306-2	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	50				
41 Vlhkost GA306-3	Min	10	%	Gauss	[28]	Pozitivní s vlhkostí v GA701 (par. 25)
	Max	90				
	BE	50				
42 Teplota vody GA201	Min	54	°C	Gauss	[28]	Pozitivní s teplotou vzduchu v GA701 (par. 5)
	Max	61				
	BE	57				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
	Min	Max				
43 Objem nádrže GA201	Min	616	m ³	Lineární	[7], [28]	-
	Max	668				
	BE	637,1				
44 Úhel rozstříku 1 GA701	Min	75	°	Lineární	[7]	-
	Max	180				
	BE	127,5				
45 Úhel rozstříku 2 GA701	Min	75	°	Lineární	[7]	Pozitivní s úhlem rozstříku 1 (par. 44)
	Max	180				
	BE	127,5				
46 Úhel rozstříku 3 GA701	Min	75	°	Lineární	[7]	Pozitivní s úhlem rozstříku 1 (par. 44)
	Max	180				
	BE	127,5				
47 Průměr kapek -	Min	2E-4	m ³	Lineární	[7]	-
	Max	2,4E-3				
	BE	8E-04				
48 Dávk. příkon vzduch GA701	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	-
	Max	3,9E-2				
	BE	1,9E-2				
49 Dávk. příkon vzduch GA501	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,5E-3				
50 Dávk. příkon vzduch GA301A	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	6,1E-3				
	BE	3,1E-3				
51 Dávk. příkon vzduch GA401A2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,2E-3				
	BE	5,6E-4				
52 Dávk. příkon vzduch CNT-U1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
53 Dávk. příkon vzduch CNT-U2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
	Min	Max				
54 Dávk. příkon vzduch SGBOX-1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
55 Dávk. příkon vzduch SGBOX-2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,5E-3				
56 Dávk. příkon vzduch CNT-L1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
57 Dávk. příkon vzduch CNT-L2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
58 Dávk. příkon vzduch GA201	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,3E-3				
59 Dávk. příkon vzduch TL22P	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
60 Dávk. příkon vzduch TL01SP	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 48)
	Max	1,1E-2				
	BE	5,4E-3				
61 Dávk. příkon voda GA701	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	-
	Max	6,7E-2				
	BE	3,3E-2				
62 Dávk. příkon voda GA501	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	1,9E-2				
	BE	9,7E-3				
63 Dávk. příkon voda GA301A	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	4,3E-3				
	BE	2,2E-3				
64 Dávk. příkon voda GA401A2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	4,9E-6				
	BE	2,4E-6				

Podmínka, popis, zóna	Hodnoty		Jednotka	Rozložení	Zdroj dat	Závislost
	Min	Max				
65 Dávka. příkon voda CNT-U1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	6,5E-2				
	BE	3,3E-2				
66 Dávka. příkon voda CNT-U2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	6,5E-2				
	BE	3,3E-2				
67 Dávka. příkon voda SGBOX-1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	1,1E-1				
	BE	5,3E-2				
68 Dávka. příkon voda SGBOX-2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	9,6E-2				
	BE	4,8E-2				
69 Dávka. příkon voda CNT-L1	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	4,3E-3				
	BE	2,2E-3				
70 Dávka. příkon voda CNT-L2	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	4,3E-3				
	BE	2,2E-3				
71 Dávka. příkon voda GA201	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	8,5E-2				
	BE	4,2E-2				
72 Dávka. příkon voda TL22P	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	6,5E-2				
	BE	3,3E-2				
73 Dávka. příkon voda TL01SP	Min	0	kGy h ⁻¹	Lineární	[31]	Pozitivní s dávk. příkonem v GA701 (par. 61)
	Max	6,5E-2				
	BE	3,3E-2				
74 pH GA201	Min	5,0	-	Gauss	[32], [33]	-
	Max	9,0				
	BE	7,0				
75 Chemická forma jódu -	Min	1	-	Lineární	[14]	-
	Max	3				
	BE	-				

REFERENCE

- [1] Heřmanský B. (2011): Bezpečnost jaderných elektráren IV. Bezpečnostní systémy JE s PWR VVER II. A III. generace, EPR, AP. Elektronické skriptum pro FJFI ČVUT, s. 89.
- [2] Zoblivý, M. Zoblivý, M. (2015): Předprovozní bezpečnostní zpráva (pPBZ 1,2 revize 0) 1. a 2. bloku JE Temelín. Díl 1, Úvod a obecný popis elektrárny, s. 101.
- [3] Zoblivý, M. (2015): Předprovozní bezpečnostní zpráva (pPBZ 1,2 revize 0) 1. a 2. bloku JE Temelín. Díl 4, Reaktor, 4.1, Souhrnný popis, s. 22.
- [4] Urbánek, V., Rajman, I. (1987): Jaderná elektrárna s reaktory VVER-1000 včetně technologických systémů. Studie, s. 59.
- [5] Zoblivý, M. (2015): Předprovozní bezpečnostní zpráva (pPBZ 1,2 revize 0) 1. a 2. bloku JE Temelín. Díl 5, Systém chlazení reaktoru, 5.1, Celkový popis, s. 14.
- [6] Tabadar, Z., Aghajanpour, S., Jabbari, M., Khaleghi, M., Hashemi-Tilehnoee, M. (2018): Thermal-hydraulic analysis of VVER-1000 residual heat removal system using RELAP5 code, an evaluation at the boundary of reactor repair mode. Alexandria Engineering Journal, 57, 1249-1259.
- [7] Zoblivý, M. (2015): Příloha k předprovozní bezpečnostní zprávě 1,2 revize 2. Vstupní data pro bezpečnostní analýzy. Kapitola 8, Systém lokalizace havárie, s. 142.
- [8] Zoblivý, M. (2015): Předprovozní bezpečnostní zpráva (pPBZ 1,2 revize 0) 1. a 2. bloku JE Temelín. Díl 3, Konstrukce staveb, komponent, zařízení a systémů, 3.8.1, Hermetická oblast včetně ochranné obálky, s. 113.
- [9] Loss-of-Coolant Accidents: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/loss-of-coolant-accidents> [online 23.7.2020]
- [10] Heřmanský B. (2011): Bezpečnost jaderných elektráren III. LOCA a těžké havárie. Elektronické skriptum pro FJFI ČVUT, s. 70.
- [11] Kecek, A. (2014): Bezpečnostní analýza chování kontejnmentu JE s reaktorem VVER-1000 při haváriích s únikem chladiva. Zpráva ÚJV-Z4110T, s. 93.

- [12] Group of Medical Advisors to the Atomic Energy Control Board (1995): Guidelines on the use of stable iodine as a prophylactic measure during nuclear emergencies, s. 35. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/031/27031234.pdf?r=1 [online 29.11.2021]
- [13] Ullmann Vojtěch, Jaderné reakce a jaderná energie. <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm> [online 26.5.2020]
- [14] United States Nuclear Regulatory Commission (2000): Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors. Regulatory Guide 1.183, s. 62.
- [15] SÚRO, Radiační havárie. <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/radiacni-havarie> [online 24.11.2021]
- [16] IAEA, IAEA Safety Standards (2009): Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide No. SSG-2, s. 84. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1428_web.pdf [online 10.7.2020]
- [17] Glaeser, H. (2008): GRS method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and applications. Research article, s. 8.
- [18] Macek, J. (2011): Metodika pro provádění Best-Estimate analýz. Zpráva Z 3296 T, s. 76.
- [19] Glaeser, H. (2013): Summary of existing uncertainty methods. OECD/CSNI Workshop on Best Estimate Methods and Uncertainty Evaluations, s. 42.
- [20] Základy korelační analýzy, https://is.muni.cz/www/98951/41610771/43823411/43823458/44159634/44707073/Pavlik_-_Biostatistika_-_kapitola_11.pdf [online 11.12.2020]
- [21] Klein-Heßling, W., Arndt, S., Nowack, H., Spengler, C., Schwarz, S., Eschricht, D., Beck, S. (2018): COCOSYS V2.4v5 User's manual. Gesellschaft für Anlagen – und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, s. 995.
- [22] Kecek A. (2020): Ověření výpočetního kódu COCOSYS na experimentu IA (Iodine Adsorption) v rámci projektu BIP (Behaviour of Iodine Project). Zpráva ÚJV-Z4640, s. 57.

- [23] Weber G., Funke F. (2009): Description of Iodine model AIM-3 in COCOSYS. Technical report, s. 100.
- [24] Clément B., Cantrel L., Ducros G., Funke F., Herranz L., Rydl A., Weber G., Wren C. (2007): State of the art report on iodine chemistry. NEA CSNI, s. 60.
- [25] IAEA, IAEA Safety Standards (2009): Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, Specific Safety Guide No. SSG-2, s. 84. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1428_web.pdf [online 22.9.2020]
- [26] Zamakhaeva, I. (2020): Adsorpce jódu na površích uvnitř kontejnmentů jaderných elektráren. Výzkumný úkol, Katedra jaderné chemie, FJFI ČVUT, s. 60.
- [27] SUSA, <https://www.grs.de/en/simulation-codes/susa> [online 13.12.2020]
- [28] Denk, L., Kecek, A. (2020): Bezpečnostní analýzy události DEC A pro JE Temelín. Výpočty chování kontejnmentu a zdrojového členu pro LOCA se selháním sprchového systému. Zpráva ÚJV Z 5475 T, s. 121.
- [29] Denní data dle zákona 123/1998 Sb. <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z.-123-1998-Sb#> [online 9.12.2020]
- [30] e-Počasi.cz, Rok 2019 byl v Jihočeském kraji nejteplejší rok v historii. <https://www.e-pocasi.cz/informace-o-pocasi/rok-2019-byl-v-jihoceskem-kraji-druhy-nejteplejsi-rok-v-historii-1408.html> [online 30.11.2020]
- [31] Čarný, P., Lipták, L., Krpelanová, M. (2011): Stanovenie radiačných parametrov pre kvalifikáciu zariadení JE Temelín pre palivo TVSA-T a výkon zvýšený na 104 % pôvodného výkonu. Dokument pro ÚJV Řež, a.s., rev. 02, s. 117.
- [32] Řídící parametry pro chemický režim I. O. Data poskytnutá ÚJV Řež, a.s., platná ke dni 7.11.2019
- [33] Chemický režim – kampaň U1C16. Data poskytnutá ÚJV Řež, a.s., platná ke dni 28.2.2019
- [34] Cline J.E., Volleque P.G., Pelletier C.A., “Study of airborne iodine at TMI-2, sources and filtration”, 16th DOE Air Cleaning Conference, Session 20, 1980

- [35] Glowa G., Moore C, Boulianne D. (2011): Behaviour of Iodine Project final summary report. Atomic energy of Canada Limited, s. 45.