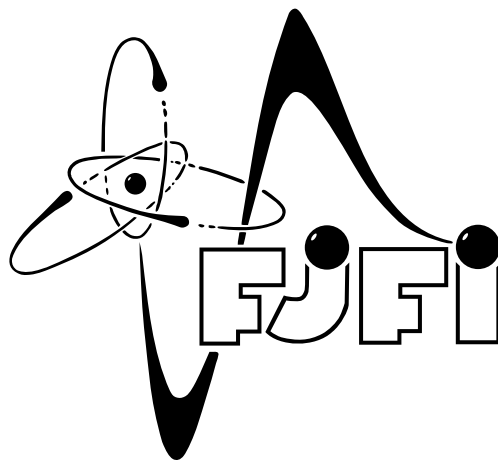


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Obor: Jaderné reaktory



**Validace kódu ASTEC na integrálním
experimentu Phébus FPT-3**

**Validation of the ASTEC code based on Phébus
FPT-3 integral test**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Štěpán Tichý
Vedoucí práce: Ing. Sebastian Nývlt
Konzultant práce: Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tichý** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **494690**
Fakulta/ústav: **Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra jaderných reaktorů**
Studijní program: **Jaderné inženýrství**
Specializace: **Jaderné reaktory**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Validace kódu ASTEC na integrálním experimentu Phébus FPT-3

Název diplomové práce anglicky:

Validation of the ASTEC code based on Phébus FPT-3 integral test

Pokyny pro vypracování:

1. V návaznosti na Vaše předchozí akademické práce poskytující komplexní vhled do fenomenologie těžkých havárií jaderných elektráren shrňte relevantní aspekty této fenomenologie pro specifický případ „in-pile“ experimentů, jejichž studiu je věnována tato práce.
2. Seznamte se s experimentálním programem Phébus FP zaměřeným na studium provázanosti všech relevantních jevů doprovázejících rozvoj těžké havárie a stručně jej popište. Zaměřte se na test s označením FPT-3 charakteristický přítomností absorbéru z materiálu B4C. Nastudujte a popište celý průběh tohoto experimentu.
3. Pro nejnovější verzi výpočetního kódu ASTEC vytvořte vstupní model experimentální smyčky Phébus FP zahrnující jak palivový svazek, tak primární okruh a kontejnment. Vstupní model upravte dle specifikace pro mezinárodní srovnávací úlohu na průběh experimentu Phébus FPT-3.
4. Proveďte výpočet s vytvořeným a odladěným vstupním modelem a pro všechny fáze experimentu vyhodnoťte nejdůležitější výstupní parametry umožňující srovnání výsledků numerické simulace s experimentálními výsledky. Na základě míry shody proveďte celkové zhodnocení úspěšnosti simulace modelované úlohy a učiňte závěry a doporučení pro modelování specifických jevů těžkých havárií identifikovaných v experimentu Phébus FPT-3 pomocí integrálního kódu ASTEC.

Seznam doporučené literatury:

- [1] F. Payot et al.: Phebus FP: FPT3 Final Report. IRSN, DPAM/DIR-2010-148, Saint Paul-lez-Durance, December 2010.
- [2] A. M. Chrétien et al.: Data Book FPT3. IRSN, DPAM/CPEX-2007-253, Saint Paul-lez-Durance, August 2007.
- [3] T. Haste: Specifications of SARNET2 Phebus FPT3 Benchmark. IRSN, DPAM/SEMIC-2011-057, Saint Paul-lez-Durance, February 2011.
- [4] T. Haste et al.: Phébus FPT3: Overview of Main Results concerning Core Degradation and Fission Product Behaviour. Proceedings of ICAPP 2011, Nice, France, May 2-5, 2011.
- [5] M. Kotouč: Přepočítání integrálního experimentu Phebus FPT3 za účelem validace kódu ASTEC V2.0. ÚJV Z-3546-T, Prosinec 2012.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Sebastian Nývlt katedra jaderných reaktorů FJFI


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


Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D. ÚJV Řež a.s.


Datum zadání diplomové práce: **26.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **26.10.2025**


Ing. Sebastian Nývlt
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho)ústavu/katedry


doc. Ing. Václav Čuba, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

6.12. 2023

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

Bc. Štěpán Tichý

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Sebastianu Nývltovi a Ing. Miroslavu Kotoučovi, Ph.D., za jejich ochotu, čas a dobře míněné rady.

Dále chci poděkovat Bc. Hance Horákové za její neutuchající lásku, pochopení, podporu a jazykovou a typografickou korekturu.

Bc. Štěpán Tichý

Název práce:

Validace kódu ASTEC na integrálním experimentu Phébus FPT-3

Autor: Bc. Štěpán Tichý

Studijní program: Jaderné inženýrství

Obor: Jaderné reaktory

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Sebastian Nývlt
Katedra jaderných reaktorů
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.
Oddělení Těžkých havárií a termomechaniky paliva
Divize Jaderná bezpečnost a spolehlivost
ÚJV Řež, a.s.

Abstrakt: Cílem práce je vytvoření vstupního modelu integrálního in-pile experimentu Phebus FPT-3 v integrálním výpočetním kódu ASTEC. Konkrétně vytvoření modelu palivového svazku, experimentální smyčky simulující primární okruh a nádoby kontejnmentu, který by umožňoval provedení validačního výpočtu pro všechny fáze experimentu dle specifikací pro mezinárodní srovnávací úlohu na průběh tohoto experimentu. Práce shrnuje dostupné informace o relevantní fenomenologii těžkých havárií, experimentu Phebus FPT-3 a o struktuře a vlastnostech kódu ASTEC. V praktické části je podrobně popsán vytvořený model včetně okrajových podmínek. V závěrečné části práce je rozebrán a vyhodnocen průběh validačního výpočtu v jednotlivých fázích experimentu společně se srovnáním s daty z experimentu.

Klíčová slova: těžká havárie, integrální in-pile experiment, Phébus FPT-3, ASTEC, validace, speciace jodu

Abstract: The aim of this thesis is to develop an input model for the integral in-pile experiment Phebus FPT-3 using the integral computational code ASTEC. Specifically, it involves creating a model of the fuel bundle, an experimental loop simulating the primary circuit, and the containment vessel, which would enable the execution of a validation calculation for all phases of the experiment according to the specifications for the international benchmark task on the course of this experiment. The thesis summarizes the available information on the relevant phenomenology of severe accidents, the Phebus FPT-3 experiment, and the structure and properties of the ASTEC code. The practical part provides a detailed description of the created model, including boundary conditions. The final part of the thesis analyzes and evaluates the course of the validation calculation in the individual phases of the experiment, along with a comparison with the experimental data.

Key words: severe accident, in-pile integral experiment, Phébus FPT-3, ASTEC, validation, iodine speciation

Obsah

Seznam použitých zkratk	3
Seznam tabulek	4
Seznam obrázků	5
Úvod	8
1 Těžké havárie	10
1.1 Experimenty a jejich role při validaci modelů	11
1.2 Fenomenologie v případě <i>in-pile</i> experimentů	11
2 Popis a průběh experimentu Phebus FPT-3	21
2.1 Svazková část experimentu FPT-3	23
2.2 Smyčková část experimentu FPT-3	24
2.3 Kontejnmentová část experimentu FPT-3	27
2.4 Jednotlivé fáze experimentu FPT-3	29
2.5 Výsledky experimentu FPT-3	31
3 Integrální kód ASTEC	35
3.1 Struktura kódu a průběh výpočtu	36
3.2 Popis vybraných výpočetních modulů	38
4 Model experimentu Phebus FPT-3	42
4.1 Model palivového svazku	42
4.2 Model experimentální smyčky	45
4.3 Model nádoby kontejnmentu	47
5 Výsledky validačního výpočtu	49
5.1 Výsledky svazkové fáze	49
5.2 Výsledky smyčkové fáze	55
5.3 Výsledky kontejnmentové fáze	59
5.4 Výsledky chemické fáze	63

Závěr	68
Seznam použitých zdrojů	73
Přílohy	
A Schémata komponent experimentu Phebus FPT-3	78
B Vybrané výsledky experimentu Phebus FPT-3	83

Seznam použitých zkratek

České zkratky

<i>n</i> -D	<i>n</i> -dimenzionální
AP	absorpční proutek
AZ	aktivní zóna
I.O	primární okruh
KTMT	kontejnment – ochranná obálka reaktoru
LOCA	loss of coolant accident (nehoda s únikem chladiva z primárního okruhu)
PG	parní generátor
PP	palivový proutek
TH	těžká havárie
Zr	zirkonium/ový
ŠP	štěpné produkty

Seznam tabulek

2.1	Přehled provedených experimentů v programu Phebus FP	21
2.2	Přehled hlavních událostí během degradace palivového svazku	32
5.1	Přehled hlavních událostí ve výpočtu degradační fáze FPT-3	50
5.2	Únik vybraných ŠP ze svazku	51
B.1	Hmotnostní bilance prvků ke konci degradace	85
B.2	Procentuální hmotnostní bilance prvků ke konci degradace	86

Seznam obrázků

1.1	Osa nejdůležitějších teplot z pohledu rozvoje těžké havárie	14
1.2	Mechanismus poškození palivového pokrytí při nízkotlakém scénáři . .	15
1.3	Únik ŠP různých kategorií volatility	18
2.1	Schéma experimentálního zařízení Phebus FP	22
2.2	Horizontální řez palivovým svazkem	24
2.3	Připojení horizontální části horké větve	25
2.4	Horizontální část horké větve experimentální smyčky	25
2.5	Vertikální U-trubka simulující PG	26
2.6	Horizontální studená větev experimentální smyčky	26
2.7	Schéma kontejnmentové nádoby REPF 502	28
2.8	Časový vývoj jodu v atmosféře KTMT	34
2.9	Časový vývoj depozice jodu v KTMT	34
3.1	Schéma modulární struktury kódu ASTEC	36
3.2	Výpočetní proces kódu ASTEC během časového kroku	37
3.3	Homogenní a nehomogenní objem v modulu CESAR	39
3.4	Význam struktur a komponent AZ v modulu ICARE	40
4.1	Schéma materiálového a prostorového členění palivového svazku . . .	44
4.2	Axiální profil výkonu a distribuce ŠP ve svazku	45
4.3	Schéma nodalizace modelu experimentální smyčky FPT-3	46
4.4	Schéma nodalizace modelu kontejnmentové nádoby REPF 502	48
5.1	Historie štěpného výkonu ve svazku během degradační fáze	50
5.2	Srovnání teplot paliva mezi výpočtem a experimentem	52
5.3	Srovnání teplot pokrytí PP mezi výpočtem a experimentem	52
5.4	Okamžitá a integrální produkce vodíku během degradační fáze	53
5.5	Hmotnostní tok vodní páry a vodíku na výstupu ze svazku	53
5.6	Vývoj změřeného a spočteného tlaku na vstupu a výstupu ze svazku .	54
5.7	Vývoj teploty chladiva a toku vodíku na výstupu ze svazku	55
5.8	Vývoj teploty chladiva nad svazkem a ve vertikální trubce	56
5.9	Vývoj teploty chladiva v horizontální trubce horké větve	56
5.10	Vývoj teploty chladiva v horké části PG	57

5.11	Vývoj teploty chladiwa ve studené části PG a studené větvi	58
5.12	Srovnání uniklého a transportovaného množství vybraných ŠP	58
5.13	Tlak v nádobě REPF 502 reprezentující KTMT	59
5.14	Průměrná teplota atmosféry v KTMT	60
5.15	Průměrná relativní vlhkost atmosféry KTMT	60
5.16	Rychlost kondenzace vodní páry v KTMT	62
5.17	Hmotnostní distribuce ŠP ve formě aerosolu v KTMT	62
5.18	Hmotnost jodu ve formě plynu a aerosolu ve vznosu	64
5.19	Hmotnost jodu ve formě plynu a aerosolu ve vznosu – detail	64
5.20	Hmotnostní distribuce sloučenin jodu ve formě aerosolu v KTMT	65
5.21	Speciace jodu v plynné formě v KTMT	66
5.22	Speciace jodu ve vodní jímce KTMT	67
A.1	Vertikální řez palivovým a absorpčním proutkem	78
A.2	Vertikální řez palivovým svazkem	79
A.3	Vertikální řez experimentálním kanálem	80
A.4	Celkový pohled na experimentální smyčku v rozvinuté rovině	81
A.5	Celkový pohled shora na celé experimentální zařízení Phebus FP	82
B.1	Průběh degradace svazku během experimentu FPT-3	83
B.2	Teploty na horké větvi PG během experimentu FPT-3	84

Úvod

Rostoucí požadavky na jadernou bezpečnost mají za následek potřebu blíže zkoumat a chápat problematiku těžkých havárií – obecně definovaných jako události s vážným poškozením jaderného paliva. Ty v sobě zahrnují řadu komplexních jevů, které jsou mnohdy vzájemně úzce provázané a jejichž znalost je někdy značně omezená. Přestože by pravděpodobnost výskytu TH měla být extrémně nízká, tak není nulová a nelze ji tudíž zcela vyloučit. K předcházení takových událostí a účinné redukci jejich možných následků je proto nezbytně nutné dosáhnout co nejhlubšího porozumění dané problematiky. K tomu slouží provádění experimentů, které následně slouží pro validaci integrálních výpočetních kódů, které pomocí mnohých zjednodušení umožňují simulovat a zkoumat sekvence TH od iniciační události až po únik radioaktivních látek do životního prostředí v okolí jaderného zařízení. Představitelem této skupiny kódu je například integrální výpočetní kód ASTEC.

Tématem předkládané diplomové práce bylo vytvoření vstupního modelu integrálního *in-pile* experimentu Phebus FPT-3 v integrálním výpočetním kódu ASTEC. Konkrétně vytvoření modelu palivového svazku, experimentální smyčky simulující primární okruh a nádoby kontejnmentu a dále provedení validačního výpočtu pro všechny fáze experimentu dle specifikací pro mezinárodní srovnávací úlohu (*benchmark*) na průběh experimentu Phebus FPT-3.

Pro tvorbu modelu experimentu Phebus FPT-3, který byl charakteristický přítomností absorbéru z materiálu B_4C , bude nejprve v teoretické části shrnuta řešerše fenomenologie těžkých havárií jaderných elektráren relevantní pro specifický případ integrálních *in-pile* experimentů. Dále proběhne uvedení a vysvětlení výpočetní struktury kódu ASTEC a jeho jednotlivých vypočtených modulů.

První kapitola nejprve uvádí význam experimentů při validaci výpočetních kódů a modelů postihující problematiku jevů probíhajících v podmínkách těžkých havárií. Dále kapitola rozebírá aspekty fenomenologie těžkých havárií relevantní pro integrální *in-pile* experimenty.

Druhá kapitola podrobně rozebírá experiment Phebus FPT-3 a to včetně detailního popisu svazkové, smyčkové a kontejnmentové části experimentu, který sloužil jako podklad pro tvorbu vstupního modelu. Kapitola dále analyzuje celý průběh experimentu ve všech jeho fázích a uvádí specifikace pro mezinárodní srovnávací úlohu na průběh experimentu.

Třetí kapitola ukončuje teoretickou část práce rozebráním struktury integrálního kódu ASTEC. Kapitola vysvětluje vzájemné provázání modulů a proces výměny informací mezi nimi v průběhu výpočtu. Postupně jsou dále popsány jednotlivé výpočetní moduly, které byly nezbytné pro vytvoření integrálního modelu experimentu.

Čtvrtá kapitola popisuje vytvořený model celého experimentu FPT-3. Postupně jsou v kapitole uvedeny a popsány modely palivového svazku, experimentální smyčky a nádoby kontejnmentu, a to včetně schémat nodalizace a geometrie jednotlivých částí. V příslušných částech kapitoly jsou uvedeny i použité doplňující modely a jejich parametry společně s okrajovými podmínkami.

V páté kapitole je postupně rozebrán průběh validačního výpočtu. Vyhodnocení validačního výpočtu je v kapitole rozděleno dle jednotlivých fází experimentu definovaných *benchmarkem*. Ten dále pro jednotlivé fáze specifikuje nejdůležitější výstupní parametry, které mají být v rámci validace hodnoceny. Z tohoto důvodu jsou pro jednotlivé fáze v kapitole vykresleny a analyzovány jen vybrané proměnné, které jsou následně srovnány s daty z experimentu, pokud je bylo možné dohledat.

K samotné práci jsou připojeny přílohy s doplňujícími parametry, schémata a dílčími výsledky experimentu FPT-3, které z důvodu zachování přehlednosti práce a koherence textu nebyly umístěny v hlavním textu práce.

Kapitola 1

Těžké havárie

Těžké havárie (TH) – obecně definované jako události s vážným poškozením jaderného paliva – zahrnují řadu komplexních jevů, které jsou mnohdy vzájemně úzce provázané a jejichž znalost je někdy značně omezená. Z pohledu české legislativy spadá TH do tzv. rozšířených projektových podmínek, kdy je cílem opatření omezovat následky postulované havárie na co nejnižší prakticky dosažitelnou úroveň. Počátkem každé takové sekvence událostí, které mohou vést k nehodě nebo havárii, je iniciační událost. Scénáře s těmito postulovanými událostmi se pomocí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti a deterministických analýz zkoumají a vyhodnocují se pro ně příslušná bezpečnostní opatření.

Sekvence TH může probíhat odlišně pro různé koncepty jaderných reaktorů. Tato akademická práce se zabývá integrálním *in-pile* experimentem Phebus FP [1], během něhož došlo k degradaci svazku ozářených palivových proutků (PP) s jedním absorpčním proutkem (AP), který byl v případě testu FPT-3 vyroben z karbidu bóru – B_4C . Experiment dále sledoval únik štěpných produktů (ŠP) do experimentální smyčky reprezentující primární okruh (I.O), která dále ústila do nádoby reprezentující kontejnment (KTMT). Jednalo se tak o simulaci havárie s únikem chladiva z I.O (loss of coolant accident, LOCA), která je typickým příkladem tzv. *nízkotlaké sekvence TH*.

Vzhledem k zaměření této akademické práce na validaci integrálního kódu na experimentálních datech se následující text soustředí především na klíčové aspekty této problematiky. Podrobnější popis třídění stavů a událostí na jaderném zařízení společně s rešerší na problematiku zajišťování jaderné bezpečnosti a uplatnění principu ochrany do hloubky lze najít v předcházející akademické práci [2].

1.1 Experimenty a jejich role při validaci modelů

V oblasti zkoumání TH v jaderných zařízeních nelze z důvodů bezpečnosti a finanční náročnosti provádět veškeré experimenty v plném měřítku jaderných zařízení. Výzkum se proto soustředí na provádění experimentů, které jsou zaměřeny na hlubší pochopení různých aspektů TH a na snížení neurčitostí v jejich kvantifikaci. Tento výzkum zahrnuje jak úzce specializované experimenty, které se zaměřují na konkrétní jevy, tak i integrální experimenty, které zkoumají vzájemné provázání různých jevů.

Dalším důležitým druhem jsou tzv. *in-pile* integrální experimenty, které jsou specifické tím, že jsou prováděny v podmínkách odpovídajících prostředí jaderného reaktoru, včetně ohřevu štěpnou řetězovou reakcí. Takovéto experimenty umožňují zkoumání chování reálně v praxi užívaných materiálů a jaderného paliva za extrémních podmínek, jako jsou vysoké teploty, tlaky a radiace. Tyto experimenty tak poskytují unikátní příležitost k přímému testování materiálů a konstrukcí za podmínek, které nelze napodobit mimo jaderný reaktor.

Získané poznatky a vytvořené modely jsou důležité pro další vývoj. Mohou být za značného zjednodušení využity k omezené extrapolaci na reálná jaderná zařízení. Integrální výpočetní kódy, které vznikají na základě těchto modelů, umožňují pomocí mnohých zjednodušení simulovat a zkoumat průběh TH od jejich počátku až po možný únik radioaktivních látek do životního prostředí.

Validace těchto modelů a výpočetních kódů je klíčovým krokem při jejich vývoji. Zahrnuje testy jak na separátních (tzv. *separate effect tests*), tak i na integrálních a především *in-pile* experimentech, jako je např. program Phebus FP [1]. Dále zahrnuje porovnání výsledků s daty z reálných havárií, jako jsou havárie v jaderných elektrárnách Fukushima Daiichi [3] a Three Mile Island [4]. Proces validace je nezbytný pro zajištění spolehlivosti výpočetních kódů a jejich použití při posuzování bezpečnosti jaderných zařízení.

1.2 Fenomenologie v případě *in-pile* experimentů¹

Vzhledem k zaměření akademické práce na experimentální program Phebus FP, konkrétně na test FPT-3, se následující text především zaměřuje na relevantní fenomenologii TH pro integrální *in-pile* experimenty v podmínkách odpovídající jaderným tlakovodním reaktorům s palivem ve formě UO_2 , palivovým pokrytím a komponentami z kovového zirkonia (Zr) a absorbéru z karbidu bóru – B_4C .

¹Podkapitola shrnuje nejdůležitější fenomenologii TH relevantní pro integrální *in-pile* experimenty. Komplexnější analýzu uvedených a dalších jevů lze nalézt v předcházejících akademických pracích [2, 5], ze kterých byly části této sekce převzaty společně s referencemi primárních zdrojů.

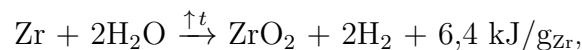
Každý scénář sekvence TH začíná, jako již bylo dříve řečeno, iniciační událostí. Různé scénáře se sice mohou odlišovat svou iniciační událostí, ale vedou po poškození jaderného paliva k podobnému rozvoji TH. V počáteční části probíhá v aktivní zóně (AZ) po odstavení reaktoru postupné přehřívání paliva zbytkovým výkonem vlivem rozpadu radioaktivních štěpných produktů (ŠP). Ty se za normálních provozních podmínek akumulují v různých chemických formách v krystalické struktuře paliva, na hranicích zrn, v mezeře mezi tabletou a palivovým pokrytím a případně i v centrální mezeře tablet, nebo v prostoru mezi tabletami. [2, 5, 6]

Degradace AZ může vést k oxidaci palivového pokrytí ze Zr za vzniku vodíku, úniku ŠP a vzniku bazénu taveniny a pevných trosků – tuto směs souhrnně označujeme jako tzv. *corium*. Po ztrátě mechanické integrity paliva a pokrytí má hlavní vliv na únik ŠP z paliva do chladiva teplota paliva, oxidačně-redukční reakce, interakce s Zr pokrytím a dalšími materiály AZ, druh paliva, míra vyhoření a způsob degradace samotného paliva. [2, 5, 6]

Oxidace a zvyšování teploty AZ

Pokud není v AZ odstaveného reaktorů přítomno dostatečné množství chladiva pro odvádění zbytkového výkonu z rozpadu radioaktivních ŠP, tak dochází k postupnému nárůstu teplot PP, který může vést k jejich nenávratné degradaci. Prostor mezi komponentami v AZ je v této části havárie vyplněn převážně přehřátou vodní párou.

Při teplotách přibližně nad 900 °C začne být kovové Zr na palivovém pokrytí silně exotermicky oxidováno vodní párou podle rovnice:



kde kromě tvorby tepla vzniká 44,2 g vodíku na jeden kilogram zoxidovaného Zr. [6]

Oxidace materiálů obsažených v AZ vodní parou je důležitým jevem při zkoumání TH, a to kvůli produkci vodíku a generaci tepla, které může přesáhnout zbytkový výkon z rozpadu ŠP. Oxidace kovového Zr na palivovém pokrytí vodní párou je považována za nejvíce důležitou reakci z hlediska produkce vodíku a následků na degradaci AZ. [2, 6]

Tato reakce probíhá v zanedbatelné míře i během normálního provozu reaktoru. Oxidace ale začne během sekvence TH nabývat na významu, když teploty vystoupají nad cca 900 °C. Rychlost reakce závisí exponenciálně na teplotě (Arrheniův vztah), a proto s rostoucí teplotou prudce roste kinetika oxidace, která dále zvyšuje teplotu. Jedná se tedy o reakci s pozitivní zpětnou vazbou. [2, 6]

Při dosažení teploty cca 1 200 °C je generované teplo z oxidace srovnatelné se zbytkovým výkonem z rozpadu ŠP a AZ se stává neuchladitelnou pouze konvekcí vodní párou. Jak ukázal experiment LOFT-FP-2 [7] ohřev AZ z počátku pouze zbytkovým výkonem o rychlosti nižší než 1 °C/s se vlivem oxidace Zr pokrytí rapidně zvýší až na desetinásobek. Důvodem tohoto prudkého navýšení je kromě nedostatečného odvodu tepla i deformace samotného materiálu, která vede ke zvýšení reakční plochy – tzv. *breakaway efekt*. Při teplotách nad 1 200 °C je však současně pozitivní zpětná vazba oxidace na teplotu limitována rostoucí tloušťkou oxidické vrstvy, kterou musí molekuly pronikat. Při dosažení 1 500 °C se mění krystalová struktura ZrO₂ z tetragonální na kubickou. Ta má větší difuzní koeficient pro vodní páru a dochází tak k další, prakticky již nezastavitelné (tzv. *runaway*) oxidaci, které předtím bránila oxidická vrstva. S následným růstem teploty dochází k tavení nezoxidovaných metalických komponent a při dosažení 1 800 °C také k tavení samotného Zr. [2, 6]

Třebaže teplo generované oxidací Zr je dostatečné pro dosažení 2 850 °C, kdy se začíná tavit i samotné palivo UO₂, je několik efektů, které mohou oxidaci limitovat: dostupnost páry v AZ pro oxidaci (tzv. *steam starvation*); difuze páry skrz vodíkovou mezní vrstvu, která se vlivem oxidace vytváří na pokrytí (tzv. *hydrogen blanketing*) a difuzní rychlost H₂O skrz oxidickou vrstvu ZrO₂. [2, 6, 8]

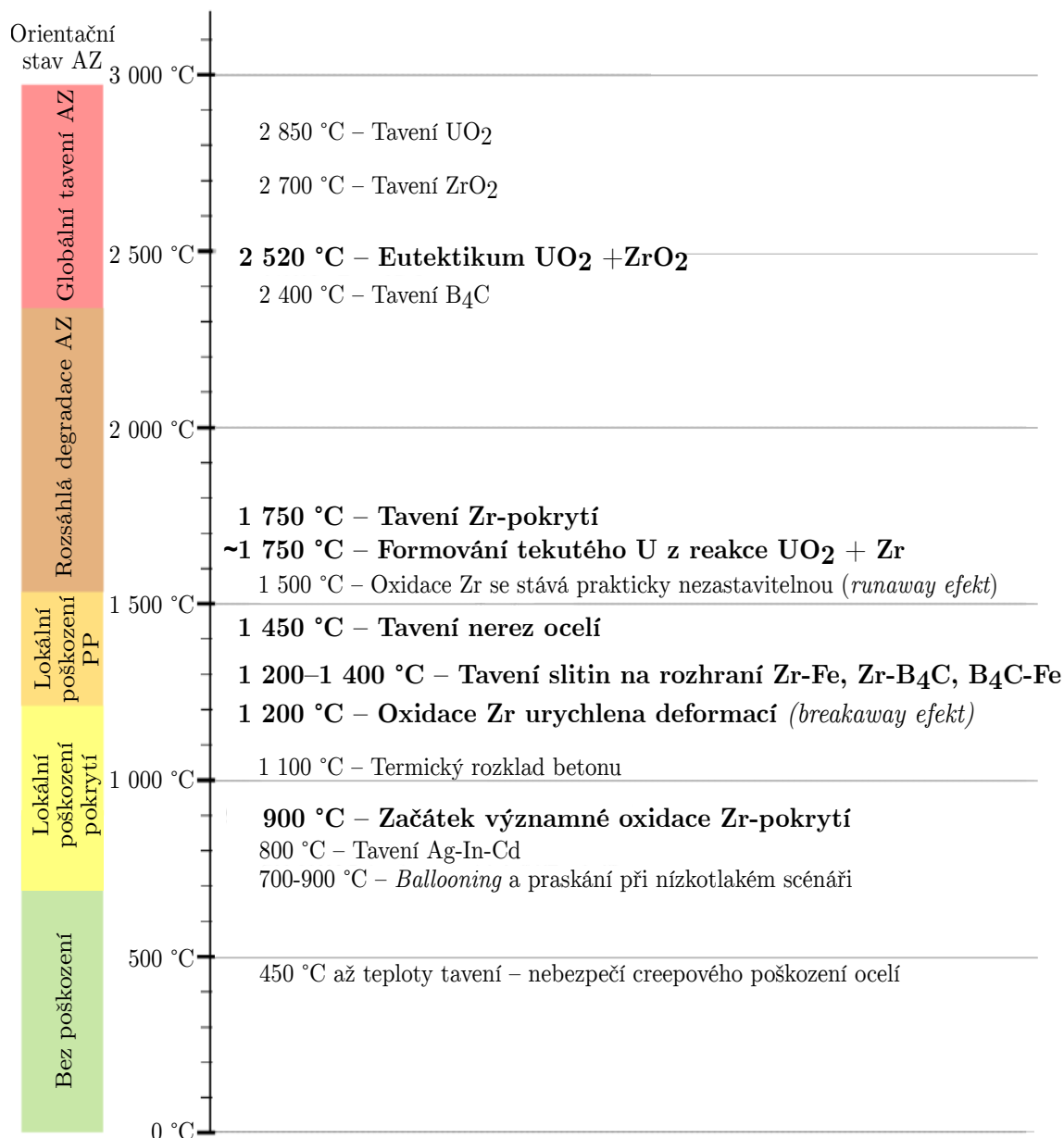
Část vodíku vyprodukovaného oxidací odchází do I.O, odkud může unikat do prostoru KTMT. Vodík se však i absorbuje v matici palivového pokrytí, kde po dosažení limitu rozpustnosti precipituje ve formě hydridů (tzv. *hydridace*), což má za následek křehnutí pokrytí a zvýšení jeho náchylnosti ke korozi. Kromě Zr probíhá během sekvence TH oxidace i dalších materiálů, které jsou přítomny v AZ. Tyto materiály, převážně B₄C, pokud je použit jako materiál AP, a ocel, se též svou oxidací podílejí na produkci vodíku a to v řádu jednotek procent. [5, 6]

Ztráta geometrie AZ

K degradaci AZ dochází postupně v řádu minut až hodin (v závislosti na druhu sekvence TH) v širokém rozsahu teplot od 1 200 °C do 2 800 °C. Konkrétní průběh nahřívání AZ a stejně tak oxidace a degradace jejích komponent během sekvence TH silně závisí na jejím materiálovém složení, konfiguraci, tlaku a celkové termodynamické zpětné vazbě systému. [2]

Pro přehled je na Obr. 1.1 zobrazena teplotní osa významných teplot pro materiály v AZ během sekvence TH. Počátečním mechanismem degradace AZ jsou chemické reakce mezi materiály AZ, které vedou k tvoření eutektických slitin s nižší teplotou tavení, než mají jednotlivé materiály. Změny a ztráty geometrie jsou pře-

vážně spojeny s lokální teplotou, a proto mnohdy může docházet k těmto změnám na více místech zároveň. Proces degradace AZ se obecně projevuje postupným růstem maximální i průměrné teploty v AZ. [2, 8]



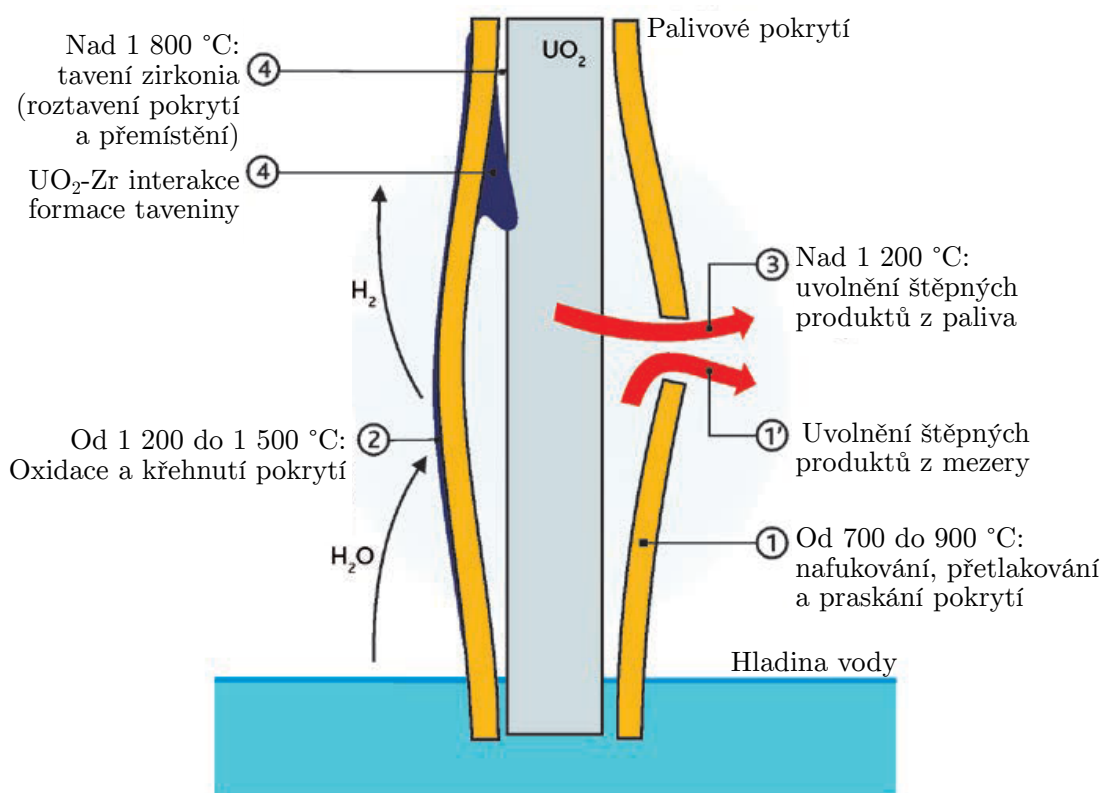
Obr. 1.1: Osa nejdůležitějších teplot z pohledu rozvoje TH, upraveno z [2, 9].

Zvýšená teplota paliva a hromadění plyných ŠP uvnitř PP zvyšuje jejich vnitřní tlak. Palivové pokrytí se z důvodu degradace jeho mechanických vlastností začíná deformovat v momentě, kdy jeho teplota překročí 700 °C. V závislosti na druhu scénáře TH tlak uvnitř PP dříve nebo později předčí tlak v AZ. Tlakování uvnitř PP vede k jeho deformaci z důvodu tečení materiálu (tzv. *creep*). [2, 6]

V případě nízkotlaké sekvence TH, jako je havárie typu LOCA, dochází v rozmezí teplot 700 °C až 900 °C vlivem přetlaku a snížení mechanických vlastností Zr k nafukování a praskání PP (tzv. *ballooning*), jelikož je na pokrytí vyvíjen vyšší tlak zevnitř. Schéma tohoto procesu je zobrazeno na Obr. 1.2. Takto PP setrvává do vyšších teplot, kdy při teplotě nad 1200 °C začíná docházet k lokálním selháním pokrytí, jelikož se vytváří eutektické slitiny s nižší teplotou tavení. [2, 8]

V tomto stádiu degradace AZ je nejvýznamnějším následkem selhání palivového pokrytí uvolnění ŠP, odhalení vnitřního povrchu pokrytí páře a přesun materiálů v AZ, který ovlivňuje proudění páry a vody. Vniknutí vodní páry do vnitřní části PP způsobuje oxidaci pokrytí zevnitř a prudkou produkci vodíku, který je částečně absorbován v pokrytí. Vzhledem k vysoké koncentraci vyprodukovaného vodíku ve vnitřním prostoru PP, která překračuje limit rozpustnosti v matrici pokrytí, dochází k jeho další precipitaci ve formě hydridů (tzv. *sekundární hydridace*). [2, 8]

Palivové proutky, které zoxidují a neselžou mechanicky, mohou ztratit svoji integritu jako výsledek procesů za vysokých teplot v rozmezí 2 000 °C až 2 200 °C. Způsob popraskání není dosud přesně znám a pro jeho modelování je třeba využít poznatků z experimentálních programů jako je právě Phebus FP [1] nebo CORA [10]. [2, 6]



Obr. 1.2: Mechanismus poškození palivového pokrytí při nízkotlakém scénáři nafukováním (*ballooningem*), upraveno z [2, 6].

Bod tání Zr pokrytí se obvykle pohybuje v rozmezí 1 750 °C až 2 000 °C v závislosti na přesném chemickém složení a míře oxidace. Přesun a stékání roztaveného Zr může být zadrženo vytvořením oxidických obálek na povrchu palivového pokrytí. Tloušťka oxidické obálky na pokrytí závisí na tepelném průběhu v předchozích fázích havárie. Pokud dojde k rychlému ohřevu AZ, Zr pokrytí se odtaví a steče do dolní části svazku. V případě pomalejšího vypařování vody z AZ vznikne silnější oxidická vrstva ZrO₂, která se začíná tavit nad 2 700 °C. Roztavené Zr zůstává „uvězněná“ mezi palivem UO₂ a oxidickou vrstvou ZrO₂. Takto „uvězněná“ tavenina Zr částečně rozkládá palivo UO₂. Tyto chemické reakce mohou způsobit tavení UO₂ a ZrO₂ až 1 000 °C pod jejich teplotou tavení. Vzniklá slitina U-O-Zr zůstává uvnitř oxidické obálky pokrytí až do jejího selhání na *creep* při teplotách nad 2 000 °C, kdy se pak tavenina začne relokovat směrem dolů. Tato relokace zmírňuje oxidaci tím, že se Zr přesouvá do chladnější části AZ, kde opět tuhne na nižší teploty s pomalejší oxidací a snižuje průtok páry skrz AZ. Tyto blokace chladících kanálů v oblasti distančních mřížek často tvoří základ pro další hromadění taveniny. [2, 8]

Když teplota AZ překročí teplotu tavení ZrO₂ 2 700 °C a pro UO₂ teplotu 2 850 °C, začne se tvořit bazén taveniny v AZ. Teplota tání eutektické slitiny UO₂ a ZrO₂ je ale pouze 2 520 °C, takže tavení nastává již za teplot mnohem nižších. V závislosti na přesném složení a poměru fází dochází díky chemickým reakcím k rozkládání UO₂ roztaveným Zr a k rychlé formaci tekuté taveniny již za teplot 2 200–2 300 °C. [2, 8]

Tvorba a únik ŠP

Během provozu jaderného reaktoru vzniká s různým výtěžkem celá řada ŠP. Inventář (tj. ŠP a produkty vzniklé jejich rozpadem, či eventuálně jinak vzniklá radioaktivní jádra) roste téměř lineárně v závislosti na míře vyhoření jaderného paliva, s výjimkou krátkodobých ŠP, které dosáhnou a zůstávají na saturovaném množství odpovídající danému výkonu. Radioaktivní ŠP, především ty s krátkým poločasem rozpadu, tvoří sice menšinu celkové hmotnosti ŠP, ale podílí se z většiny na uvolněném ionizujícím záření a na zbytkovém výkonu v momentě odstavení reaktoru. [5, 6]

V případě úniku ŠP do životního prostředí se radiologický dopad jednotlivých ŠP mj. liší v závislosti na poločasu rozpadu, typu emitované částice a její energii a mobilitě v životním prostředí. V krátkodobém horizontu dávkového příkonu hraje nejvýznamnější roli radioaktivní jod, který se hromadí ve štítné žláze. Z pohledu radiačních následků dlouhodobého vystavení zamořenému prostředí je nejvíce významné cesium. [5, 6]

Za normálních provozních podmínek tlakovodního reaktoru se ŠP v různých chemických formách akumulují v krystalické struktuře paliva, na hranicích zrn, v mezeře mezi tabletou a palivovým pokrytím a případně i v centrální mezeře tablet, nebo v prostoru mezi tabletami. Ionty ŠP ve vyhořelém palivu vytvářejí následující chemické formy: [11]

- rozpuštěné oxidy – téměř polovina všech ŠP, zejména Sr, Zr, Y, La, Ce a Nd;
- vysrážené oxidy – hlavně Ba a Nb;
- vysrážené kovy – hlavně Mo, Tc, Ru, Rh a Pd;
- plyny a volatilní ŠP v rozpuštěné formě – Br, Kr, Te, I, Cs a Xe.

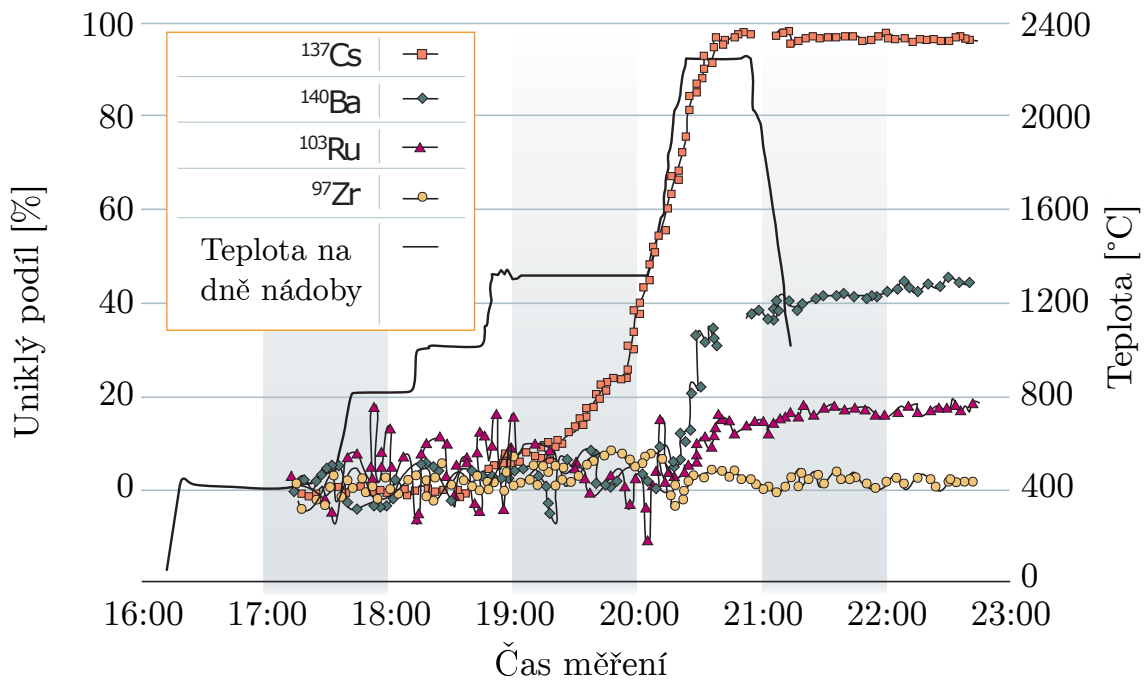
Chemické formy ŠP mohou měnit svůj stav mezi těmito kategoriemi v závislosti na teplotě paliva, přítomnosti kyslíku a míře vyhoření. Příkladem takového prvku může být molybden, který se převážně vyskytuje v kovové formě, ale může být nalezen i ve formě oxidu (hlavně na povrchu palivových tablet) na začátku cyklu při nízkém vyhoření a nízkém kyslíkovém potenciálu v palivu. [8, 11]

Na základě současných poznatků (právě díky integrálnímu experimentu Phebus FP [1]) lze z pohledu volatility (viz Obr. 1.3) rozdělit ŠP z hlediska TH do čtyř tříd: [6]

- Plyny a volatilní ŠP (Kr, Xe, I, Cs, Br, Rb, Te, Sb) – k úniku dochází dříve než dochází k tavení.
- Semi-volatilní ŠP (Mo, Ba, Y, Rh, Pd a Tc) – míra úniku může být velmi vysoká a někdy i ekvivalentní třídě volatilních ŠP, ale velmi záleží na podmínkách pro oxidačně-redukční reakce. Úniková kinetika ŠP je urychlena oxidací.
- Nízko-volatilní (Sr, Nb, Ru, La, Ce, Eu a Np) – únik je v řádu jednotek procent počátečního inventáře během degradace PP před plnou ztrátou geometrie. Za specifických podmínek (např. v případě velmi vysokého vyhoření) mohou být úniky vyšší, nicméně se u těchto ŠP předpokládá významná míra zachycení v TNR a v I.O.
- Non-volatilní ŠP (Zr a Nd) – tvoří žáruvzdorné oxidy. Žádný významný únik zatím nebyl nikdy experimentálně demonstrován.

V průběhu palivového cyklu tablety v AZ reaktoru dochází k výrazné změně mikrostruktury paliva. To se děje vlivem jaderných a chemických reakcí, teplotního gradientu v tabletě, vysokého parciálního tlaku volatilních ŠP atd. Plynné ŠP postupně difundují buď na hranice zrn tj. do inter-granulárních porozit, nebo do intra-granulárních porozit v zrnech UO_2 , což zpomaluje jejich další přesun na hranice

mezi zrna. Na povrchu zrn se následně plynné ŠP akumulují do plynových bublin, které se mohou relokovat do volného objemu uvnitř PP. V momentě selhání PP se tak plynné ŠP v palivu nacházejí buď stále v krystalické mřížce paliva, v intra-granuálních porozitách (o velikosti až v řádu nanometrů) nebo na hranici zrn UO_2 (inter-granulární porozity). [5, 6]



Obr. 1.3: Únik ŠP různých kategorií volatility dle výsledků experimentu VER-CORS, upraveno z [12].

V první fázi úniku plyných ŠP často nazývané jako tzv. *burst release* uniká frakce volatilních ŠP, které se akumulovaly na hranicích mezi zrna společně s plynými bublinami v mezeře. Ve druhé fázi unikají postupně plyny z krystalové struktury paliva díky difuzi podpořené zvýšenou teplotou. Nakonec v momentě tání paliva unikají i plyny z intra-granulárních bublin. [5, 6]

V případě méně volatilních ŠP probíhá únik zpravidla ve dvou fázích. V první fázi je pro pohyb iontů ŠP důležitý mechanismus difúze v pevné fázi, který je vytvářený gradientem chemického potenciálu a teploty. Ve druhé fázi se ŠP díky vypařování přesouvají mimo krystalickou mřížku paliva, kde mohou podléhat dalším chemickým reakcím. Těmito reakcemi (např. s Zr pokrytím) mohou ŠP snížit svoji volatilitu vytvořením sloučeniny s vyšší teplotou tání a tedy nižším parciálním tlakem. Po ztrátě mechanické integrity paliva a pokrytí má hlavní vliv na únik ŠP z paliva do chladiva teplota paliva, oxidačně-redukční reakce, interakce s Zr pokrytím a dalšími materiály AZ, druh paliva, míra vyhoření a způsob degradace samotného paliva. [5, 6]

Transport ŠP

Uvolněné ŠP jsou po úniku z paliva různými mechanismy ochlazovány v horní části palivového svazku a v I.O, kde se mohou případně kondenzovat/usazovat na pevných strukturách. Plynné ŠP mohou být buď v rámci parametrů při TH nekondenzovatelné (např. vzácné plyny) či kondenzovatelné (např. CsI). Aerosoly jsou tvořeny buď kondenzátem par ŠP či pevnými částicemi obtížně vypařitelnými (např. U). [5, 6]

Aerosoly ve vznosu mohou vznikat homogenní nebo heterogenní nukleací tj. procesem kondenzace na zárodečných částicích ve vznosu. Unášením takto vzniklých aerosolů ve vznosu skrze I.O nebo KTMT může docházet k aglomeraci, kdy se jednotlivé částice aerosolů sráží a shlukují dohromady. [5, 6]

Část plynných ŠP kondenzuje na zdech potrubního systému I.O nebo na zdech v KTMT. Pokud se však změní termodynamické podmínky, tak může dojít k jejich opětovnému vznosu. [5, 6]

K depozici aerosolů na zdech může dojít sedimentací gravitačním zrychlením; difuzí díky Brownově pohybu; nárazem při změně geometrie nebo pokud proudění plynu či kapaliny z důvodu teplotního či koncentračního gradientu unáší molekuly aerosolů ke zdi. Tento jev nastává vlivem vyrovnávání teplot či koncentrací (jedná se o tzv. termoforézu či difusioforézu). Deponované aerosoly na zdech se mohou resuspendovat, pokud jsou z povrchů mechanicky strženy (např. prudkým prouděním páry vzniklé při znovu-zaplavení AZ). [5, 6]

Aerosoly uniklé do prostoru KTMT se usazují ve vodních jímkách či na pevných strukturách (odkud mohou být mechanismem smáčení zkondenzovanou vodní párou také relokovány do vodních jímek). Takto usazené aerosoly se mohou resuspendovat, pokud k tomu nastanou vhodné fyzikální či chemické podmínky – např. odparem vody, změnou pH, dávkovým příkonem, apod. Kromě usazování se aerosoly mohou ze vznosu odstraňovat také sprchováním atmosféry KTMT, které se může provádět ve snaze o snížení tlaku v KTMT. [5, 6]

Chemické formy ŠP v KTMT mohou být určeny na základě znalostí koncentrací a termodynamických vlastností pouze s řadou neurčitostí. Velkým přínosem informací proto byly výsledky z integrálního experimentu Phebus [1]. Systém chemických reakcí v KTMT je však obecně velmi komplexní, a proto i z důvodu zadání této akademické práce se následující text zaměří už jenom na chemické formy a reakce jodu, který může zůstat ve velkých objemech v plynné formě v KTMT. [5, 6]

Chemie jodu

V kontextu TH jod nejčastěji tvoří sloučeniny s cesiem, rubidiem, kadmiem a stříbrem. Samotný jod může tvořit dobře definované formy I_2 nebo I^- . Výsledky z experimentálního programu Phebus FP [1] ukázaly, že jod není převážně ve formě CsI, jak se dříve předpokládalo, ale že často tvoří formy i s prvky stříbra a kadmia, které se uvolňují degradací komponent v AZ (v případě použití regulačních orgánů ze slitiny Ag-In-Cd). Dalším poznatkem programu Phebus FP [1], konkrétně testu FPT-3, bylo zjištění, že užitím B_4C v regulačních orgánech se zvyšuje podíl nevázaného jodu v plynné formě oproti předchozím testům s regulačními tyčemi ze slitiny Ag-In-Cd. Tento výsledek lze jednak vysvětlit absencí slitiny Ag-In-Cd a také vysokou koncentrací kyseliny borité z oxidace B_4C , která může vázat cesium a brání tak tvorbě CsI. Výsledky také ukázaly, že před únikem do KTMT je část jodu v plynné formě přítomna i v chladiivu I.O. [5, 6]

Aerosoly jodu se stejně jako ostatní aerosoly usazují v KTMT ve vodních jímkách. S výjimkou jodidu stříbrného – AgI jsou ostatní soli jodu (jako např. CsI, RbI, CdI_2 , InI) ve vodě rozpustné a jod potom zaujímá formu iontů I^- a IO_3^- . Velký počet ŠP ve vodní jímkce má za následek vysoký dávkový příkon, který způsobuje radiolýzu vody, což mj. způsobuje radiolytickou oxidaci I^- na volatilní I_2 . Produkce I_2 silně závisí na pH jímky. Pokud je prostředí jímky udržováno zásadité (tedy s vysokým pH), tak je produkce I_2 velmi malá. Ve skutečnosti je však pH spíše kyselé, jelikož v rámci snahy zmírnit následky TH užívá řada systémů jako kondenzát pro doplňování roztok kyseliny borité. [5, 6]

Vodní jímky též obsahují organické sloučeniny primárně z nátěrů stěn, které mohou také podléhat radiolýze. Reakce molekulárního jodu I_2 s organickými radikály produkuje jak volatilní organické jodidy (např. CH_3I), tak nízko-volatilní sloučeniny s větší molekulovou hmotností. [5, 6]

Kapitola 2

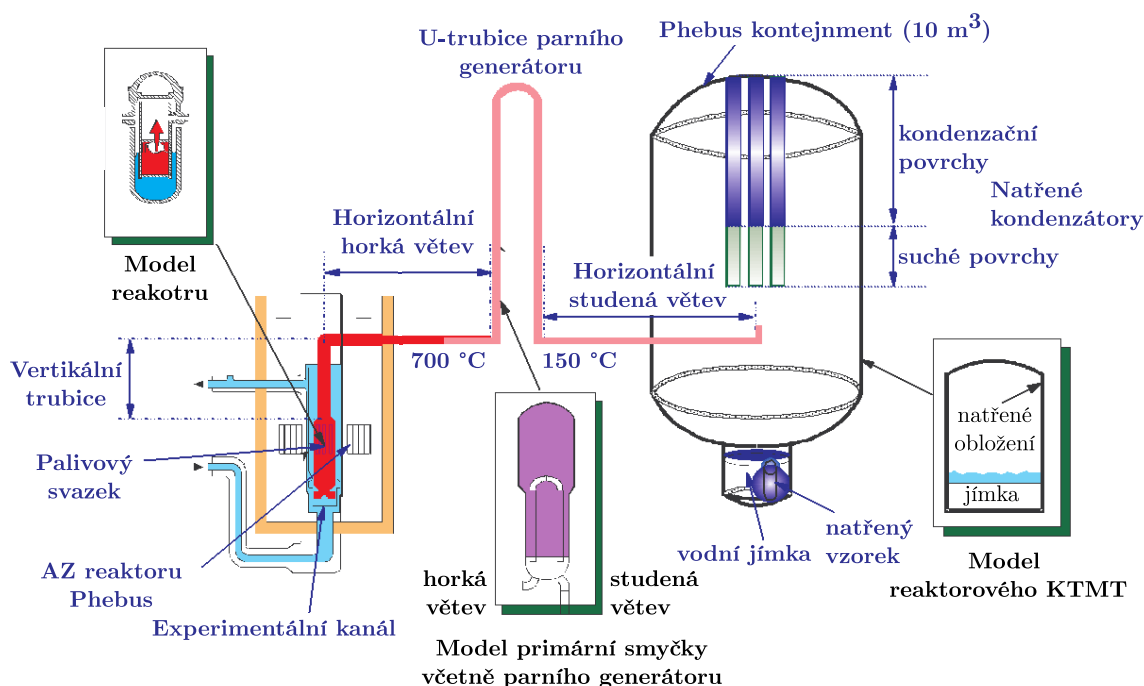
Popis a průběh experimentu Phebus FPT-3

Mezinárodní experimentální program Phebus FP zahrnující integrální *in-pile* experimenty významně přispěl ke zkoumání komplexní fenomenologie TH. Výsledky integrálních *in-pile* testů byly totiž nezbytné pro doplnění fyzikálních modelů, do té doby převážně odvozených na základě malých analytických experimentů jednotlivých jevů (tzv. *separate effect tests*). Ty však nejsou samy schopny postihnout provázanost jevů mezi sebou a nedokáží definitivně vyloučit možnost opomenutí dalších důležitých jevů. Z těchto důvodů bylo mezi lety 1993 až 2004 provedeno pět integrálních *in-pile* experimentů FPT-0 až FPT-4, jejichž přehled je shrnut v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Přehled provedených experimentů programu Phebus FP, převzato z [13].

Test	Neozářené/ předozařené/ kontrolní tyče	Vyhoření [GWd/t _U]	Chlazení palivového svazku	Podmínky KTMT
FPT-0	20/0/1 Ag-In-Cd	-	vysoký obsah vodní páry	pH 5, chlazená jímka
FPT-1	2/18/1 Ag-In-Cd	23	vysoký obsah vodní páry	pH 5, chlazená jímka
FPT-2	2/18/1 Ag-In-Cd	32	nízký obsah vodní páry, H ₃ BO ₃	pH 9, vypařující se jímka
FPT-3	2/18/1 B ₄ C	24	nízký obsah vodní páry	pH 5, vypařující se jímka
FPT-4	lože trosek bez absorbátoru	38	vodní pára + H ₂	-

Všechny testy proběhly na experimentálním zařízení Phebus FP (Obr. 2.1), které navozovalo prototypické podmínky v lehkovodním reaktoru. Cílem projektu bylo studium degradace skutečných prototypických materiálů od okamžiků brzké oxidace pokrytí a produkce vodíku až do pozdní fáze degradace a tvorby bazénu taveniny. Dále mohlo být studováno uvolňování ŠP a konstrukčních materiálů, včetně jejich fyzikálně-chemických interakcí a jejich transportu skrze I.O až do KTMT. Zvláštní pozornost byla následně věnována chování ŠP v KTMT se zaměřením na chování jódu, zejména pak na revolatilizaci způsobenou radiolýzou ve vodní jímce. [1, 14]



Obr. 2.1: Schéma experimentálního zařízení Phebus FP, přeloženo z [15].

Pro testy FPT-0 až FPT-3 byly použity svazky 1,12 m dlouhých PP, které byly umístěny v tlakovém kanálu. Palivový svazek vždy obsahoval 20 PP a 1 AP v centrální pozici, přičemž v závislosti na testu došlo k předozáření vybraných PP, čímž se simulovalo vyhoření paliva. Samotnému testu vždy předcházelo již dřívější ozařování svazku v reaktoru Phebus po dobu několika dní, s cílem dosáhnout akumulace krátkodobých ŠP. Poměr hmotnosti paliva a inventář ŠP byl vždy přibližně 1 : 5 000 ve srovnání s francouzskými tlakovodními reaktory o výkonu 900 MWe. [1, 14]

Unikající ŠP ze svazku během degradace byly přiváděny horkou větví experimentální smyčky ohříváné na 700 °C do parního generátoru (PG) simulovaného jedinou obrácenou U-trubicí a pak do modelového KTMT prostřednictvím studené větve ohříváné na 150 °C. Modelový KTMT byla nádoba o objemu 10 m³ simulující atmosféru, plochy natřených stěn a vodní jímku v KTMT. Celé experimentální zařízení Phebus FP tak lze geometricky rozdělit na 3 různé části: palivový svazek, experimentální smyčku a KTMT. Těmito částem se podrobněji věnují následující sekce. [1]

2.1 Svazková část experimentu FPT-3

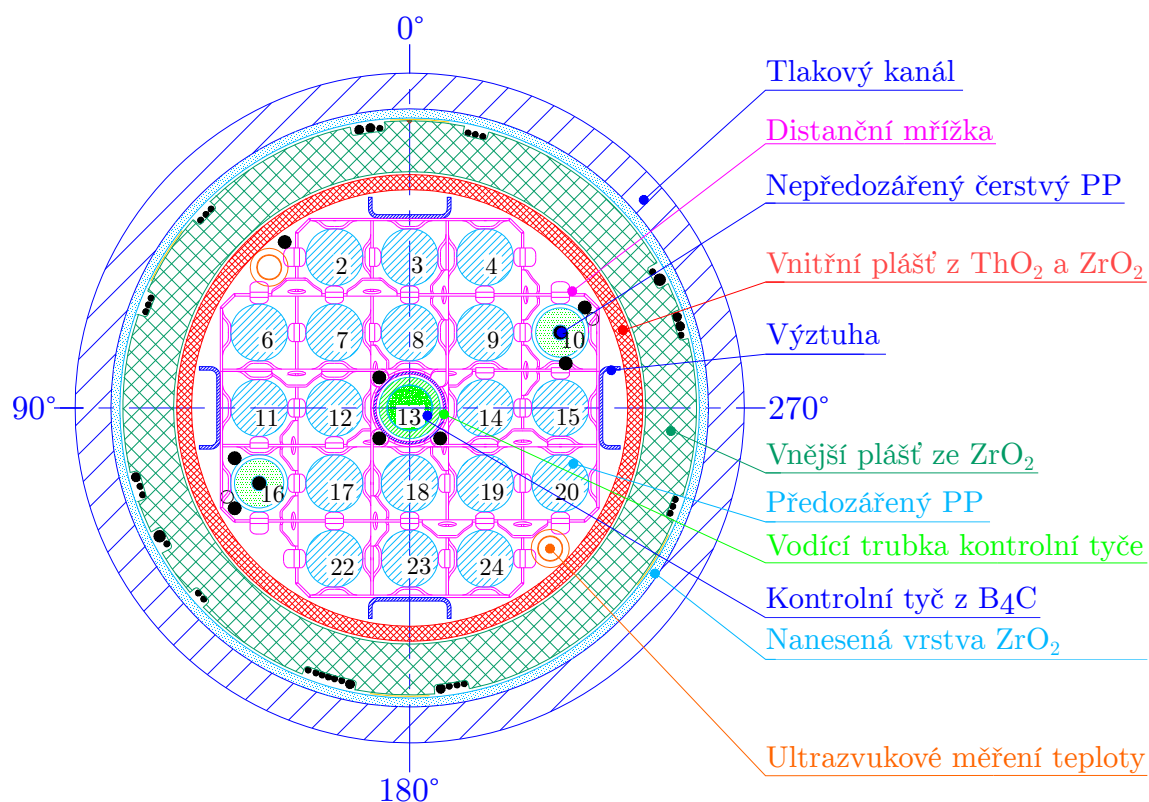
Pro test FPT-3 bylo použito celkem 18 PP předozářených v belgickém reaktoru BR3, 2 čerstvé nepředozářené PP s instrumentací a 1 AP vyrobený z materiálu B₄C. Celková výška PP činila 1,12 metru, přičemž aktivní délka palivového i absorpčního sloupce byla 1 metr. Průměrné vyhoření předozářených PP činilo 24,5 GWd/t_U. Kromě dlouhodobého ozařování v experimentálním reaktoru byly všechny PP ozařovány těsně před uskutečněním experimentu FPT-3 v reaktoru Phebus po dobu 8,5 dní, aby došlo k nahromadění odpovídajícího počátečního inventáře krátkodobých ŠP. Oba čerstvé PP byly vybavené dvěma termočlánky pro měření teploty ve středu palivových tablet a dvěma termočlánky na palivovém pokrytí. Schéma vertikálních řezů pro oba typy PP a AP lze vidět na Obr. A.1 v příloze. [15]

Palivo použité ve všech PP bylo ve formě UO₂. Předozářené PP obsahovaly palivo s obohacením 6,85 % a čerstvé PP s obohacením 4,5 %. Celková hmotnost UO₂ činila v testu FPT-3 přibližně 11 kg. Pokrytí, distanční mřížky a horní a dolní zátky všech PP tvořila slitina Zircaloy-4. [16]

Vertikální řez celým svazkem, kde jsou kótami -7 987 mm a -6 987 mm vymezeny palivové části svazku, ukazuje Obr. A.2 v příloze. Kromě souřadného systému reaktoru Phebus je v popisu experimentálního zařízení Phebus FP a při popisu vytvořeného modelu použit souřadný systém s referenční výškovou kótou k počátku palivového sloupce ve svazku, kdy výšková kóta 0 m odpovídá referenční výškové kótě -7 987 mm. Pro účely dalšího modelování byly zanedbány části PP a AP nacházející se pod touto referenční úrovní.

Uspořádání svazku PP a AP, které lze vidět na Obr. 2.2, je ve čtvercové geometrii 5x5 s roztečí 12,6 mm, přičemž rohové pozice (č. 1, 5, 21 a 25) zůstaly neobsazeny. Čtvercová geometrie byla vytvořena pomocí dvou distančních mřížek o tloušťce 43 mm, které se nachází ve výškách 240 a 760 mm nad referenční úrovní začátku palivového sloupce. Tyto mřížky jsou vloženy mezi 4 výztuhy ze slitiny Zircaloy-4, které jsou rozmístěné po obvodu svazku. V centru svazku na pozici č. 13 se nachází AP, který je vložen do vodící trubky tvořené taktéž slitinou Zircaloy-4. Navzájem diagonálně se ve svazku dále nachází 2 ultrazvukové měřiče teploty, které mohou měřit do cca 2 800 °C. Jejich vnitřní část je wolframový drát, který je chráněn rheniovým pokrytím a celý měřič je uzavřen v trubce z ZrO₂. Celý svazek je uzavřen ve vnitřním plášti z ThO₂ (do výšky -7 558 mm) a ZrO₂ (od výšky -7 558 mm), jak lze vidět na Obr. A.2. Kolem tohoto vnitřního pláště je za studeného stavu 0,5 mm široká mezera, která odděluje vnitřní plášť a vnější plášť z ZrO₂. Tento vnější plášť dále opět za studeného stavu odděluje 0,5 mm široká mezera od inkonelové trubky

tlakového kanálu o vnějším průměru 112 mm a vnitřním průměru 100 mm. Na vnitřním povrchu této trubky je nanesená 1,5 mm silná vrstva ZrO_2 . [15, 16]



Obr. 2.2: Horizontální řez palivovým svazkem, přeloženo z [17].

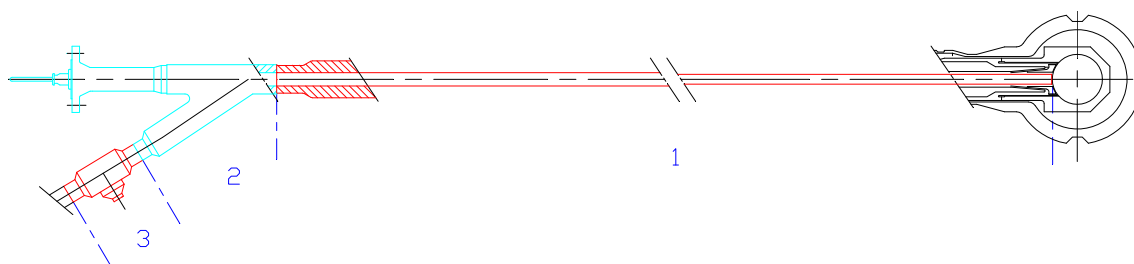
Pro udržování okrajových podmínek palivového svazku byl vnější povrch inko-nelové trubky tlakového kanálu chlazen vodou o průtoku $35 \text{ m}^3/\text{hod}$, teplotě $165 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 25 bar. Chlazení palivového svazku probíhalo přehřátou vodní parou o teplotě $165 \text{ }^\circ\text{C}$, průtoku $0,5 \text{ g/s}$ a tlaku 2 bar. Schéma na Obr. A.3 v příloze zachycuje umístění palivového svazku (aktivní části palivového sloupce odpovídá sekce B) v tlakovém kanálu v reaktoru Phebus, včetně okrajových podmínek daných průtoky tlakové vody a vodní páry. Nad kótou $-6\,987 \text{ mm}$ se nachází horní směšovací komora (sekce C), která přes tranzitní úsek (sekce D) a zúžení (sekce E) přechází ve vertikální část horké větve experimentální smyčky (sekce F) a pokračuje do ohybu (sekce G). [15]

2.2 Smyčková část experimentu FPT-3

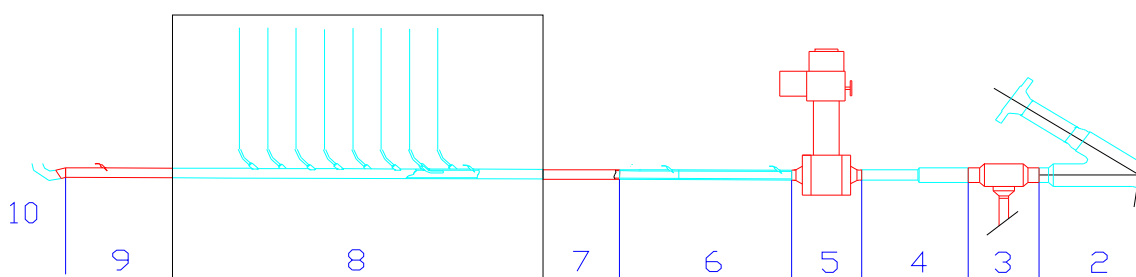
Další částí experimentálního zařízení Phebus FP je experimentální smyčka, která simuluje I.O s netěsností na studené větvi ústící do KTMT. Smyčka se skládá ze čtyř na sebe postupně navazujících částí, které reprezentují části I.O tlakovodního reaktoru v měřítku $1 : 5\,000$. Všechny části vyjma výstupu z horní směšovací komory jsou ponořeny v organické kapalině a udržovány na konstantní teplotě. [15]

První částí, kterou experimentální smyčka začíná a která se nachází nad horní oblastí palivového svazku reprezentující horní směšovací komoru (sekce C), je vertikální trubka reprezentující část horké větve I.O. Vertikální trubka je vysoká přibližně 3 m a její vnitřní průměr se postupně redukuje z 0,073 m na 0,048 m a dále na 0,03 m, jak lze vidět na Obr. A.3 (sekce D až G) v příloze. Ponořením do organické kapaliny je udržována teplota na konstantní hodnotě 700 °C. [15]

Na ohyb v sekci G navazuje jako další část experimentální smyčky horizontální část horké větve o středním vnitřním průměru 29 mm, která je dlouhá přibližně 9,8 m a je opět vyhřívána organickou kapalinou na 700 °C. Připojení této části k vertikální trubce vystupující z palivového svazku lze vidět na Obr. 2.3. Na této části experimentální smyčky se kromě horizontální trubky o délce 5,13 m (1) nachází 34° koleno ve směru proudění v horizontální rovině (2), kde dochází k dělení potrubních tras, přičemž jedna je zaslepená. Pokračování horizontální části horké větve dále do PG lze pak vidět na Obr. 2.4, kde je i vyobrazeno tzv. měřící stanoviště C (8) s vyhřívávacími filtry, které slouží k záchytu a měření proudících aerosolů v daných časových intervalech. [15]

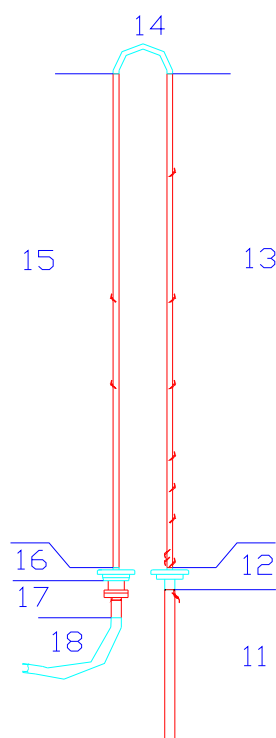


Obr. 2.3: Připojení horizontální části horké větve (1) s 34° horizontálním kolenem (2) k výstupu z ohybu vertikální trubky (vpravo) – pohled shora. [17]



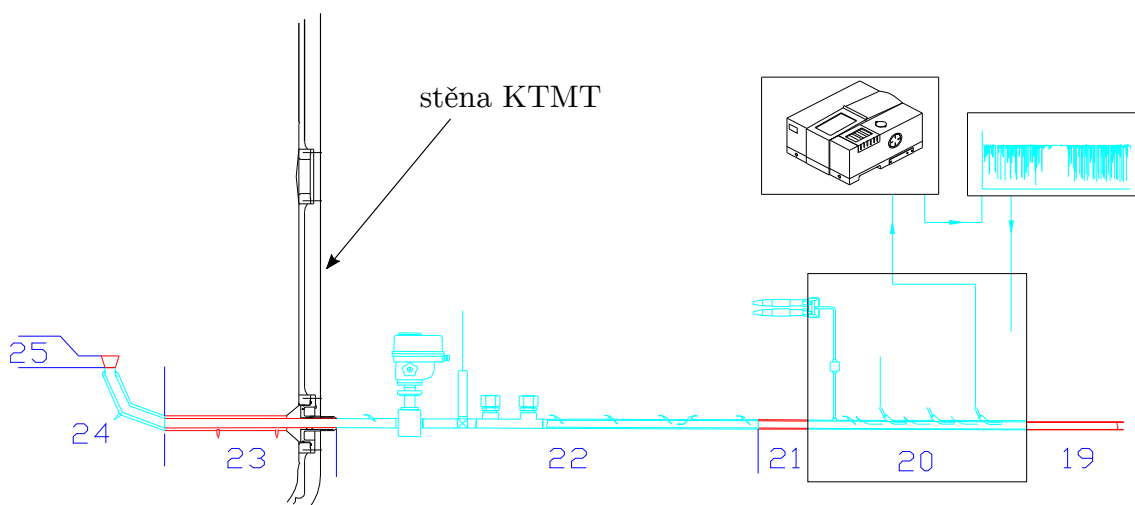
Obr. 2.4: Horizontální část horké větve experimentální smyčky s 34° horizontálním kolenem (2), měřícím stanovištěm C (8) a vstupem do PG (10). [17]

Třetí část experimentální smyčky, jejíž schéma je zobrazeno na Obr. 2.5, je vertikální U-trubka s vnitřním průměrem 20 mm a výškou 4 m. Tato část smyčky simuluje primární stranu PG a je proto z vnější strany chlazena organickou kapalinou na teplotu 150 °C. [16]



Obr. 2.5: Vertikální U-trubka simulující PG – pohled z boku [17].

Poslední část experimentální smyčky, která simuluje studenou větev I.O, tvoří opět horizontální trubka o vnitřním průměru 30 mm a přibližné délce 4 m. Tato horizontální studená větev (viz Obr. 2.6) je oproti horké větvi pootočená horizontálně o 90° a je opět chlazena na 150 °C. Na větvi je umístěno měřící stanoviště G (20), kde se měří složení proudící atmosféry, speciace jodu a velikosti a složení aerosolů. Dále studená větev kromě horizontálních spojovacích trubek zahrnuje 53° horizontální koleno (21) a výstup do nádoby REPF 502 simulující KTMT. Vstup do nádoby je tvořen vertikálním 90° kolenem (24) a je zakončen tryskou (25) rozšiřující se z vnitřního průměru 30 mm na 57 mm. [17]



Obr. 2.6: Horizontální studená větev experimentální smyčky – pohled shora [17].

Schéma na Obr. A.4 v příloze zachycuje celkový pohled na experimentální smyčku, respektive její horizontální části a PG. Číselné značení všech jednotlivých částí je v souladu s již dříve použitým značením na Obr. 2.3 až Obr. 2.6. Nakonec Obr. A.5 v příloze zachycuje pohled shora na celé experimentální zařízení, kde je patrná (vpravo nahoře) osa experimentálního kanálu s palivovým svazkem umístěná v AZ reaktoru Phebus, na ni navazující horizontální horká větev s kolenem v horizontální rovině, po které následuje měřící stanoviště C, PG, horizontální studená větev s měřícím stanovištěm G a nakonec výstup do nádoby REPF 502 reprezentující KTMT.

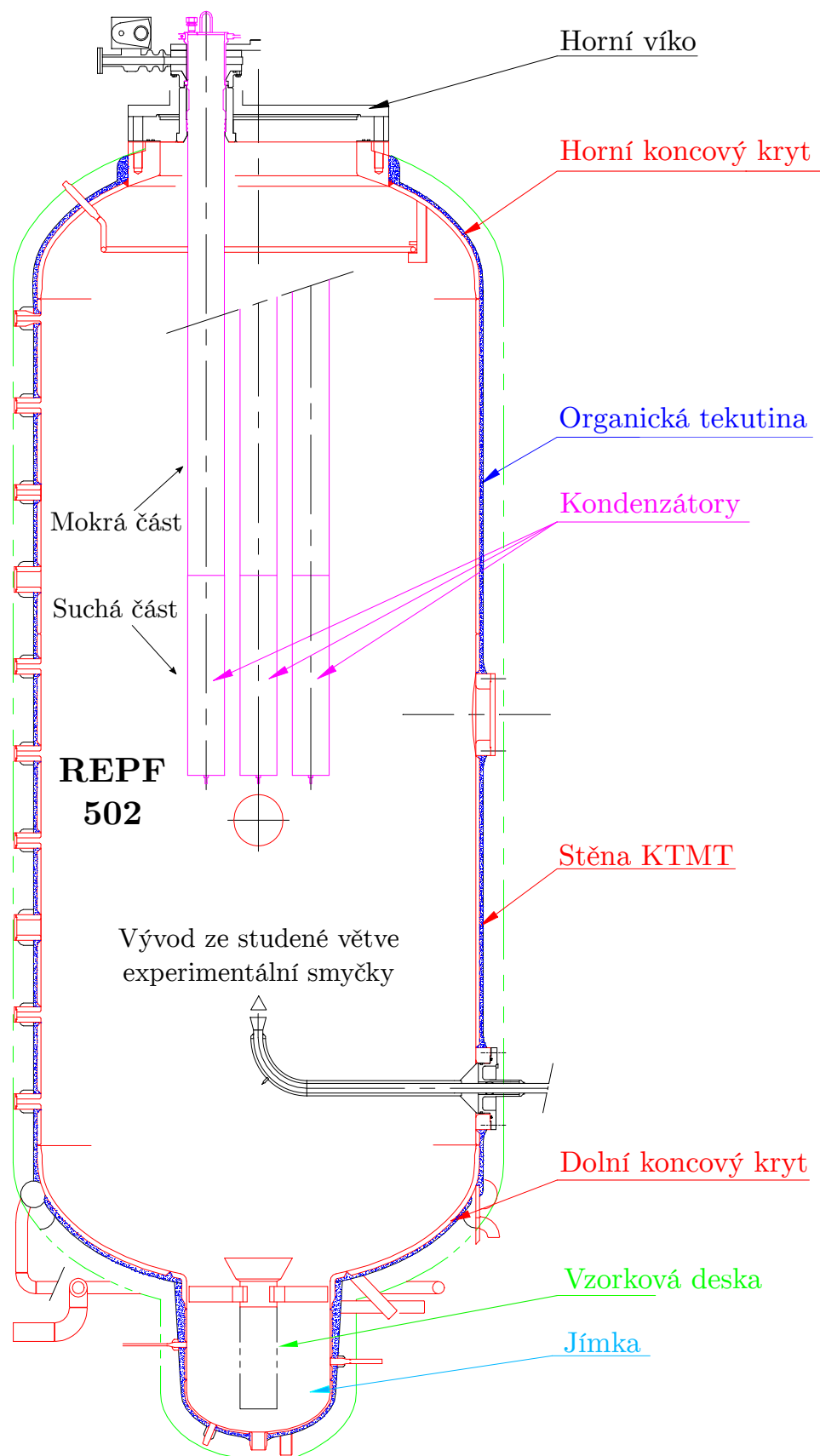
2.3 Kontejnmentová část experimentu FPT-3

Velikost nádoby REPF 502 simulující prostor KTMT, jejíž schéma lze vidět na Obr. 2.7, byla zvolena tak, aby se zachoval již dříve stanovený poměr 1 : 5 000 ve srovnání s parametry francouzského tlakovodního reaktoru o výkonu 900 MWe. Rozměry nádoby REPF 502 tudíž činily 5 m na výšku a 1,77 m ve vnitřním průměru, což odpovídá zhruba objemu 10 m³. Povrchem vnitřních stěn nádoby KTMT o přibližné ploše 25 m² byla nerezová nenatřená ocel. [15, 17]

V horní části KTMT byly umístěny tři válcové kondenzátory, na kterých mohla kondenzovat vodní pára. Tyto struktury byly celé natřeny organickými (epoxidovými) barvami, aby bylo možné zkoumání vzniku různých organických sloučenin jodu (např. CH₃I) z reakce molekulárního jodu I₂ s organickými radikály. Každý z těchto kondenzátorů byl výškově rozdělen na horní tzv. mokrou (cca 0,775 m²) a dolní tzv. suchou část (cca 0,336 m²). Teplota horní mokré části kondenzátorů byla udržována na 90 °C během degradační a aerosolové fáze² experimentu. Následně byla teplota těchto mokrých částí kondenzátorů snížena a udržována na 70 °C během fáze smývání a pak dále snížena na 65 °C při přechodu do chemické fáze. Na dolních suchých částech kondenzátorů, které plynule navazovaly na své horní mokré části, byla nejprve udržována teplota 120 °C v aerosolové fázi a následně teplota 110 °C při fázi chemické. [15, 16]

Stěny nádoby (boční stěna a horní a dolní dno) a vodní jímka, nacházející se ve spodní části nádoby, byly v průběhu experimentu taktéž udržovány na různých konstantních teplotách. Objem vodní jímky činil 0,1 m³ a její plocha hladiny byla 0,268 m². Tyto rozměry tak odpovídají poměru 1 : 5 000 ve srovnání s francouzskými tlakovodními 900 MWe reaktory. Při aerosolové fázi byla teplota vody v jímce udržována na 90 °C a teplota stěn nádoby na teplotě 110 °C. Při fázi smývání byla teplota vody v jímce snížena na 70 °C a teplota stěny zvýšena na 120 °C, při fázi chemické byla opět zvýšena teplota vody na 100 °C a teplota stěn snížena na 110 °C. [15, 16]

²Popisu zmíněných jednotlivých fází experimentu FPT-3 se více věnuje následující podkapitola.



Obr. 2.7: Schéma kontejnmentové nádoby REPF 502 s vyústěním studené větve experimentální smyčky, které tak simuluje havárii LOCA. [17].

2.4 Jednotlivé fáze experimentu FPT-3

Průběh experimentu Phebus FPT-3, který proběhl v listopadu 2004, lze z pohledu fenomenologie rozdělit na následující fáze: [15]

1. **Fáze předozařovací** – palivový svazek obsahující 18 předozařených PP v belgickém reaktoru BR3, 2 čerstvé PP s instrumentací a 1 AP z B₄C byl před samotným experimentem ozařován po dobu 8,5 dní průměrným výkonem 220 kW v reaktoru Phebus s cílem vytvořit odpovídající inventář krátkodobých ŠP v palivu. Po dokončení předozařování následovala nezbytná 37hodinová přechodová fáze pro redukci xenonové otravy reaktoru a nastavení počátečních a okrajových podmínek experimentální smyčky před zahájením další fáze testu. V tomto mezidobí mezi fázemi bylo rovněž provedeno vysušení palivového svazku za použití proudícího argonu jakožto inertního plynu.
2. **Fáze degrační** – tato fáze trvala přibližně 5 hodin a byla zahájena vstříkáním vodní páry do dna svazku a progresivním zvyšováním štěpného výkonu ve svazku kontrolovaném výkonem reaktoru Phebus³. Během experimentu byl průtok vodní páry s hmotnostním průtokem 0,5 g/s, teplotou 150 °C a tlakem 2 bary využíván k částečnému odvodu tepla ze svazku. Avšak s postupným zvyšováním štěpného výkonu svazku až na maximální hodnotu 32,8 kW se tento odvod tepla stal nedostačujícím, což vytvořilo podmínky pro oxidaci pokrytí a degradaci PP. Zvyšování výkonu probíhalo postupně přechodem mezi jednotlivými výkonovými hladinami, jak lze vidět na Obr. B.1 v příloze.

Do času 7 920 s probíhala nejprve teplotní kalibrace, po které následovalo do času 17 370 s postupné zvyšování štěpného výkonu až na výkon reaktoru Phebus 4,51 MW (32,8 kW ve svazku). Díky přívodu vodní páry byly během experimentu zaznamenány tři fáze oxidace – předoxidace od času 8 560 s, kdy je poprvé zaznamenána zvýšená produkce vodíku; hlavní tzv. *runaway* oxidace mezi časy 9 840 s až 12 400 s a pozdní oxidace mezi časy 16 757 s až 17 537 s. Od času cca 10 000 s se však během hlavní oxidační fáze projevil tzv. *steam starvation* efekt, kdy z důvodu vysoké koncentrace produkovaného vodíku byl nedostatek vodní páry pro další růst oxidační kinetiky. Po odstavení reaktoru Phebus v čase 17 370 s následovalo chladnutí palivového svazku. Během degrační fáze byl, pro sledování transportu aerosolů se ŠP, otevřen otvor z experimentální smyčky do nádoby REPF 502 simulující KTMT. Tento otvor byl následně uzavřen v čase 22 500 s, kdy započala další fáze experimentu.

³Výkon palivového svazku je svázán s výkonem reaktoru Phebus přes tzv. koeficient vazby C jako $P_S = \frac{P_R}{C} + P_Z$, kde P_S je celkový výkon svazku, P_R je výkon reaktoru Phebus a P_Z je zbytkový výkon ve svazku, který je zhruba řádově menší než $\frac{P_R}{C}$ v průběhu celého experimentu.

3. **Fáze aerosolová** – tato fáze trvající 37 hodin začala izolací nádoby REPF 502 simulující KTMT v čase 22 500 s. Účelem této fáze bylo sledování a analýza mechanismů usazování aerosolů, jak sedimentací gravitačním zrychlením ve vodní jímce a na dně KTMT, tak depozicí na stěnách. Fáze probíhala za identických termohydraulických podmínek v KTMT jako fáze degradační a trvala do času 151 920 s, kdy bylo dosaženo fyzikálně-chemické rovnováhy v produkci plynného jodu. V důsledku poklesu parciálního tlaku vodní páry bylo kondenzování na horní mokré části kondenzátorů ukončeno již v čase 27 660 s, neboť byl jejich povrch udržován na teplotě 90 °C. Teplota stěn a dna KTMT byla udržována na 110 °C, suchá dolní část kondenzátorů na teplotě 120 °C a vodní jímka na teplotě 90 °C.
4. **Fáze smývání** – příprava termohydraulických podmínek, trvající 9 hodin, začala v čase 151 920 s. Během této přípravy došlo ke snížení teploty vody ve vodní jímce z 90 °C na 70 °C s cílem minimalizovat vypařování vody. Stejně tak byla snížena teplota mokré části kondenzátoru na 70 °C za účelem podpory lokální kondenzace. Současně byly udržovány teploty stěn nádoby KTMT a suché části kondenzátoru na 120 °C, což minimalizovalo kondenzaci. Teplota dna KTMT byla nastavena na 100 °C, aby se minimalizovalo vypařování vodního filmu během smývání.

Úpravy termohydraulických podmínek během přípravy přispěly k minimalizaci vypařování vody a zajištění správných okrajových podmínek. Samotný proces smývání proběhl mezi 183 660 s a 184 440 s a jeho hlavním účelem bylo smývání radioaktivních aerosolů usazených na dolním koncovém krytu nádoby KTMT a jejich přesun do vodní jímky. Takto mohl být využit jejich radiolytický potenciál v následující chemické fázi.

5. **Fáze chemická** – fáze byla rozdělena do dvou částí – přípravné a samotné chemické fáze. Příprava termohydraulických podmínek, trvající 7 hodin až do času 211 260 s, předcházela samotnému spuštění chemické fáze, která probíhala celkově po dobu přibližně 2 dnů od času 186 960 s do 386 340 s. Během přípravy byly upraveny teploty v nádobě KTMT s cílem nastavit požadované okrajové podmínky. Teplota mokré části kondenzátoru byla snížena na 65 °C, zatímco teploty suché části kondenzátoru a stěn nádoby KTMT byly nastaveny na 110 °C a teplota vody ve vodní jímce byla udržována na 100 °C. Tato úprava umožnila vytvoření nuceného cyklu odpařování/kondenzace s rychlostí 0,73 g/s, který podporoval přenos jodu mezi jímkou a atmosférou v nádobě KTMT po celou dobu chemické fáze. Současně bylo pH vodní jímky nastaveno na předem stanovenou hodnotu 5.

Cílem této fáze bylo podrobně zkoumat chemii vodní jímky a atmosféry za podmínek simulujících TH lehkovodního reaktoru, zejména speciaci jodu a jeho chování za podmínek radiolýzy.

V rámci mezinárodní srovnávací úlohy (tzv. *benchmarking*) na průběh experimentu Phebus FPT-3 je tento experiment rozdělen do 4 fází, které však převážně odpovídají posledním 4 fázím uvedeným výše. Počáteční nulový čas je opět definován jako začátek degradační fáze. Konec prvních dvou fází je v okamžiku uzavření otvoru do nádoby REPF 502 simulující KTMT. Konec třetí fáze je dán ukončením procesů depozice aerosolů v nádobě KTMT a konec čtvrté fáze odpovídá konci celého experimentu. Toto rozdělení v rámci *benchmarku* je provedeno s cílem jasně stanovit časové a prostorové hraniční parametry jednotlivých fází experimentu pro uskutečnění a následné porovnání výpočetních analýz. Tyto analýzy lze provádět buď jako integrální pro celý průběh experimentu, nebo odděleně pro každou fázi samostatně. Specifikované fáze v rámci *benchmarkingu* jsou následující: [16]

1. **Fáze svazková** – 0 s až 22 500 s: Palivový svazek (axiálně 0–1,0825 m, radiálně 0–0,056 m v souřadném systému modelu).
2. **Fáze smyčková** – 0 s až 22 500 s: Experimentální smyčka (od výškové kóty 1,0825 m ve svazku až po vstup do KTMT).
3. **Fáze kontejmentová** – 0 s až 50 000 s: Vnitřní stěny a atmosféra nádoby KTMT, vodní jímka, kondenzátory.
4. **Fáze chemická** – 0 s až 386 340 s: Vnitřní stěny a atmosféra nádoby KTMT, vodní jímka, kondenzátory.

2.5 Výsledky experimentu FPT-3

Nejpodstatnější výsledky experimentu Phebus FPT-3 jsou stručně shrnuty ve zprávě specifikující zadání *benchmarku* [16]. Kompletní soubor výsledků je obsažen v konečné zprávě experimentu [15]. V této části budou představeny pouze klíčové výsledky, které ilustrují průběh experimentu, termohydraulickou odezvu experimentální smyčky představující I.O, transport ŠP v I.O a chemii a speciaci jodu na stěnách, v atmosféře a ve vodní jímce KTMT. Tyto dílčí výsledky byly pečlivě vybrány s ohledem na jejich důležitost a schopnost ilustrovat některé nejvýznamnější poznatky z experimentu Phebus FPT-3.

Tabulka 2.2 stručně a přehledně mapuje hlavní události v průběhu degradační fáze experimentu. Kromě časového sledu těchto událostí poskytuje tabulka také doplňující informace o teplotě, hmotnosti nebo výškové elevaci v souřadném systému modelu, v nichž tyto události nastaly.

Tab. 2.2: Přehled hlavních událostí během degradace svazku, upraveno z [16].

Událost	Veličina	Hodnoty
První porušení pokrytí	Čas; Elevace	4 870 s; 0,5 m
Počátek oxidace (>1 % celk. produkce H ₂)	Čas	8 560 s
Počátek úniku ŠP (>1 % Xe uvolněno)	Čas	9 700 s
Selhání AP	Čas; Elevace	9 550 s; 0,5 m
První relokace materiálu	Čas	~14 100–14 700 s
	Elevace	0,45–0,70 m
První oxidační pík teploty	Čas; Teplota	9 840 s; 2 490 K
Celková hmotnost H ₂	Hmotnost	120 g

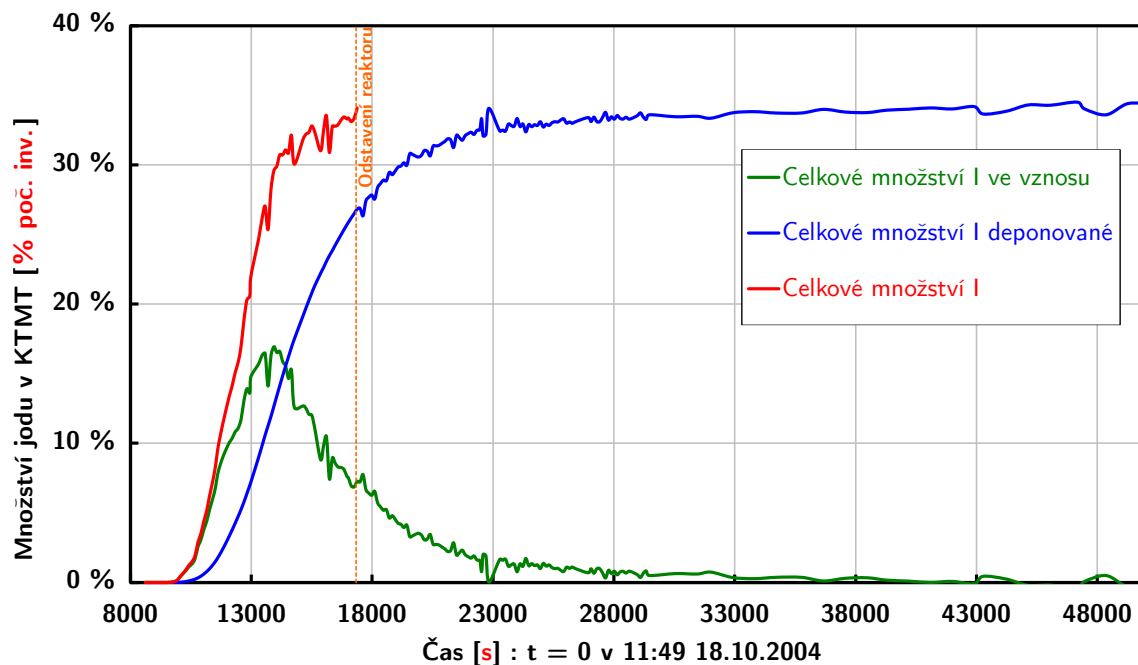
Graf na Obr. B.2 v příloze uvádí časový vývoj teploty páry v různých vzdálenostech od vstupu do PG. Graf je dále doplněn o historii výkonu reaktoru Phebus a průběh koncentrace vodíku ve studené větvi experimentální smyčky (měřící stanoviště G). Na grafu je patrné, že až do počátku oxidace v čase 8 560 s jsou teploty přibližně konstantní a v jednotlivých měřících stanovištích klesají se vzdáleností od počátku PG. Díky ponoření horké větve do organické kapaliny je teplota vodní páry v této části smyčky udržována na úrovni 700 °C, zatímco stěny PG jsou chlazeny organickou kapalinou na teplotu 150 °C. To vede k postupnému snižování teploty chladiwa na tuto hodnotu. Od počátku hlavní oxidace se teplota plynů, které protékají PG, postupně snižuje ve všech měřených úsecích. Tento pokles teploty koreluje se zvýšenou produkcí vodíku, který během vrcholu své produkce dosahuje koncentrace až téměř 100 %. Díky vyšší tepelné vodivosti vodíku oproti vodní páře dochází k efektivnějšímu přenosu tepla z chladiwa do stěn PG, jež jsou chlazeny na teplotu 150 °C. To vede k poklesu teploty protékajících plynů. Důvod, proč nedošlo k opětovnému zvýšení teploty plynů na původní hodnotu po poklesu koncentrace vodíku v dalších částech degradační fáze, nebyl zcela objasněn.

Tabulky B.1 a B.2 poskytují přehled o distribuci jednotlivých skupin chemických prvků (vzácné plyny, ŠP, materiály kontrolní tyče, konstrukční materiály a palivo) v rámci jednotlivých částí experimentálního zařízení na konci degradační fáze. Svazková část je dále rozdělena na palivový svazek, horní směšovací komoru a vertikální trubici, následované horkou větví, PG a studenou větví. Bylo měřeno jak deponované množství jednotlivých prvků ve svazkové části a PG, tak deponované a prošlé množství ve studené a horké větvi, konkrétně v měřících stanovištích C a G. Procentuální hodnoty uvedené v Tab. B.2 jsou vypočteny z počátečního inventáře. Metodami zjišťování množství jednotlivých prvků byla gamma-spektrometrie a IPC-MS (*Inductively Coupled Plasma — Mass Spectrometry*). Z dat vyplývá významné množství uvolněných vzácných plynů a významná retence prvků ve studené a horké větvi.

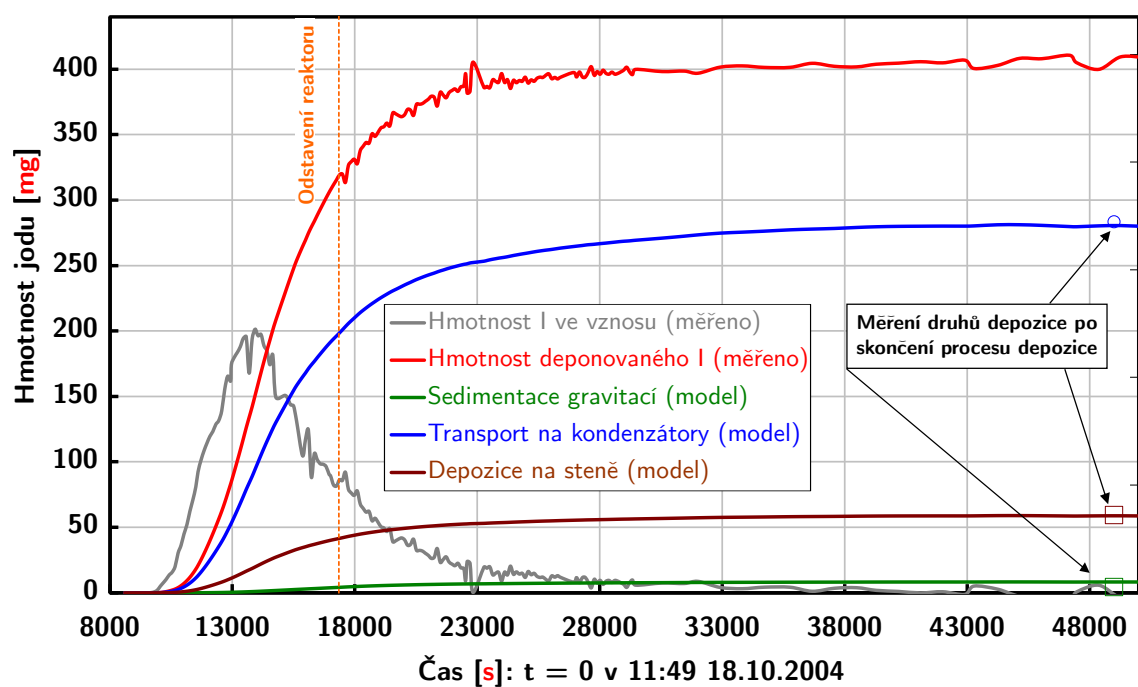
Graf na Obr. 2.8 zobrazuje časový vývoj jodu, konkrétně radionuklidu ^{131}I , v atmosféře KTMT během pokročilé degradační fáze a počátku aerosolové fáze. Z červené křivky, znázorňující celkové množství jodu v KTMT, vyplývá, že do okamžiku odstavení reaktoru do KTMT uniklo přibližně 34 % počátečního inventáře ^{131}I , což odpovídá údajům o transportu jodu skrz studenou větev v Tab. B.2. Množství jodu ve vzhledu v KTMT je znázorněno zelenou křivkou, zatímco modrá křivka reprezentuje množství deponovaného jodu. Tyto křivky zahrnují celkové množství jodu, ať už ve formě aerosolů či organických či anorganických plynů. Množství jodu v atmosféře KTMT bylo měřeno metodou gamma-spektrometrie, udávající celkové množství ^{131}I nezávisle na jeho chemické formě, a vzorkováním atmosféry ve vzorkovacích stanicích s filtry.

Jedním z významných poznatků bylo zjištění, že radionuklid ^{131}I vykazoval rychlejší usazování než ostatní gamma-zářiče, jako například ^{137}Cs , ^{99}Mo nebo ^{132}Te . Dále analýza filtrů ukázala, že jod se do KTMT dostává především ve formě plynu, nikoliv jako aerosol (např. CsI), což se liší od předchozích FPT testů, kde jako materiál AP byla použita slitina Ag-In-Cd. Tento výsledek lze vysvětlit jednak absencí slitiny Ag-In-Cd, jejíž složky (Ag a Cd) často s jodem vytvářejí sloučeniny, a také vysokou koncentrací kyseliny borité pocházející z oxidace B_4C , která může vázat cesium a bránit tvorbě CsI .

Graf na Obr. 2.9 zobrazuje časový vývoj usazování jodu v KTMT. Červená a šedivá křivka představují výsledky měření celkového množství usazeného jodu a jodu ve vzhledu v KTMT. Graf dále obsahuje průběžné výsledky modelování procesů depozice jodu, které zahrnují sedimentaci, transport na kondenzátory a depozici na stěnách KTMT. Tyto modelované výsledky byly následně ověřeny porovnáním s výsledky měření.



Obr. 2.8: Časový vývoj jodu v atmosféře KTMT, přeloženo z [16].



Obr. 2.9: Časový vývoj depozice jodu v KTMT, přeloženo z [16].

Kapitola 3

Integrální kód ASTEC

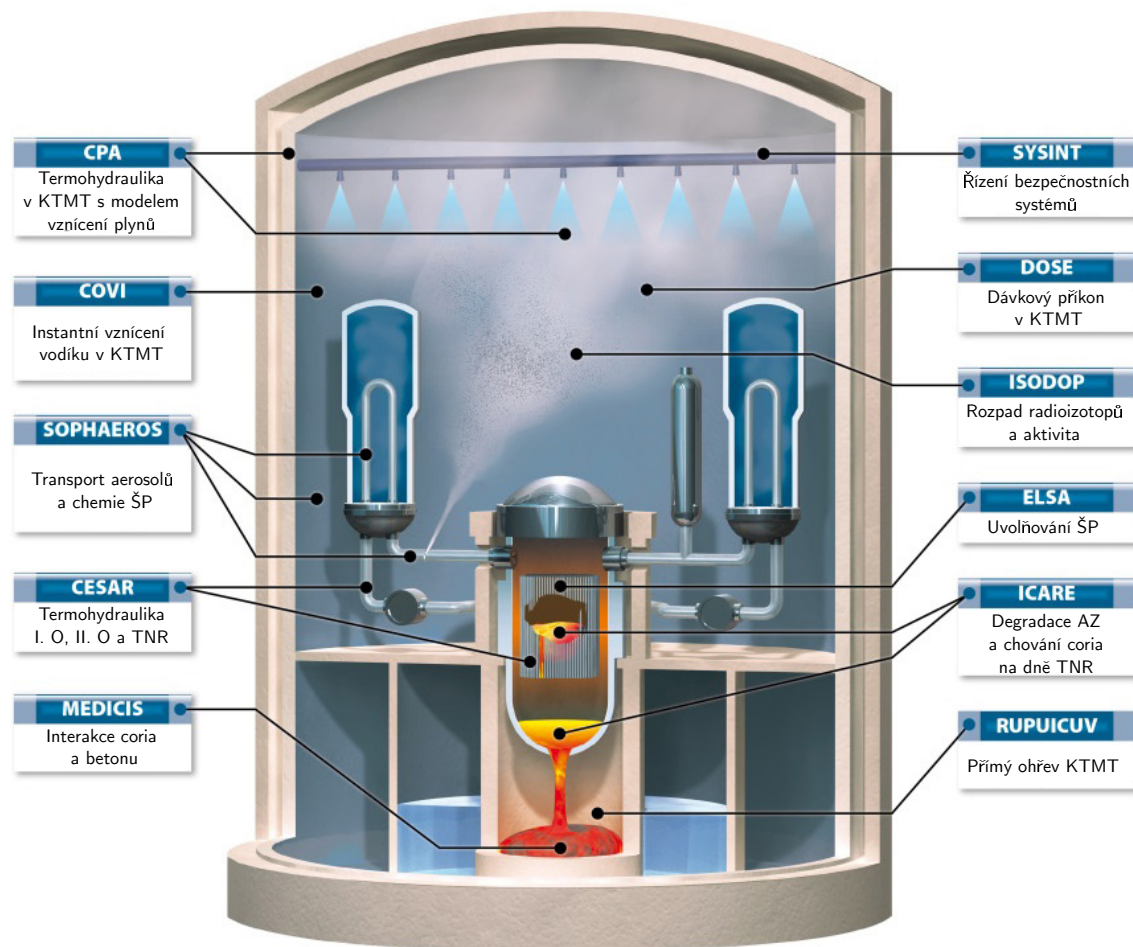
Kód ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) je integrální výpočetní kód, který je vyvíjený a udržovaný francouzským institutem IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire). Primárním využitím kódu ASTEC je modelování lehkovodních jaderných reaktorů. Integrální kód umožňuje simulovat všechny jevy po celou sekvenci TH od iniciační události až po únik ŠP z KTMT (s výjimkou některých vysoce-energetických jevů, jako jsou například parní exploze, detonace vodíku a strukturní mechanika). Při simulaci však kód pracuje s jistými zjednodušenými modely pro termomechanické namáhání komponent AZ a dna tlakové nádoby reaktoru – konkrétně s modelem *creepu* a plastickou deformací. Dále kód umožňuje i modelování bezpečnostních systémů a různých zásahů dle návodů pro zvládnutí TH. Kód se především využívá pro deterministické bezpečnostní analýzy, získání zdrojového členu pro pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti 2. úrovně a pro studie účinnosti opatření pro zvládnutí havárií. [5, 18]

V průběhu svého vývoje se kód ASTEC postupně stal evropským referenčním kódem pro TH lehkovodních jaderných reaktorů. Kód byl udržován a vyvíjen díky využívání znalostí sdílených v síti SARNET (*Severe Accident Research Network of Excellence*), nyní probíhá vývoj kódu zcela v gesci IRSN. Současně nejnovější verze kódu ASTEC V3, kterou byly provedeny výpočty této práce, byla vyvinuta i s přispěním výstupů z projektu NUGENIA ASCOM. [5, 19]

Součástí validace kódu jsou dále jak testy na experimentech separátních či spojených efektů (např. projekt ThAI [20]), tak i na integrálních a *in-pile* experimentech, včetně již dříve zmíněného programu Phebus [1]. Nakonec poslední významnou složkou validace jsou pravidelná porovnání výsledků vůči existujícím datům z již proběhlých TH jako byla v roce 2011 havárie Fukushima Daiichi [3] nebo nehoda Unit 2 na Three Mile Island v roce 1979. [5, 21]

3.1 Struktura kódu a průběh výpočtu

Struktura kódu ASTEC, jež je zobrazena na Obr. 3.1, je tzv. modulární. Každý z těchto modulů kódu simuluje jinou skupinu fenoménů během výpočtu sekvence TH nebo pomáhá obstarávat řízení výpočtu a výměnu dat mezi moduly. Kromě modulů disponuje ASTEC dále vlastní databází materiálů a jejich vlastností.

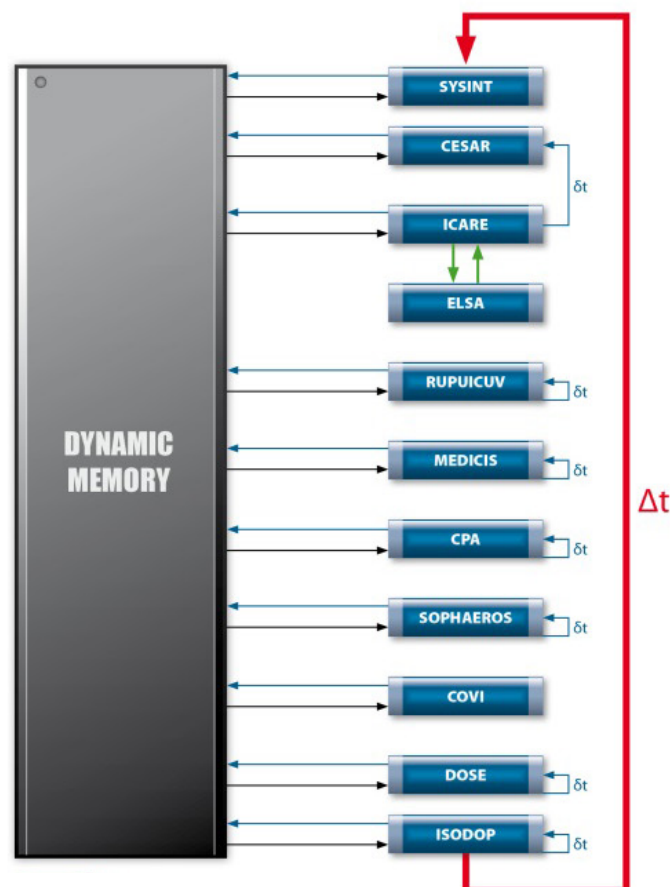


Obr. 3.1: Schéma části modulární struktury kódu ASTEC, upraveno z [18].

Naprostá většina kódu je psána v programovacích jazycích C a Fortran. Jednotlivé moduly je možno spouštět provázaně nebo odděleně, což je vhodné pro jejich validaci. Toto provázání nebo-li tzv. *coupling* modulů je prováděno explicitně, kdy si v rámci jednoho časového makro-kroku Δt moduly postupně v předem daném pořadí, které lze vidět na Obr. 3.2, provádí své výpočty s vlastním časovým krokem δt a sdílejí aktualizované hodnoty proměnných do dynamické paměti. [5, 18]

Samotný vstup pro kód ASTEC je ve formě textového souboru, ve kterém se zadávají tzv. struktury. Každá tato struktura má předem definované povinné a nepovinné parametry nebo i další podstruktury, kterým musí uživatel přiřadit hodnoty

v odpovídajícím formátu. Struktury mohou reprezentovat jak fyzické komponenty a systémy jaderné elektrárny, tak fyzikální modely nebo nastavení výpočtu.



Obr. 3.2: Výpočetní proces kódu ASTEC během časového kroku, upraveno z [18].

Kód ASTEC užívá tzv. sdružených parametrů, neboť kód musí modelovat velké množství jevů, které probíhají v různých okamžicích sekvence TH. Tento typ kódu používá relativně hrubou prostorovou diskretizaci, kdy části AZ, I. a II.O a KTMT jsou rozděleny do tzv. nódů (konečných kontrolních objemů), ve kterých jsou spočteny zvláště výstupní veličiny (např. teplota, tlak či hmotnost ŠP). Prostor KTMT společně s I.O a II.O je zpravidla reprezentován řádově 10 až 50 takovými objemy. Oproti tomu pro modelování prostoru AZ se užívá jemnější nodalizace v dvoudimenzionální (2-D) axisymetrické r-z geometrii běžně s 4 až 6 radiálními prstenci a 10 až 20 axiálními úrovněmi. Vhodné zvolení nodalizace závisí na typu úlohy, a tudíž zkušenost uživatele hraje při tvorbě modelu významnou roli. [5, 8]

Jednotlivé nody prostorové diskretizace (0-D kontrolní objemy) jsou pro přenos materiálů, energií a případně ŠP pospojovány pomocí tzv. spojek, kterými jsou *JUNCTION* v I.O a II.O resp. *CONNECTION* v rámci propojení zón v KTMT. Tyto spojky samotné neobsahují žádný materiál – pouze ho přenášejí. Okrajové pod-

mínky a propojení mezi jednotlivými moduly kódu jsou zadávány pomocí struktury *CONNECTI*. Pomocí této struktury jsou tedy definovány jak propojení mezi oblastí TNR a I.O, tak i tepelné ztráty z povrchu hlavního cirkulačního potrubí do KTMT či možné roztěsnění I.O (v případě havárie typu LOCA). [5, 22, 23]

3.2 Popis vybraných výpočetních modulů

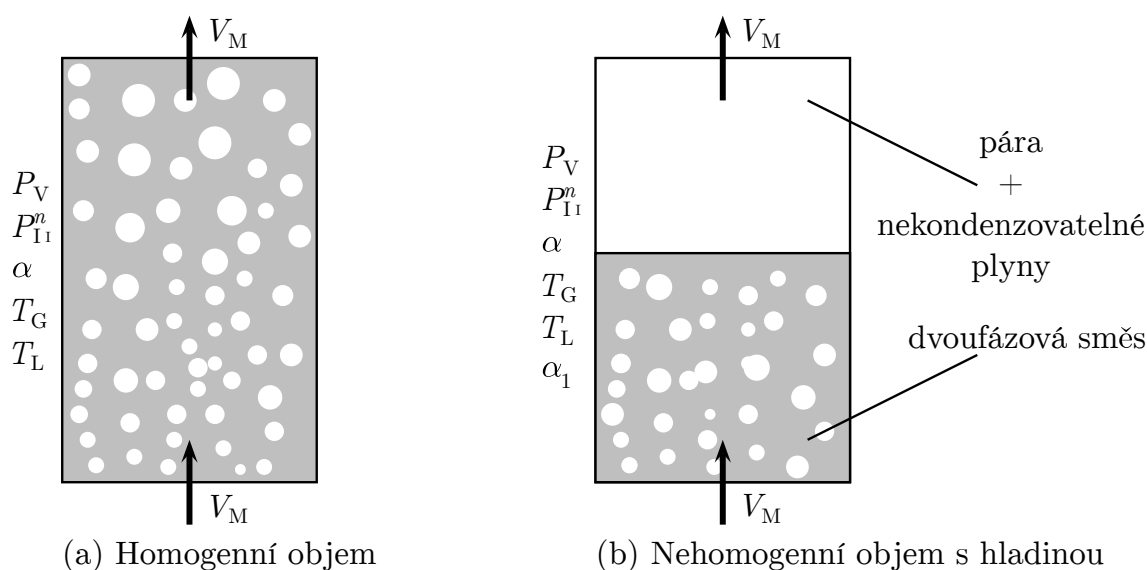
Pro většinu hlavních modulů kódu ASTEC jako je např. CESAR nebo SOPHAEROS existují dedikované uživatelské manuály obsahující přehled a význam možných vstupních parametrů pro struktury daného modulu a teoretické manuály, které obsahují výčet a význam rovnic, modelů a korelací používaných daným modulem. Součástí instalace kódu je kromě těchto manuálů a ukázkových vstupů i interaktivní databáze všech vstupních parametrů, struktur a výstupních veličin. Integrální kód ASTEC se tak mj. skládá z následujících modulů: [5, 18]

CESAR

Modul CESAR užívá metody konečných objemů a řeší termohydrauliku dvoufázového 1-D proudění mezi jednotlivými nody v kódu ASTEC jako systém „5+N“ nebo „6+N“ rovnic – 2 rovnice kontinuity (z čehož 1 pro kapalinu – vodu, 1 pro páru a až N rovnic pro N nekondenzovatelných plynů, 2 rovnice zachování energie (z čehož 1 pro kapalinu a 1 pro atmosféru (pára a nekondenzovatelné plyny)); tj. jednotlivé plyny se nacházejí v termodynamické rovnováze) a 2 nebo 1 rovnice zachování hybnosti v závislosti na tom, zda je nebo není uvažována jedna společná rovnice pro obě fáze. Pro každý objem tak může být uvažován buď homogenní model, nebo nehomogenní model⁴, kde jsou fáze média od sebe jasně odděleny, jak lze vidět na Obr. 3.3. Součástí vstupu jsou i počáteční podmínky jako je teplota, tlak či hmotnostní tok mezi jednotlivými objemy. Většina tohoto modulu vychází z korelací užitých ve francouzském termohydraulickém kódu CATHARE2 [24].

Kontrolní objemy v nodalizaci reprezentuje struktura *VOLUME*. Tyto 0-D objemy jsou vzájemně propojeny pomocí struktur *JUNCTION*. Sada propojených objemů takto tvoří jeden z možných okruhů např. *PRIMARY*. Tepelné struktury, které zpravidla mají význam stěn potrubního systému daného okruhu nebo např. teplosměnné plochy trubiček PG, reprezentují struktury *WALL*. Pro zjednodušení definice delších úseků potrubí existuje struktura *PIPE* (přecházející v úsecích na přístup 1-D oproti běžným 0-D kontrolním objemům), která generuje sadu automaticky propojených objemů, ke kterým může být hromadně přiřazena i tepelná struktura *WALL*. [22]

⁴Nehomogenní modely je doporučeno používat pouze pro objemy, kde je předpoklad vodní hladiny a kde je atmosféra nad ní blízká teplotě saturace (např. sekundární strana PG).



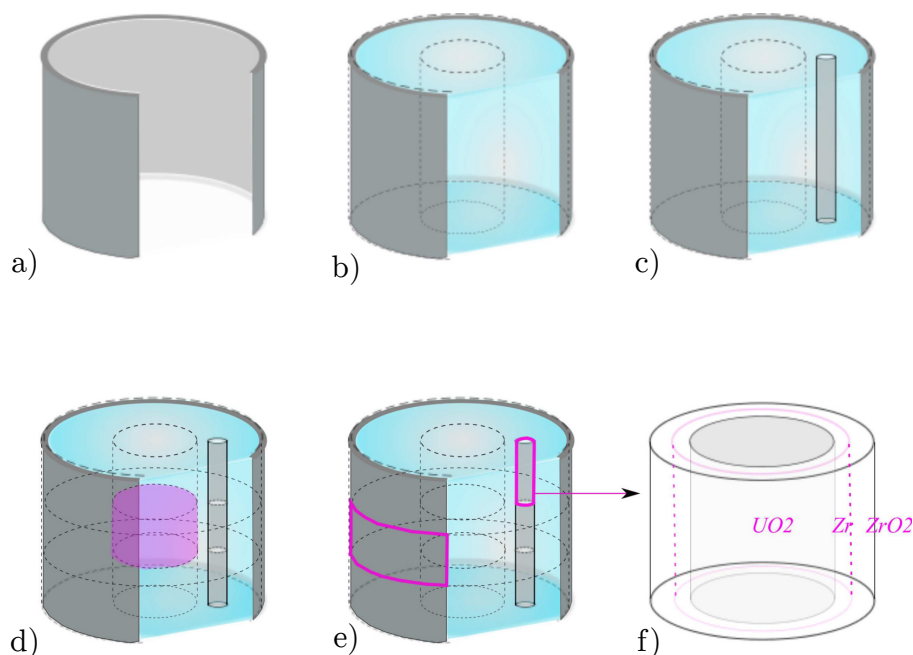
Obr. 3.3: Homogenní a nehomogenní objem v modulu CESAR, kde P_V je tlak páry, P_I^n je parciální tlak daného plynu, α je objemový podíl páry a plynů, α_1 objemový podíl páry a plynů pod hladinou, T_G resp. T_L je teplota atmosféry resp. kapaliny a V_M je rychlost proudění směsi, přeloženo z [22].

ICARE

Modul ICARE simuluje ranou i pozdní fázi degradace komponent AZ do selhání dna TNR nebo až do momentu stabilizace *coria* v případě strategie zadržení taveniny uvnitř reaktorové nádoby. Vzhledem k velkému počtu komponent a složitosti a heterogenosti geometrie degradované AZ během výpočtu je prostorová diskretizace AZ v r-z axisymetrické geometrii jemnější než v případě nodalizace I.O nebo KTMT. Pro dělení do radiálních prstenců slouží struktura *CHANNEL*, zatímco axiální diskretizace je provedena pomocí struktury *DISC*. Pevné struktury přítomné v AZ, jako jsou např. palivové sloupce, Zr pokrytí, regulační orgány a všechny ostatní vnitroreaktorové komponenty, jsou modelovány pomocí tzv. makro-komponent, kterým je přiřazen materiál a rozměry. Příklad diskretizace AZ a užití makro-komponent pro definici PP je zobrazen na Obr. 3.4. Kromě popisu AZ umožňuje modul také nastavení oxidace a degradace komponent, které mj. zahrnuje jevy oxidace pokrytí, deformaci a nafukování (tzv. *ballooning*) PP, relokace *coria* nebo pevných trosk a *creep*. Součástí počátečních podmínek v modulu může být zadání počátečního inventáře a zbytkového výkonu ŠP. [25]

SYSINT

Modul SYSINT umožňuje uživateli jednoduchou formou namodelovat inženýrské bezpečnostní systémy jako jsou systémy nízkotlakého nebo vysokotlakého doplňování, systém sprchování KTMT nebo rekombinátory vodíku.



Obr. 3.4: Význam struktur a komponent AZ v modulu ICARE: a) makro-komponenta reprezentující stěnu TNR, b) radiální rozdělení strukturami *CHANNEL*, c) PP definovaný pomocí makro-komponenty, d) axiální dělení úrovní, e) diskretizace struktury dle nodalizace a f) vlastnosti materiálu dané struktury. Přeloženo z [25].

CPA

Modul CPA řeší termohydrauliku v prostoru KTMT a to včetně problematiky vznícení vodíku. Obdobně jako modul CESAR používá modul CPA metody konečných objemů a přístupu sdružených parametrů. Celý prostor KTMT je diskretizován do kontrolních objemů reprezentovaných strukturou *ZONE*, které jsou mezi sebou vzájemně propojeny strukturou *CONNECTION* a mohou obsahovat tepelné struktury *WALL*. Modul počítá postupný nárůst teploty, tlaku nebo hmotností plynů v KTMT a stejně tak i jejich lokální distribuci. Každý objem může být uvažovaný jako rovnovážný homogenní nebo jako nerovnovážný nehomogenní, přičemž přístup s nerovnovážným modelem samotné IRSN silně doporučuje. [23]

ELSA

Modul ELSA počítá uvolňování ŠP a materiálu ze zdegradované AZ během sekvence TH, a proto je úzce propojen s modulem ICARE. Skupiny ŠP se dělí na tři kategorie:

- Volatilní (např. Xe, Kr, I nebo Cs) – uvolnění je pomocí intragranulární difuze skrze zrna UO_2 . Některé prvky mohou být zachyceny v palivovém pokrytí v závislosti na teplotě a tloušťce oxidické vrstvy.
- Semi-volatilní (např. Ba nebo Mo) – uvolnění může být skrze vypařování z porozit paliva nebo s přenosem hmoty.
- Nízko-volatilní (např. U nebo Pd) – uvolnění je možné jen s vypařováním částí paliva v momentě pokročilé degradace.

SOPHAEROS

Modul SOPHAEROS během výpočtu sekvence TH simuluje fyzikální transport (usazování, kondenzaci, aglomeraci, sorpci – fyzikální i chemickou, resuspenzi, vypařování, atd.) a chemické chování ŠP. Ty jsou uvažovány ve formě aerosolů či par, a to v celkem 12 stavech: páry ve vznosu, páry zkondenzované, aerosoly ve vznosu, aerosoly usazené, páry sorbované na strukturách a ŠP rozpuštěné ve vodních jímkách. Těchto prvních 6 stavů se týká všech ŠP. Následujících 6 stavů se týká chemických sloučenin jodu: chemické sloučeniny jodu sorbované na natřených strukturách (suchých/pod vodou), chemické sloučeniny jodu sorbované na betonových strukturách (suchých/pod vodou) a chemické sloučeniny jodu sorbované na ocelových strukturách (suchých/pod vodou). Chování ŠP je modelováno v celém systému a to včetně KTMT.

Ve výchozím nastavení modulu se vychází z nodalizace použité modulem CESAR, ale uživatel může pro snížení výpočetního času zadat pro modul více hrubé dělení. Pro jod v KTMT jsou uvažované chemické reakce (termické, radiolytické a reakce s přenosem hmoty) popsány kineticky. Druhy jodu uvažované v reakci jsou mj. I_2 , CH_3I , I_2O_5 , I^- , IO_3^- , HOI , CsI a AgI , kdy CH_3I reprezentuje všechny organické formy, jelikož je z nich nejvíce volatilní. [26]

ISODOP

Modul ISODOP simuluje rozpad ŠP a aktinoidů v jednotlivých částech systému. Jejich distribuce vychází z výpočtů modulu SOPHAEROS. Modul umožňuje výpočet zbytkového výkonu a aktivity ŠP ze zadaného počátečního inventáře ŠP. Fyzikální konstanty a vlastnosti radionuklidů vycházejí z knihovny jaderných dat JEFF-3.1.1 [27]. [28]

Kapitola 4

Model experimentu Phebus FPT-3

Tato kapitola popisuje vytvořený model experimentálního zařízení Phebus FPT-3 v současně nejnovější verzi kódu ASTEC V3. Vzhledem k zadání a zaměření této akademické práce na provedení integrálního validačního výpočtu všech čtyř již dříve zmíněných fází experimentu, zahrnuje vytvořený model experimentu FPT-3 jak palivový svazek, tak experimentální smyčku simulující I. O a KTMT. Vstupní model dále odpovídá i specifikacím pro rovněž již dříve zmíněný *benchmark* [16] experimentu Phebus FPT-3. V následujících podkapitolách budou popsány modely palivového svazku, experimentální smyčky a model nádoby simulující KTMT. Dále budou v příslušných částech uvedeny i použité doplňující modely, jejich parametry a okrajové podmínky.

4.1 Model palivového svazku

Palivový soubor, jehož schéma lze vidět na Obr. 4.1, byl v modelu ICARE rozdělen do 2 radiálních prstenců o vnějším průměru 20,9 mm a 73 mm a 18 axiálních úrovní, které svými středy odpovídají pozicím instrumentace měření, pro co nejvíce přesné porovnání naměřených a vypočtených parametrů. Výjimkou je nodalizace oblasti přechodu mezi materiály vnitřního pláště, která bude vysvětlena později, a horní části svazku, pro kterou byla zvolena jemnější nodalizace korespondující s výškovými rozměry zde definovaných makro-komponent. Jako výšková referenční kóta byl zvolen počátek palivového sloupce ve svazku, kdy výšková kóta 0 m v modelu odpovídá referenční výškové kótě $-7\,987$ mm ve výkresech.

Absorpční proutek, jeho pokrytí a vodící trubka v centrální pozici č. 13 byly modelovány každý jako jedna makro-komponenta z příslušného materiálu. Předozážené PP byly rozděleny do dvou makro-komponent FUEL-IR1 a FUEL-IR2 z UO_2

přičemž první jmenovaná reprezentovala vnitřní PP na pozicích č. 7, 8, 9, 12, 14, 17, 18 a 19 a byla umístěna v prvním radiálním prstenci. Druhá makro-komponenta reprezentovala vnější předozářené PP na pozicích č. 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23 a 24 a byla umístěna v druhém radiálním prstenci. Obě dvě makro-komponenty měly příslušnou tzv. váhu odpovídající počtu PP, které reprezentovaly. Čerstvé PP na pozicích č. 10 a 16 byly reprezentované makro-komponentou FUEL-FRE s odpovídající váhou umístěnou taktéž v 2. radiálním prstenci.

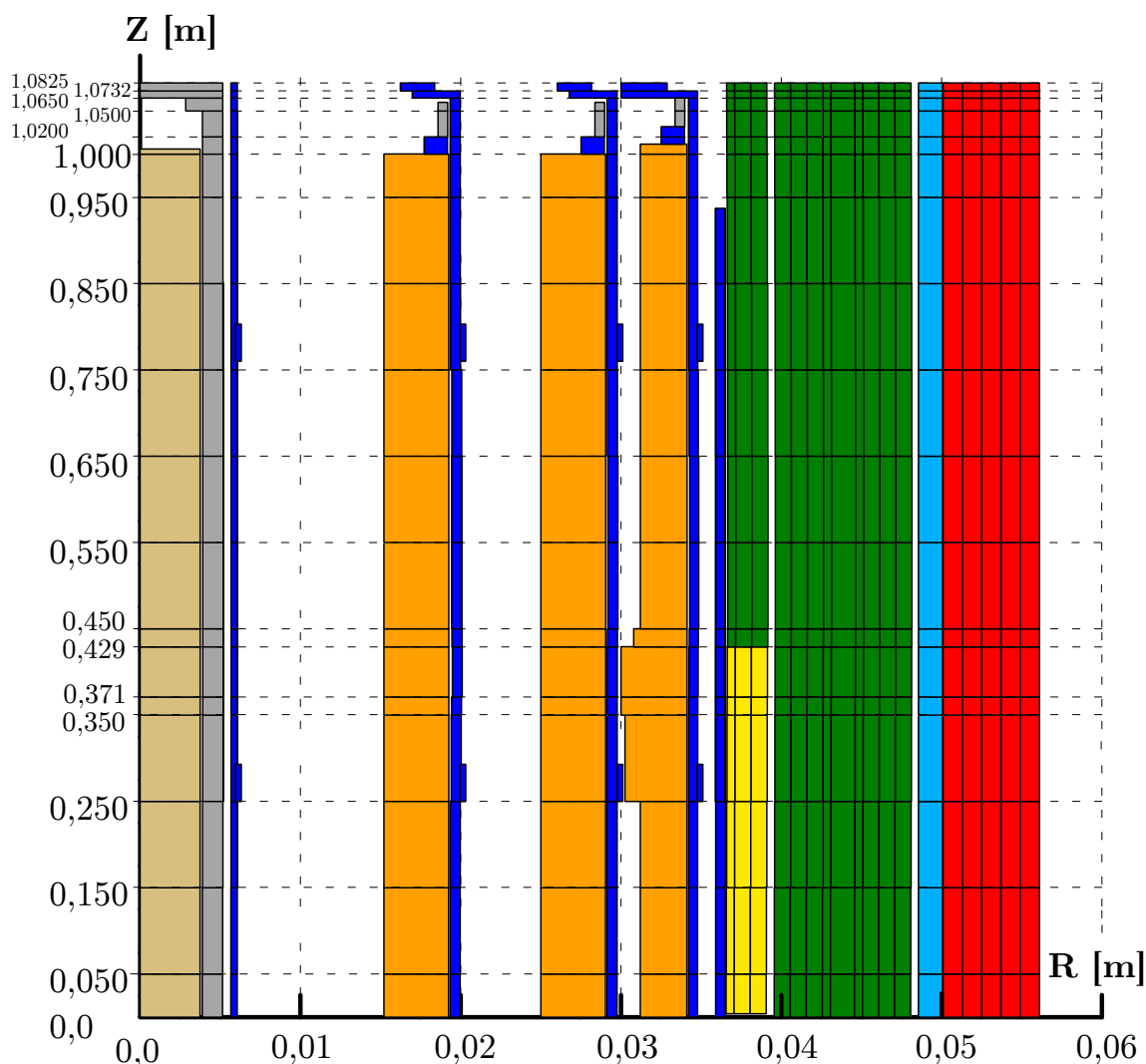
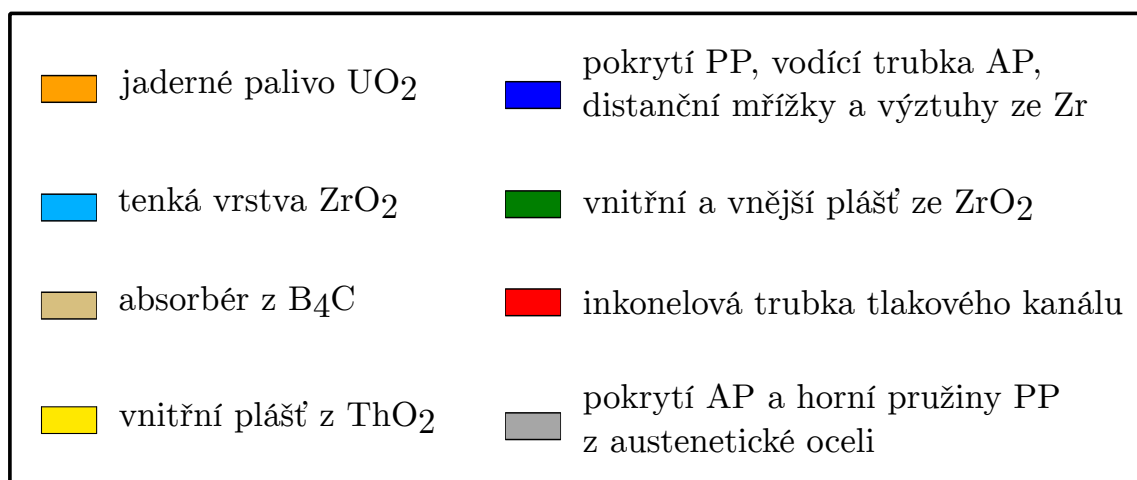
Každá makro-komponenta reprezentující PP byla obklopena řadou dalších makro-komponent, které každá zvlášť představovaly příslušné palivové pokrytí, distanční mřížky, horní zátky nebo pružiny PP. Dále byly jednou makro-komponentou modelovány výztuže palivového souboru ze Zr. V druhém radiálním prstenci se rovněž nacházely makro-komponenty z rhenia a wolframu reprezentující ultrazvukové měřiče teploty a jejich pokrytí, ty však nejsou na schématu na Obr. 4.1 pro své malé rozměry a vyšší přehlednost zobrazeny.

Vnitřní plášť ze ThO_2 a následně ze ZrO_2 byl modelován jako 3 koncentrické makro-komponenty. Ve výšce 0,429 m na přechodu mezi těmito dvěma materiály (a tudíž dvěma makro-komponentami) bylo nutné dodatečně umístit jednu z úrovní axiální nodalizace, jelikož kód nebyl schopen správně počítat přestupy tepla do vnitřního pláště, pokud byly obě dvě komponenty zároveň ve stejném nódu. Pro zachování korespondence elevací středů nodů a pozic měření byla dodatečně umístěna axiální úroveň nodalizace také ve výšce 0,371 mm. Vnější plášť ze ZrO_2 byl vytvořen pomocí 9 koncentrických makro-komponent. Tenká vnitřní vrstva ze ZrO_2 na inkonelové trubici tlakového kanálu byla modelována jako jedna makro-komponenta. Tlaková trubice z inkonelu byla reprezentována 5 koncentrickými makro-komponentami.

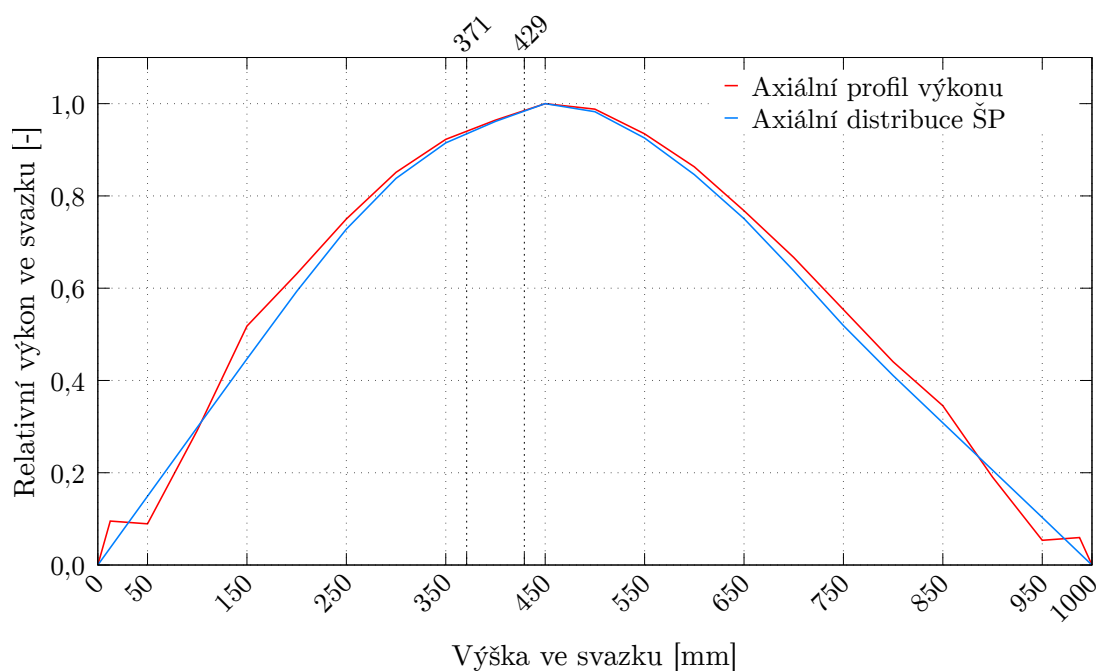
Pro simulaci udržování teploty vnějšího povrchu inkonelové trubky tlakového kanálu chladící vodou bylo strukturou *CONNECTI* typu *BCTI* nastavena okrajová podmínka třetího druhu při odpovídajícím součiniteli přestupu tepla a konstantní teplotě 165 °C. Chlazení palivového svazku bylo modelováno strukturou *CONNECTI* typu *SOURCE* jako přívod vodní páry o teplotě 165 °C, průtoku 0,5 g/s a tlaku 2 bar do dolní části svazku.

Normalizovaný axiální profil štěpného výkonu svazku a distribuce ŠP, jejichž srovnání je uvedeno na Obr. 4.2, stejně jako radiální profil výkonu a počáteční inventář ŠP⁵ vycházející z výsledků měření po ukončení předozářování PP, byly přejaty z technické zprávy popisující parametry experimentu [17].

⁵Integrální kód ASTEC bere jako jeden z možných vstupů izotopické složení paliva. Nejedná se tak jen o ŠP čistě z definice, ale i o další prvky (např. Pu, U, O). Použití tohoto termínu je v pozdějším textu práce míněno z hlediska kódu ASTEC.



Obr. 4.1: Schéma materiálového a prostorového členění modelu palivového svazku v 2-D r-z axisymetrické geometrii. Axiální úrovně odpovídají výškové nodalizaci. Radiální pozice PP (oranžová) jsou posunuty pro přehlednější vizualizaci. Rozměry všech komponent a vrstev odpovídají skutečnosti.

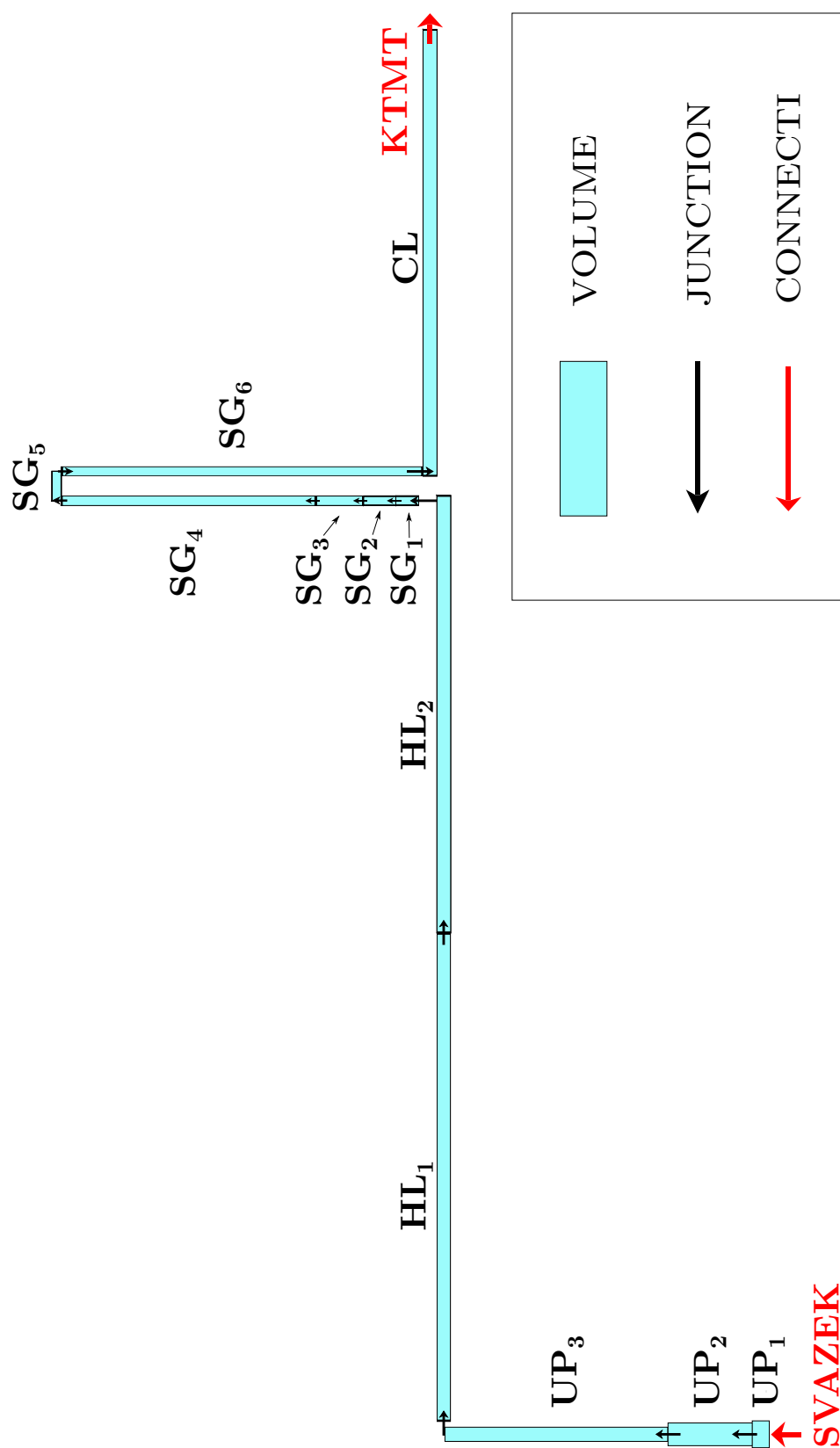


Obr. 4.2: Srovnání axiálního profilu výkonu a distribuce ŠP ve svazku.

4.2 Model experimentální smyčky

Na Obr. 4.3 je uvedeno schéma modelu experimentální smyčky v modulu CE-SAR. Jednotlivé oblasti smyčky postupně reprezentují horní směšovací komoru, horkou větev I.O, PG a studenou větev I.O. Horní směšovací komora (sekce C na Obr. A.3) je reprezentována jedním kontrolním objemem, na který navazují dva kontrolní objemy reprezentující vertikální trubku nad svazkem (sekce D až E a F až G). Následuje horizontální část horké větve, která je rozdělena na dvě části. Tyto části mezi sebou svírají horizontální úhel 34° , který však na schématu na Obr. 4.3 nelze vidět. Třetí část smyčky, která vertikální U-trubkou reprezentuje primární stranu PG, je na své horké větvi rozdělena do čtyř objemů. Jedním objemem je následně reprezentován horní ohyb a dále je jedním objemem modelována celá studená větev PG, na kterou je napojena studená větev experimentální smyčky. Ta je tvořena také pouhým jedním objemem a končí výstupem do nádoby simulující KTMT, která je již modelována modulem CPA. Důvodem pro jemnější nodalizaci na počátku horké větve PG je jednak vysoký teplotní gradient a také kratší intervaly měřící instrumentace, jejíž elevacím odpovídají centra vytvořených kontrolních objemů.

Všechny stěny smyčky, vyjma výstupu z horní směšovací komory, jsou během experimentu udržovány na konstantní teplotě díky ponoření do organické kapaliny. Vertikální trubka a horká větev mají stěny udržovány na teplotě 700°C , zatímco části PG a studená větev na teplotě 150°C . Tento fakt je v modelu zohledněn tím, že jednotlivé stěny (reprezentované strukturami *WALL*) příslušící danému kontrolnímu objemu jsou na těchto teplotách udržovány strukturami *CONNECTI* typu *HEAT*.



Obr. 4.3: Schéma nodalizace modelu experimentální smyčky simulující I.O. Každému kontrolnímu objemu náleží i tepelná struktura — *WALL*, která však zde není zobrazena.

4.3 Model nádoby kontejnmentu

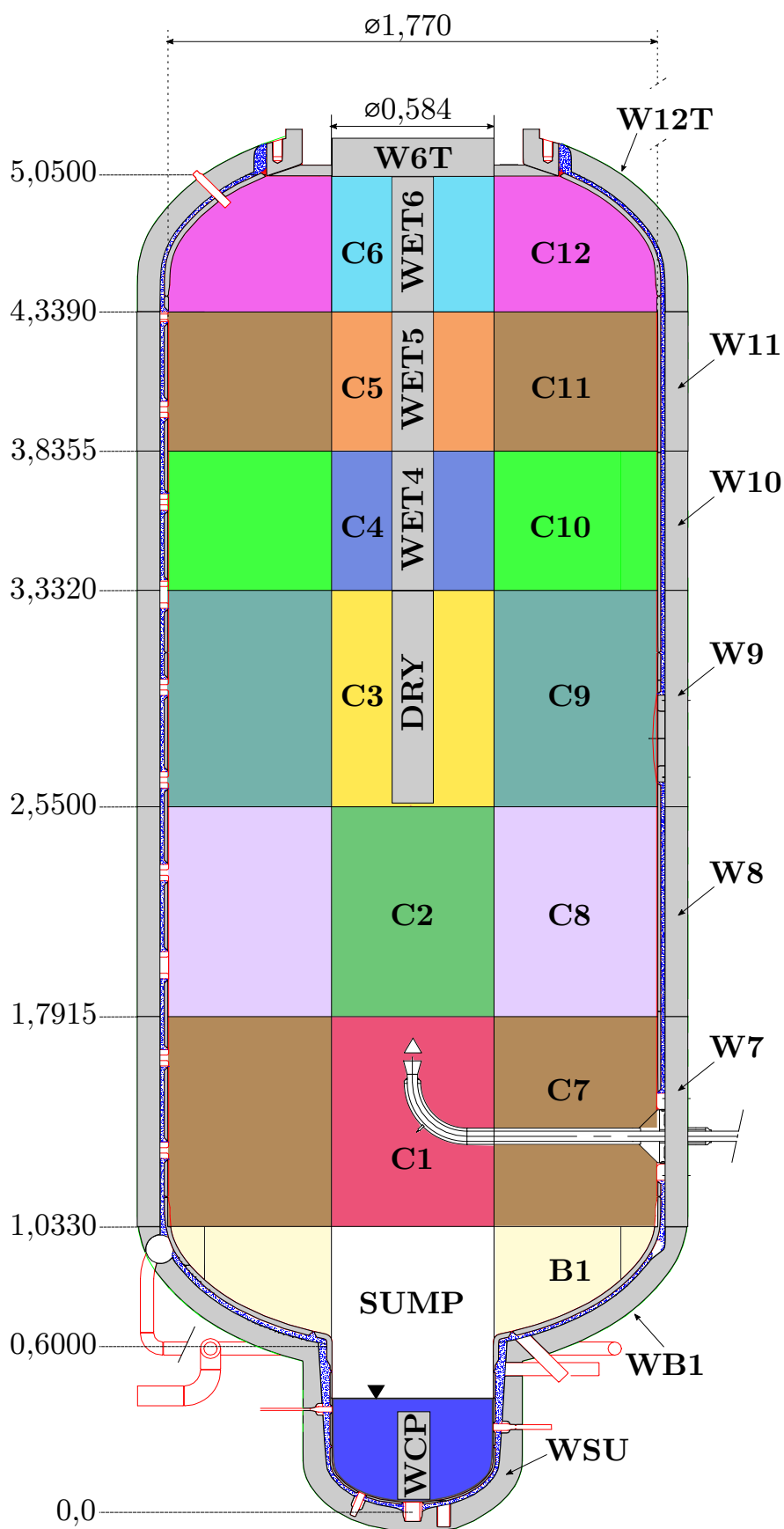
Prostorovou nodalizaci nádoby REPF 502 simulující KTMT lze vidět na Obr. 4.4. Nádoba je rozdělena na 2 koncentrické prstence a 7 výškových úrovní a je tak tvořena 14 kontrolními objemy (v terminologii modulu CPA nazývaným zóny – struktura *ZONE*), které doplňuje ještě 1 objem simulující okolní prostředí vně nádoby. Tyto (vnitřní) zóny jsou vzájemně propojeny atmosferickými (pro plyny) a drenážními (pro vodu) spojkami – struktura *CONNECTION*. Mezi zónami tak probíhá proudění vody a vodní páry společně s nekondenzovatelnými plyny a ŠP ve formě plynů či aerosolů. Tyto ŠP se mohou kondenzovat, usazovat, chemicky sorbovat na tepelných strukturách v KTMT nebo se rozpouštět ve vodní jímce (zóna *SUMP*), kde jsou simulovány četné chemické reakce jodu. Výstup z experimentální smyčky je strukturou *CONNECTI* modelován do zóny *C1*.

Všechny tři válcové kondenzátory natřené organickými (epoxidovými) barvami byly vždy v daném nódu sloučeny do jedné tepelné struktury o trojnásobné ploše. Horní část – tzv. mokré kondenzátory – byla výškově rozdělena na tři části (*WET4*, *WET5* a *WET6*) a jejich blízké okolí na tři zóny (*C4*, *C5* a *C6*). Suchá část kondenzátorů je reprezentována jednou strukturou *DRY*, které má za okolí zónu *C3*.

Horní a dolní ocelový koncový kryt nádoby jsou tvořeny tepelnými strukturami (*WB1* a *W12T*), které přísluší dané zóně představující horní a dolní vnější prsteneček v rámci prostorové diskretizace. Střední část horního ocelového krytu nádoby je modelována zvláště jako struktura *W6T*, která sousedí se zónou *C6*. Suchou i mokrou část dolní a boční ocelové stěny jímky tvoří struktura *WSU*, zatímco *WCP* představuje organickou (epoxidovou barvou) natřenou vzorkovací desku umístěnou pod hladinou vodní jímky. Boční suchá ocelová stěna jímky je výškově rozdělena do pěti částí (*W7* až *W11*), které sousedí se zónami vnějšího prstence. Při definování tepelných struktur byla kromě geometrie stěn zadána i časová závislost jejich teplot, která zahrnovala udržování teplot v jednotlivých fázích experimentu.

Definice jednotlivých zón zahrnuje počáteční termohydraulické podmínky a parametry natřených nebo ocelových ploch, které mohou být suché či mokré. Dále obsahuje časový vývoj dávkového příkonu, převzatý z experimentálních dat, a hodnoty pH (v případě vodní jímky). Tyto údaje, spolu s parametry povrchů, jsou klíčové pro přesné zachycení procesů speciace jodu.

Model KTMT obsahuje dva systémy, které nejsou zobrazeny na Obr. 4.4: recirkulační smývací smyčku a vzorkovací stanice. Smyčka, připojená k vodní jímce, simuluje sprchový systém aktivní v intervalu od 183 660 s do 184 440 s, který slouží k relokaci usazených aerosolů ze dna nádoby do jímky. Vzorkovací stanice během experimentu odebírají vzorky atmosféry, čímž přispívají k snižování tlaku v KTMT.



Obr. 4.4: Schéma nodalizace modelu kontejnerové nádoby REPF 502 s vyústěním studené větve experimentální smyčky simulující LOCA havárii.

Kapitola 5

Výsledky validačního výpočtu

Celková doba integrálního výpočtu modelovaného experimentu FPT-3, zahrnující všechny 4 fáze předepsané v [16], činí 386 340 s, přičemž samotný výpočet je spuštěn v čase 0 s a je rozdělen do dvou etap. Počáteční nulový čas odpovídá začátku degradační fáze tak, jak to definuje *benchmark* [16]. První etapa výpočtu, kdy jsou aktivované všechny hlavní výpočetní moduly – ICARE, CESAR, CPA, SOPHAEROS a ELSA – trvá do času 22 500 s, který odpovídá konci smyčkové fáze (v tomto okamžiku je, jak již bylo zmíněno, uzavřena spojka mezi I.O a KTMT – izolace KTMT). Následně pokračuje výpočet plynule do druhé etapy od času 22 500 s do času 386 340 s, kdy již neprobíhá výpočet a vyhodnocování parametrů ve svazku a experimentální smyčce. Ve druhé etapě výpočtu jsou aktivní již pouze moduly CPA a SOPHAEROS, jelikož následná kontejnmentová a chemická fáze (zahrnující fázi aerosolovou a fázi smývání) se zaměřují výhradně na jevy v nádobě REPF 502 reprezentující KTMT, které jsou počítány již pouze těmito moduly.

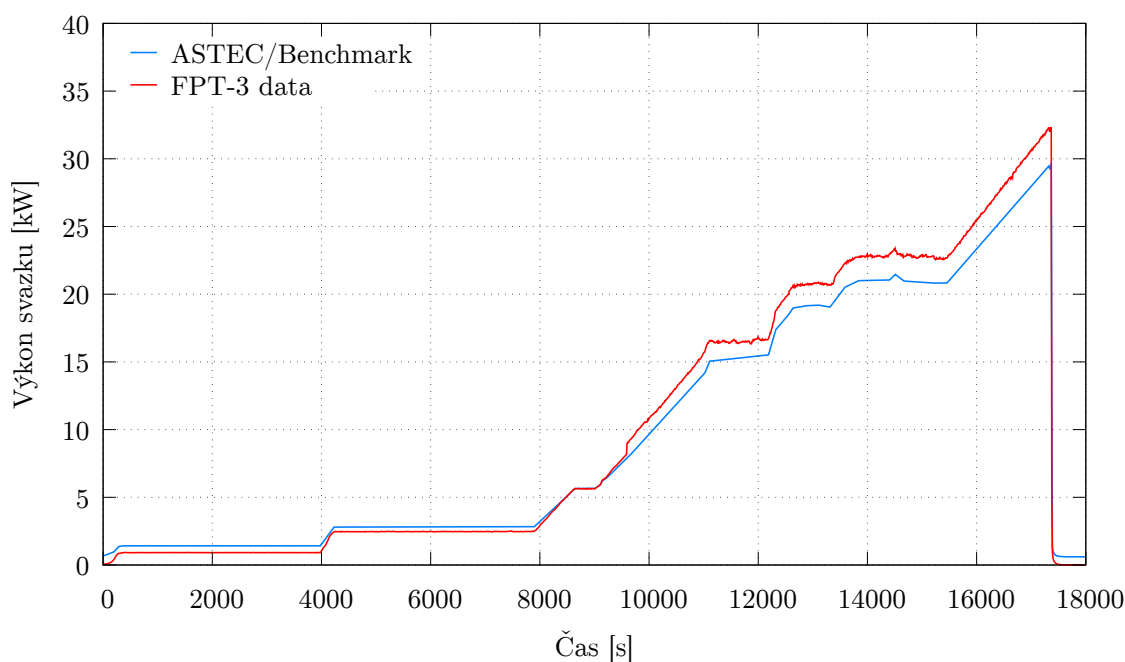
Pro souhrnné a strukturované vyhodnocení výsledků validačního výpočtu a pro adekvátní porovnání dosažených výsledků s naměřenými daty během experimentu FPT-3 je následující text rozdělen do podkapitol zaměřujících se postupně na jednotlivé fáze. Zobrazené a vyhodnocené veličiny v rámci tohoto textu vycházejí z požadovaných parametrů pro danou fázi tak, jak je uvádí specifikace *benchmarku* [16].

5.1 Výsledky svazkové fáze

Průběh štěpného výkonu (Obr. 5.1), který zřejmě měřený výkon svazku podceňuje, je přímo předepsán ve specifikacích pro *benchmark* experimentu FPT-3. Toto podcenění by mohlo být částečně vysvětleno tím, že měřený výkon je celkový tj. včetně zbytkového výkonu. Časování hlavních událostí charakterizujících degradační fázi (odpovídající fázi svazkové v *benchmarku*) během výpočtu experimentu FPT-3 shrnuje přehled na Tab. 5.1. Formát přehledu vychází z již dříve uvedené Tab. 2.2.

Tab. 5.1: Přehled hlavních událostí ve výpočtu degradační fáze v kódu ASTEC ve srovnání s experimentem FPT-3.

Událost	Veličina	ASTEC	FPT-3
První porušení pokrytí	Čas; Elevace	6 331 s; 0,5 m	4 870 s; 0,5 m
Počátek oxidace	Čas	7 815 s	8 560 s
Počátek úniku ŠP	Čas	6 343 s	9 700 s
Selhání AP	Čas; Elevace	8 811 s; 0,5 m	9 550 s; 0,5 m
První relokace materiálu	Čas	9 253 s	~14 100–14 700 s
	Elevace	0,5 m	0,45–0,70 m
První oxidační pík teploty	Čas; Teplota	9 546 s; 1915 °C	9 840 s; 2 217 °C
Celková hmotnost H ₂	Hmotnost	93,38 g	120 g

**Obr. 5.1:** Historie štěpného výkonu ve svazku během degradační fáze.

První prasknutí pokrytí PP, ke kterému došlo v čase 6 331 s ve výšce 0,5 m, nastává během druhé výkonové hladiny, což je později oproti experimentu, kdy došlo k prasknutí již během přechodu mezi první a druhou výkonovou úrovní. K prasknutí došlo v 8. axiální úrovni (mezi výškami 0,450 m a 0,550 m) na makro-komponentě CLAD-FRE představující čerstvé PP na okraji svazku. Vzápětí však dochází o jeden časový krok později k prasknutí CLAD-IR1 reprezentující vyhořelé PP v prvním radiálním prstenci. První selhání integrity AP bylo zjištěno v čase 8 811 s také v 8. axiální úrovni. Celkový časový vývoj teploty paliva (Obr. 5.2) i pokrytí PP (Obr. 5.3) je po celou dobu výpočtu ve velice dobré shodě až na dvě výjimky.

První odchylkou je prvotní oxidační pík, který ve výpočtu nastává mírně dříve v čase 9 546 s na makro-komponentě CLAD-IR2 v druhém radiálním prstenci. To má za následek i dřívější začátek hlavní *runaway* oxidace (Obr. 5.4), kdy množství produkovaného vodíku bylo mírně nadhodnocováno do času cca 11 000 s, kdy se projevil efekt *steam starvation*. S tím dobře koresponduje vykreslení hmotnostního toku vodní páry na výstupu ze svazku (Obr. 5.5), který v momentě intenzivní oxidace dosahuje téměř nulových hodnot.

Počátek oxidace, který je v tomto případě definován okamžikem dosažení 1 % celkové produkce vodíku během experimentu, byl vyhodnocen až po ukončení výpočtu jako 7 815 s. Pozdní oxidace je ve výpočtu předpovězena relativně přesně. Celková produkce vodíku ke konci výpočtu degradační fáze činila 93,38 g a je celkově podhodnocena o 18,7 %. Důvodem by mohl být nižší uvažovaný štěpný výkon.

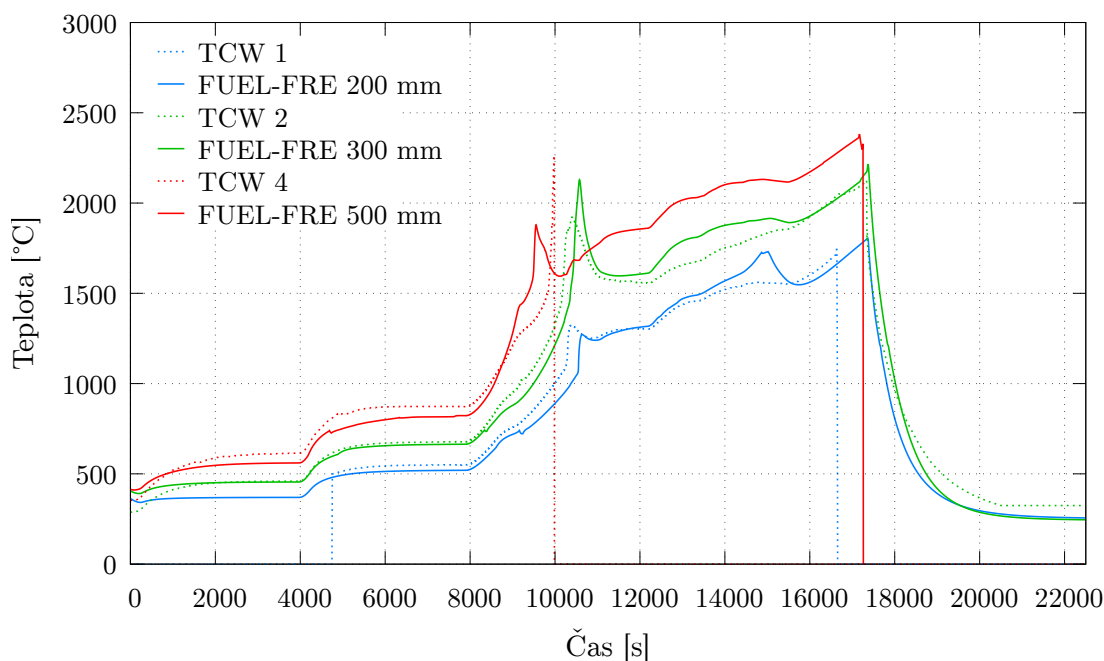
Významným rozdílem výpočtu oproti experimentu je následně druhý oxidační pík v čase cca 15 000 s, který je způsoben obtížně předvídatelným procesem degradace palivového souboru. Kromě degradace začíná dříve i relokace materiálu ve svazku (definovaná v kódu ASTEC vytvořením makro-komponenty DEBRIS či MAGMA v daném nódu), a to konkrétně v čase 9 253 s. Počáteční množství je však velmi malé v řádu desítek gramů, a proto bylo v kódu zaznamenáno tak brzy.

Počátek úniku ŠP, za který je považován moment, kdy unikne větší množství xenonu než 1 % počátečního inventáře, byl zpětně dopočítán jako 6 343 s, tedy okamžitě po prvním porušení pokrytí, kdy dochází k tzv. *burst release* – úniku volatilních ŠP (např. právě xenonu) nahromaděných v mezeře palivo-pokrytí. Důvodem pro okamžité uvolnění ŠP po selhání PP ve výpočtu (oproti větší časové prodlevě v experimentu) je konzervativní přístup kódu ASTEC, který uvažuje únik všech nahromaděných volatilních ŠP z mezery palivo-pokrytí z celé makro-komponenty najednou. Uniklé množství vybraných ŠP z paliva shrnuje Tab. 5.2. Při srovnání s naměřeným únikem respektive transportem a retencí ŠP během experimentu, které již byly dříve uvedeny v Tab. B.1 a Tab. B.2 v příloze, lze konstatovat, že kromě nadhodnoceného úniku cesia a mírně podhodnoceného úniku vzácného plynu – xenonu, jsou vypočtené hodnoty ve shodě s experimentem v rámci nejistot měření.

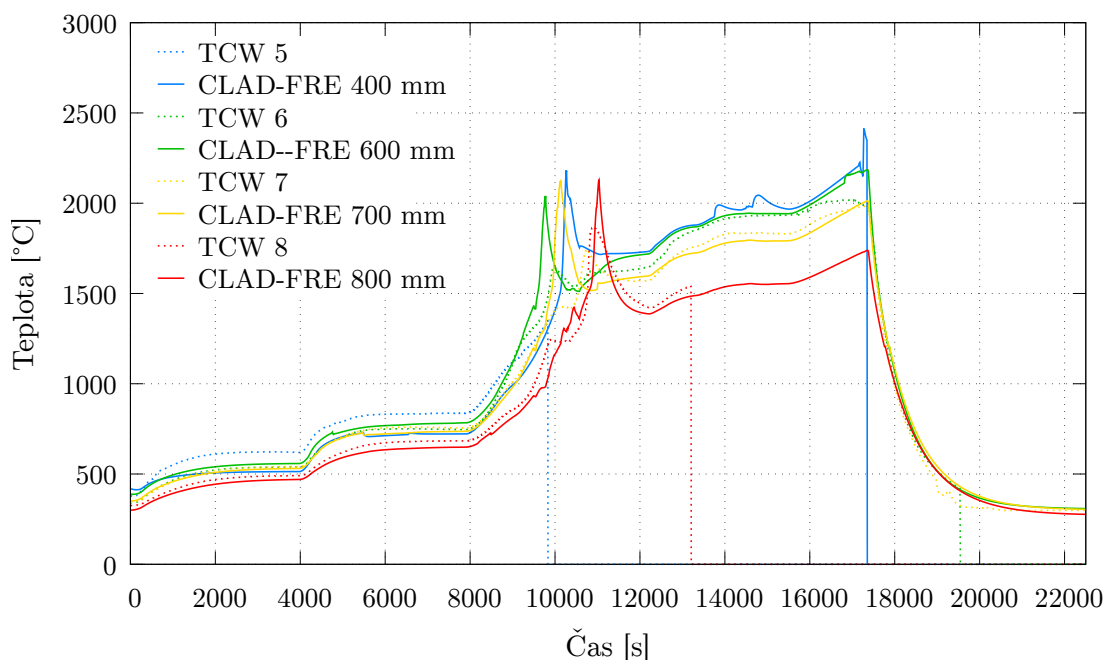
Tab. 5.2: Únik vybraných ŠP ze svazku vyjádřený v % počátečního inventáře.

Prvek	FPT-3 [%]	ASTEC [%]
Xe ⁶	81,48	77,32
Ag	70,28 ± 13,35	76,62
Cs	64,46 ± 10,31	77,79
I	78,86 ± 13,41	77,01

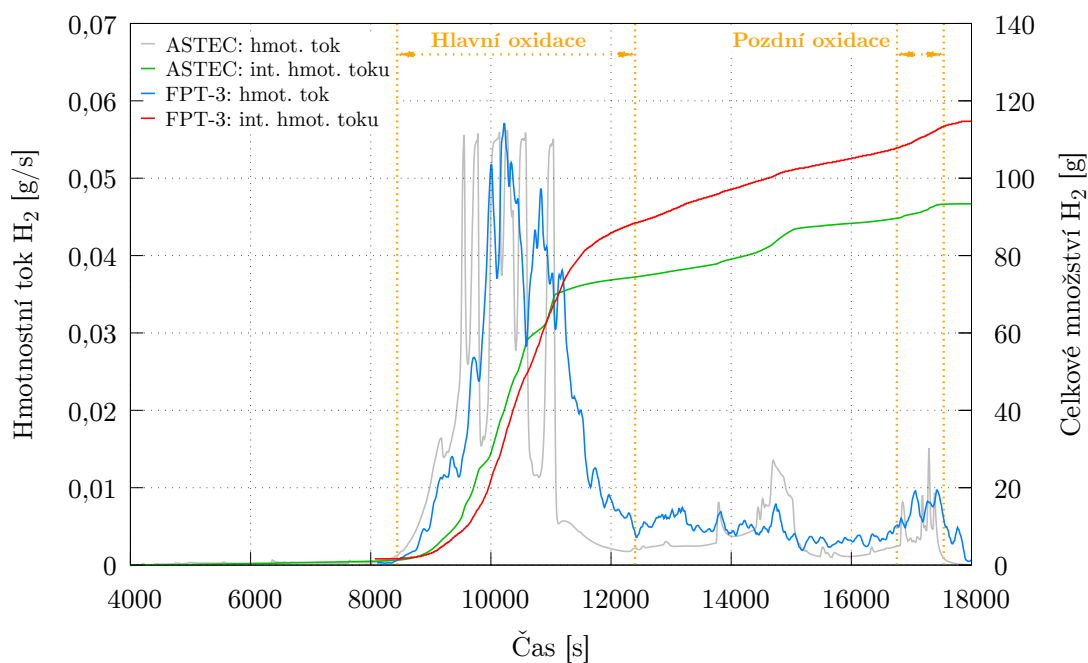
⁶Pro naměřený únik Xe nebylo možné v dokumentaci k experimentu FPT-3 dohledat nejistotu.



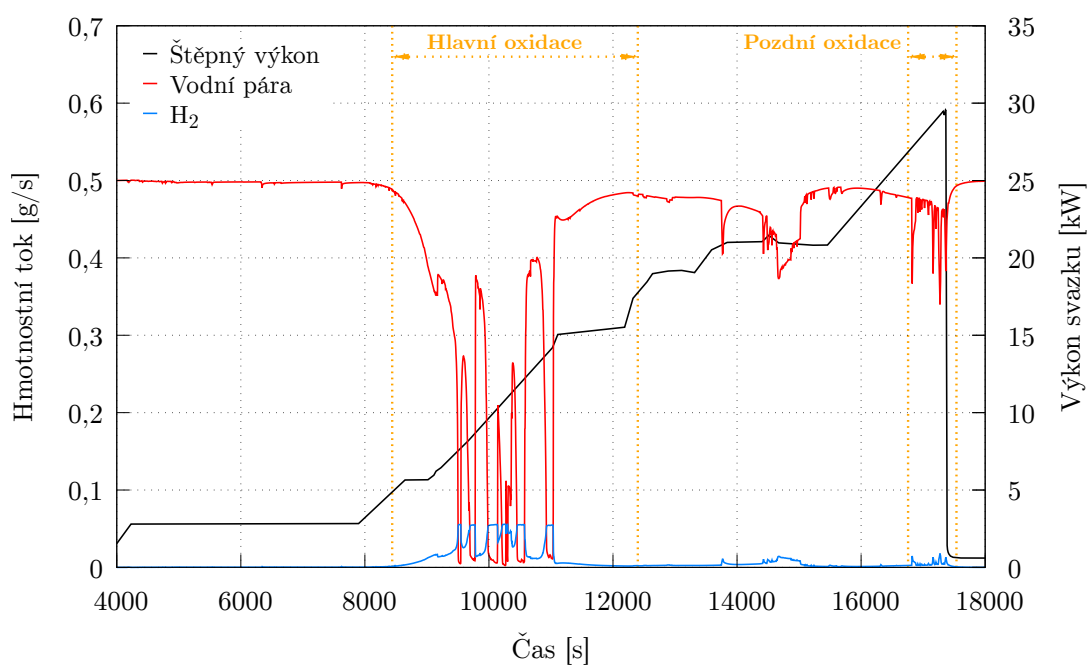
Obr. 5.2: Srovnání teplot paliva mezi výpočtem (makro-komponenta FUEL-FRE) a experimentem v příslušných výškách měření (TCW). Mírně podhodnocené teploty na počátku výpočtu lze vysvětlit nižším štěpným výkonem zadaným *benchmarkem* oproti změřenému celkovému výkonu svazku.



Obr. 5.3: Srovnání teplot pokrytí PP mezi výpočtem (makro-komponenta CLAD-FRE) a experimentem v příslušných výškách měření (TCW). Mírně podhodnocené teploty vychází z nižších teplot paliva.

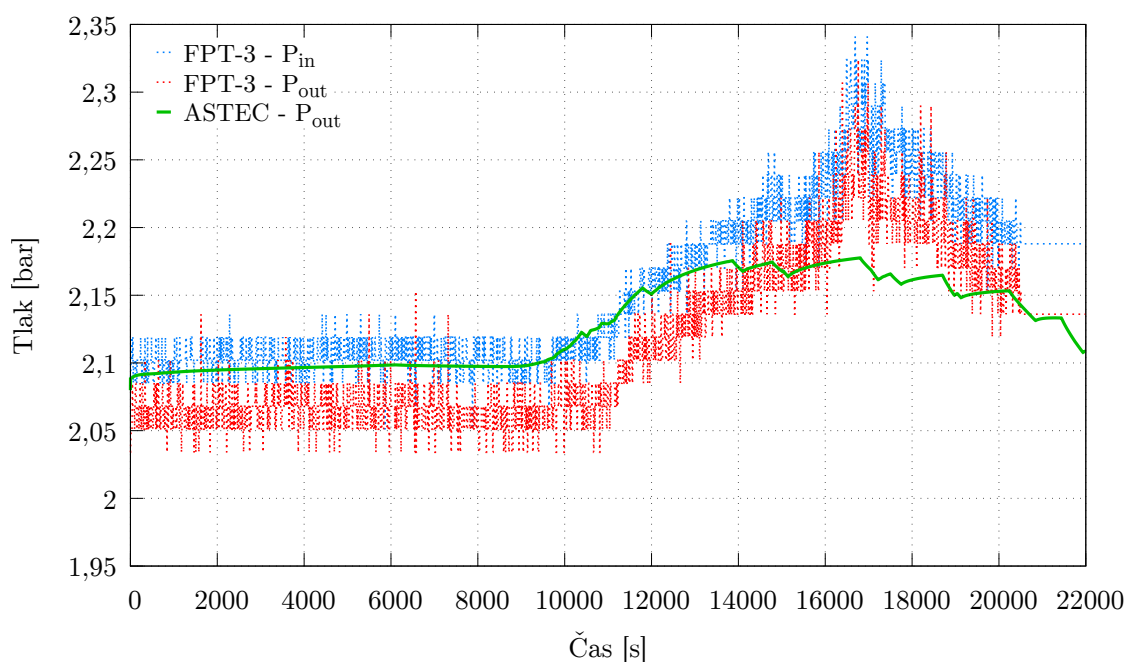


Obr. 5.4: Okamžitá a integrální produkce vodíku během degrační fáze. Uvedené hmotnostní toky a integrál hmotnostního toku jsou vzaty z měření a výpočtu výstupu ze studené větve do KTMT.



Obr. 5.5: Hmotnostní tok vodní páry a vodíku na výstupu ze svazku.

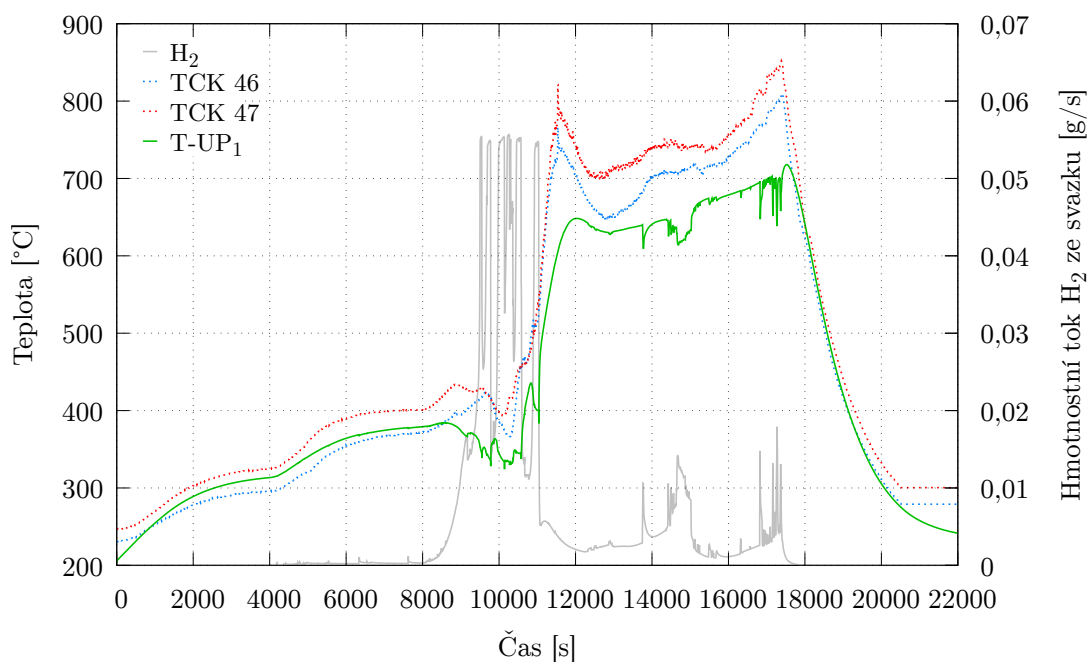
Graf na Obr. 5.6 zobrazuje porovnání spočteného a naměřeného tlaku na výstupu ze svazku. Spočtený trend odpovídá naměřeným hodnotám, avšak v pozdější části degradační fáze je spočtený tlak nižší než naměřený. Závěrečná zpráva experimentu [15] na základě zaznamenaného rozdílu tlaku mezi horkou a studenou větví a dat z transportu ŠP naznačuje, že pozorované navýšení tlaku od času cca 14 500 s a snížení po čase cca 17 000 s mohlo být způsobeno částečnou blokáží smyčky sloučeninami bóru mezi měřícími stanovišti C a G. Oscilace naměřených hodnot je způsobena malým rozlišením použitých sond. Naopak spočtené kolísání tlaku viditelné přibližně od času 10 000 s odpovídá aktivaci různých vzorkovacích stanic atmosféry KTMT, které odsávají nezanedbatelnou část atmosféry z KTMT.



Obr. 5.6: Vývoj změřeného a spočteného tlaku na vstupu a výstupu ze svazku.

Vývoj teploty chladiva na výstupu ze svazku (Obr. 5.7) je kódem v první polovině fáze dobře predikován, a to včetně teplotních výkyvů pozorovaných během hlavní oxidace. Tyto výkyvy jsou způsobené vyšší tepelnou vodivostí vodíku, který v momentech intenzivní oxidace prakticky nahradí tok vodní páry. Následkem čehož dochází k většímu odvodu tepla z chladiva do neohřívané stěny v tomto úseku. V pozdější části fáze však dochází k mírnému podhodnocení výstupní teploty, které lze vysvětlit nižším uvažovaným štěpným výkonem v *benchmarku* oproti experimentu.

Součástí specifikace proměnných, které jsou pro svazkovou fázi uvedeny v *benchmarku*, je i hmotnostní tok a integrál hmotnostního toku nekondenzovatelných plynů CO, CO₂ a CH₄ na výstupu ze svazku. Tyto plyny, které jsou produkty oxidace AP z B₄C, však nelze v modulu ICARE v současné verzi kódu správně predikovat, a proto nejsou v rámci vyhodnocení validačního výpočtu této práce uvažovány.

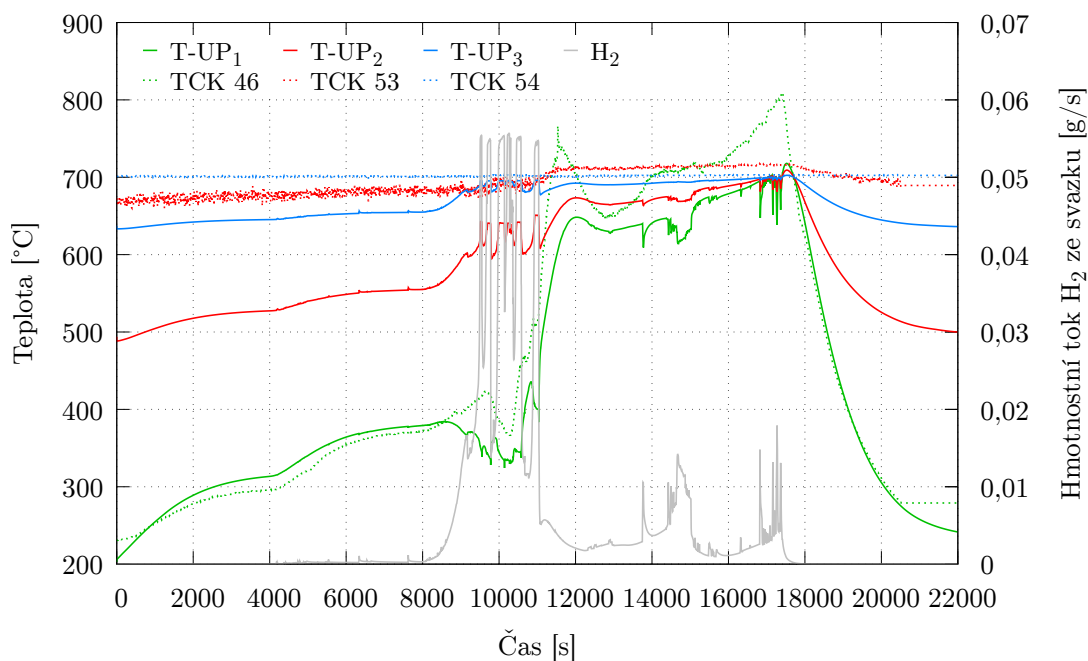


Obr. 5.7: Vývoj teploty chladiva a toku vodíku na výstupu ze svazku. Označení T-UP₁ značí teplotu na výstupu ze svazku, která odpovídá měření TCK.

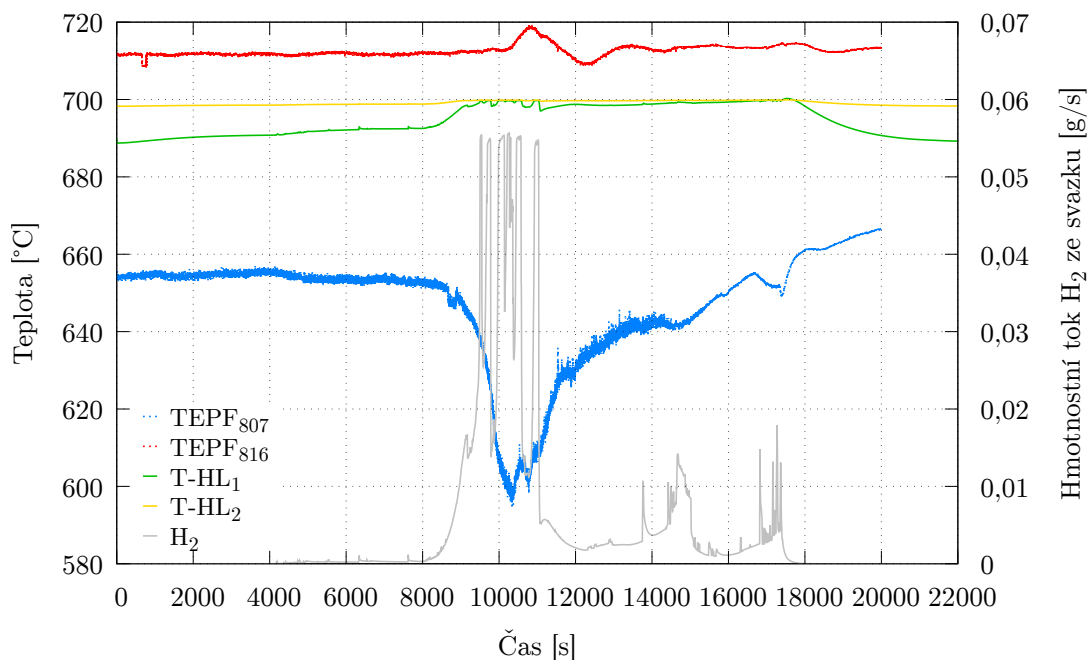
5.2 Výsledky smyčkové fáze

Průběh teplot v horní směšovací komoře a ve vertikální trubce (Obr. 5.8) je výpočtem z počátku experimentu systematicky podhodnocován. Podhodnocení teploty výpočtem je postupně v průběhu degradace zmenšováno a po proběhnutí hlavní oxidační fáze jsou měřené a vypočtené teploty již v dobré shodě. Počáteční nižší vypočtené teploty chladiva, které následně se zvyšováním výkonu rostou, by však mohly více odpovídat reálnému dění během experimentu než naměřená data, jelikož při měření mohla hrát zkreslující roli radiace – přenos tepla sáláním z vyhřátých stěn na teplotu 700 °C na termočlánky. Jiný průběh měřené i spočtené teploty na výstupu ze svazku oproti ostatním měřením termočlánky a spočteným hodnotám je způsoben tím, že na rozdíl od vzdálenějších částí experimentální smyčky není stěna tohoto úseku udržována na konstantní teplotě organickou kapalinou. To má za následek odlišný průběh teploty chladiva v tomto úseku.

Teplota chladiva na vstupu do horké větve (Obr. 5.9) se chová jiným způsobem, než teplota kontrolního objemu reprezentujícího horkou větev spočtená kódem AS-TEC. Spočtená teplota pozvolna roste se zvyšováním výkonu a mírně kolísá v průběhu hlavní oxidace, kdy dochází ke sníženému proudění chladiva, které v danou chvíli tvoří z naprosté většiny vodík s větší tepelnou vodivostí. Teplota změřená při experimentu na vstupu do horké větve prudce klesá v době hlavní oxidace a sníženého průtoku chladiva smyčkou. Dle závěrečné zprávy [15] bylo měření termočlánku TEPF₈₀₇ ovlivněno nižšími teplotami v ohybu vertikální trubky (sekce G). Na výstupu z horké větve je teplota kódem systematicky podhodnocena o cca 20 °C.



Obr. 5.8: Vývoj teploty chladiva na výstupu ze svazku (T-UP₁), v horní směšovací komoře (T-UP₂) a ve vertikální trubce (T-UP₃) modelující začátek horké větve.

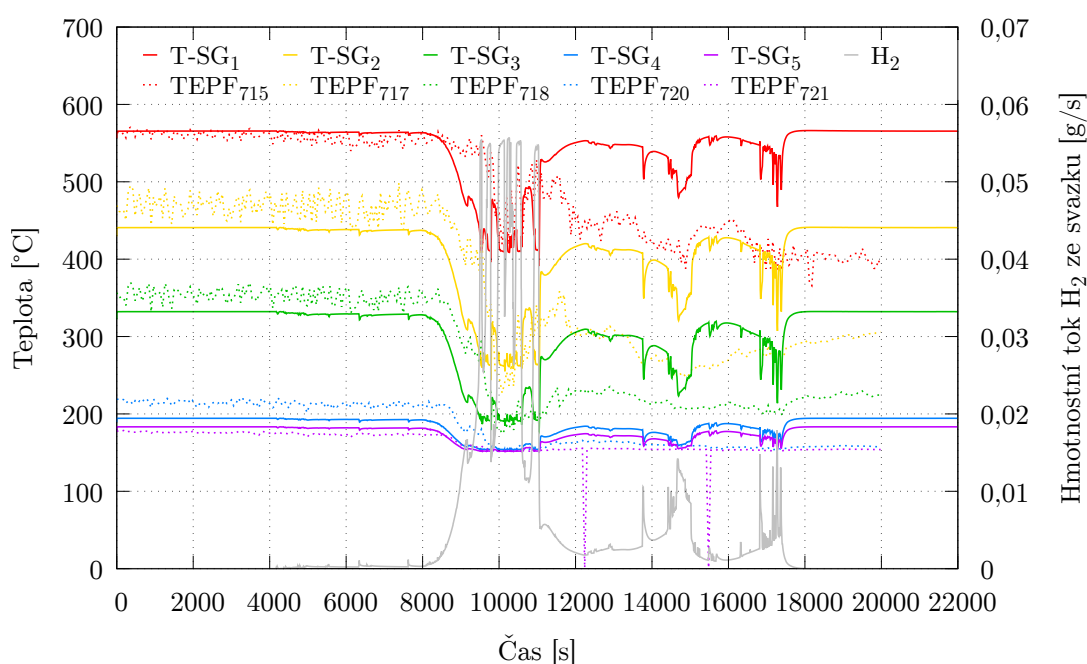


Obr. 5.9: Vývoj teploty chladiva v první (T-HL₁) a druhé části (T-HL₂) horizontální trubky modelující horkou větev. Zobrazená data z měření - TEPF odpovídají začátku a konci první části horizontální trubky před ohybem.

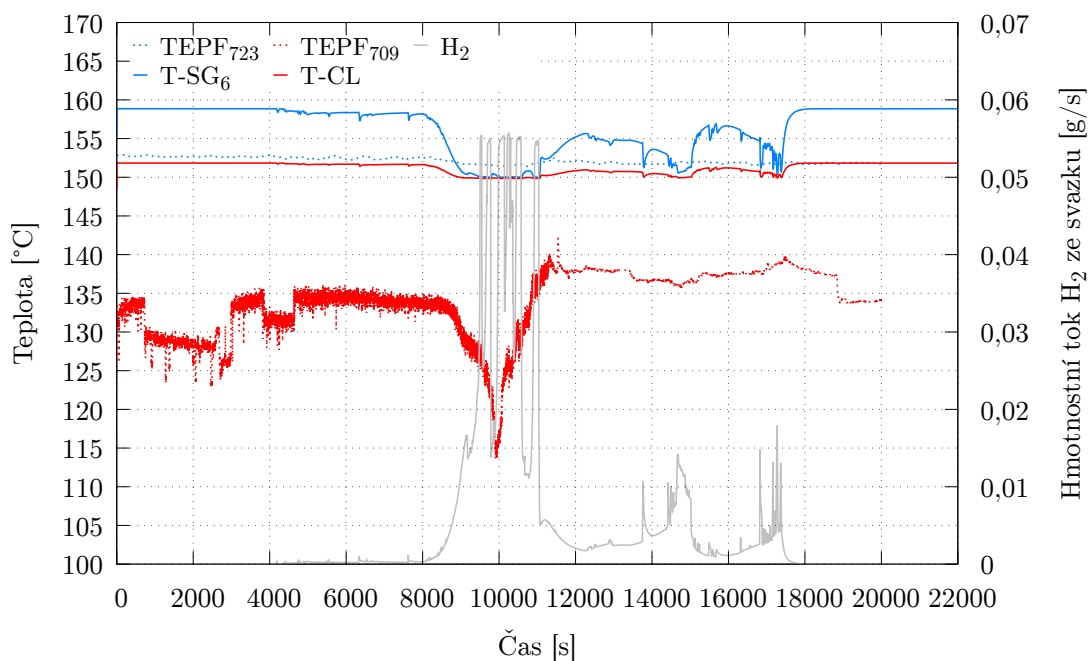
Vývoj teploty chladiva v horké části vertikálního PG v jednotlivých výškových úrovních (Obr. 5.10), kdy centra objemů odpovídají instrumentaci měření, je s experimentem ve velmi dobré shodě. Kódem je úspěšně predikováno snížení teploty chladiva v průběhu jak hlavní, tak pozdní oxidace, což je způsobeno vyšší tepelnou vodivostí produkovaného vodíku oproti vodní páře. Teplota chladiva je před hlavní oxidací velice mírně podhodnocena ve všech elevacích s výjimkou vstupní teploty a teploty na ohybu PG, která je o pár stupňů nadhodnocena. V rámci finální zprávy experimentu FPT-3 [15] je poukázáno na problém s měřením termočlánků, kdy obdobně jako v experimentu FPT-2 po snížení teploty během hlavní oxidace nedošlo k navrácení na původní hodnoty. Výpočet však tento návrat predikuje správně.

Teplota chladiva ve studené části PG a na konci studené větve (Obr. 5.11) jsou výpočtem mírně nadhodnoceny. Navzdory tomu, že je ve výpočtu teplota na konci studené větve téměř přesně na teplotě stěny 150 °C, je měřená teplota o cca 15 °C nižší. Spočtená teplota chladiva ve studené části PG je nadhodnocena cca o 5 °C.

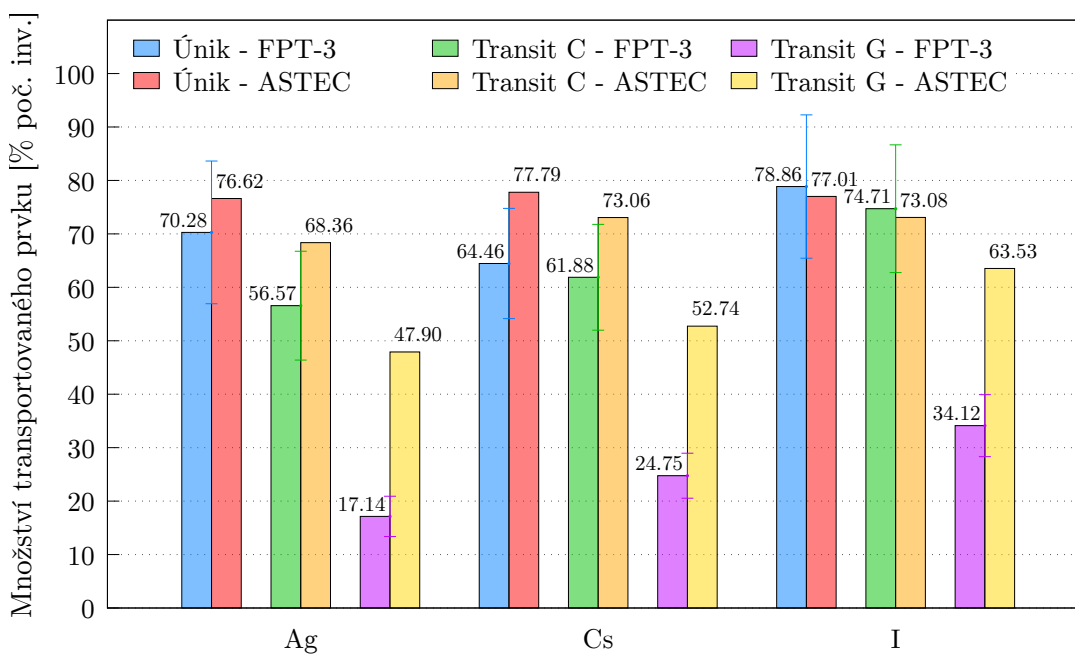
Množství vybraných transportovaných ŠP přes měřící stanoviště C (horká větev) a G (studená větev před KTMT) shrnuje v jednotkách počátečního inventáře Obr. 5.12. Kód únik ze svazku obecně mírně nadhodnocuje, avšak stále na hranici nejistot. Velice dobrá shoda je u vypočteného úniku a transportu jodu do stanoviště C. Pro stříbro a cesium je retence na horké větvi také dobře odhadnuta a rozdíl vychází čistě z rozdílného uniklého množství. Velký rozdíl je pro všechny ŠP u stanoviště G, které je způsobeno jednak podhodnocením retence na studené větvi a také blokadí smyčky sloučeninami bóru, která již byla zmíněna dříve.



Obr. 5.10: Vývoj teploty chladiva v horké vzestupné části PG (SG₁-SG₅) – 75 mm od vstupu (červená), 320 mm (žlutá), 740 mm (zelená), 2 000 mm (modrá) a 3 000 mm od vstupu na ohybu do studené části (fialová).



Obr. 5.11: Vývoj teploty chladiva ve studené sestupné části PG 1 500 mm od výstupu (SG₆) a na konci studené větve experimentální smyčky (CL).



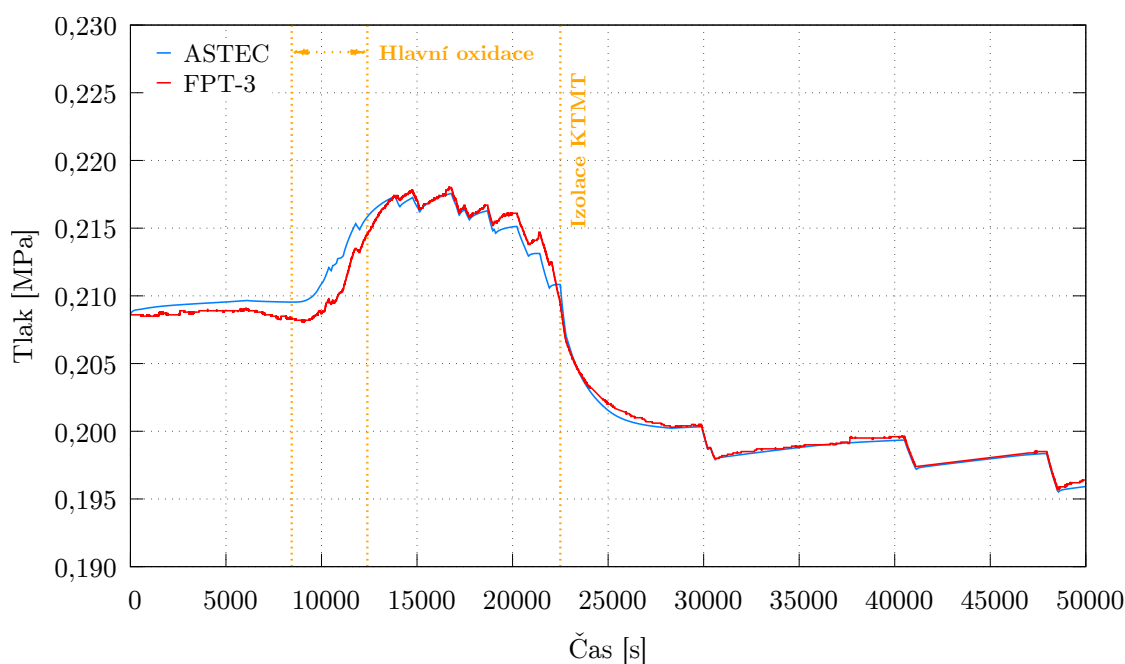
Obr. 5.12: Srovnání uniklého a transportovaného množství vybraných ŠP horkou větví (Transit C) a dále studenou větví do KTMT (Transit G).

5.3 Výsledky kontejnmentové fáze

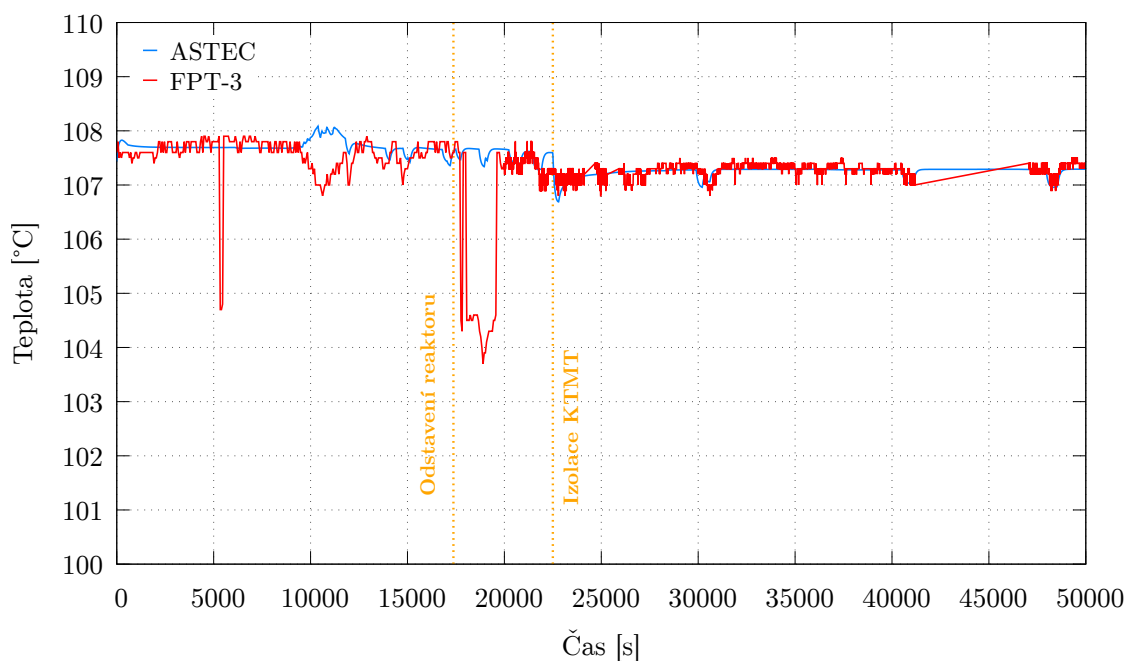
Tlak v KTMT (Obr. 5.13) je kromě počátečního mírného nadhodnocení ve velice dobré shodě se změřeným tlakem. Se zvyšováním štěpného výkonu ve svazku rosti od času cca 9 000 s i naměřený a vypočtený tlak. To koresponduje s hlavní oxidací, během které proudí do KTMT místo vodní páry spíše vodík, který jako nekondenzující plyn umocňuje tlakování KTMT. Náhlé poklesy tlaku odpovídají intervalům odebrání vzorků atmosféry KTMT vzorkovacími stanicemi.

Průměrná teplota atmosféry KTMT (Obr. 5.14) byla spočtena jako objemově vážený průměr teplot atmosfér ze všech kontrolních objemů v KTMT. Stejně jako tomu bylo při měření teploty chladiva v experimentální smyčce je i v KTMT během experimentu patrný pokles teploty plynů v intervalech prudké oxidace, kdy do KTMT proudí převážně vodík s větší tepelnou vodivostí. Ve výpočtu však toto pozorováno není, přestože výpočtově bylo snížení teploty proudících plynů správně predikováno na studené větvi. V okamžiku izolace KTMT kód správně predikuje snížení teploty (vlivem zastavení proudění horkých plynů).

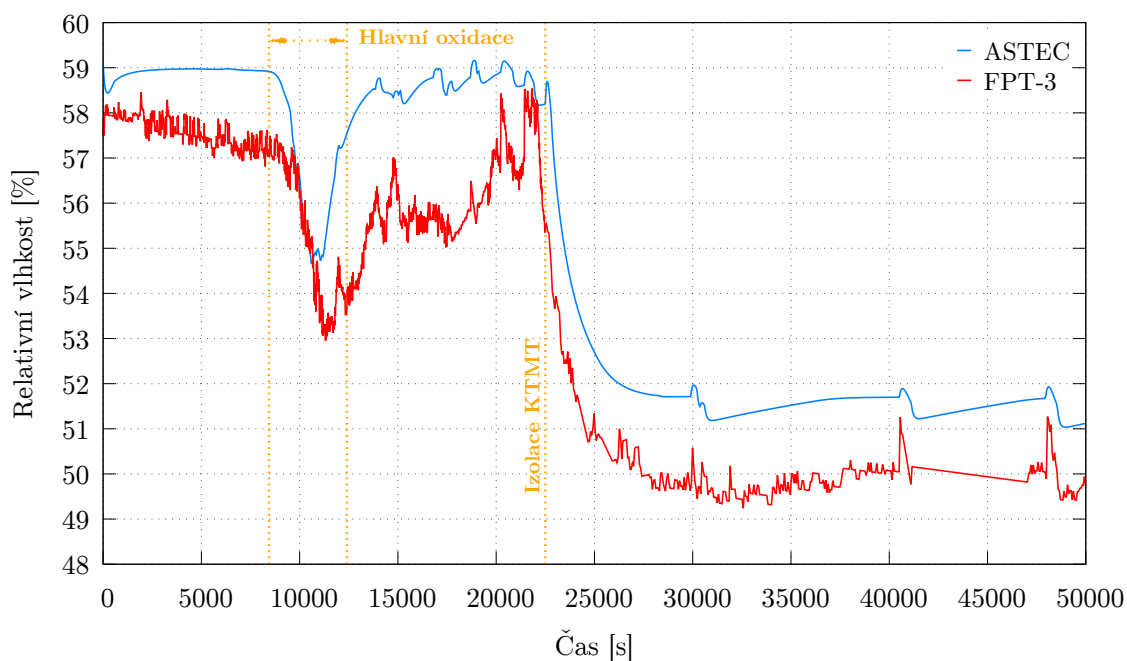
Vypočtený vývoj váženého průměru relativní vlhkosti KTMT (Obr. 5.15) odpovídá dobře průběhu experimentálních dat. Pokles relativní vlhkosti v KTMT během hlavní oxidace je kódem správně předpovězen. Intenzivní oxidace za produkce vodíku a tím způsobený velmi snížený tok vodní páry do KTMT způsobuje pokles relativní vlhkosti. Stálý pokles vlhkosti po izolaci KTMT je kódem taktéž správně predikován. Maximální odchylka vypočtených a naměřených hodnot činí cca 4 %.



Obr. 5.13: Tlak v nádobě REPF 502 reprezentující KTMT.



Obr. 5.14: Průměrná teplota atmosféry KTMT. Hodnota je vypočtena jako objemově vážený průměr přes všechny kontrolní objemy v KTMT.



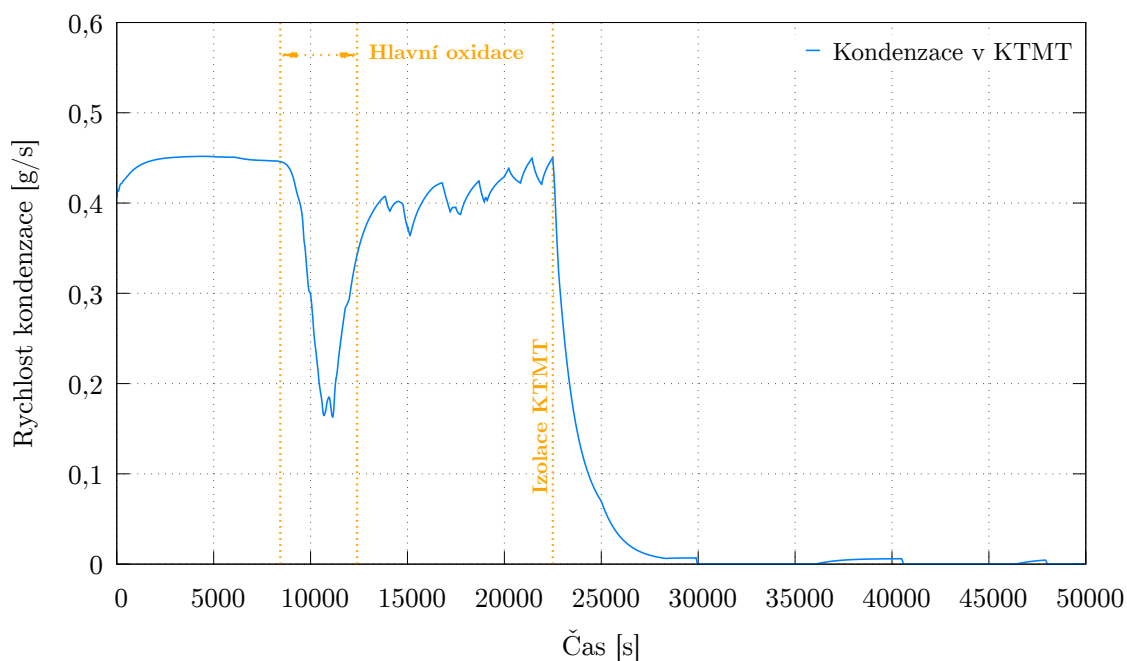
Obr. 5.15: Průměrná relativní vlhkost atmosféry KTMT. Hodnota je vypočtena jako objemově vážený průměr přes všechny kontrolní objemy v KTMT.

Rychlost kondenzace v KTMT na mokrých kondenzátorech a na stěnách a hladině vodní jímky (Obr. 5.16) správně koreluje s průtokem vodní páry, kdy během hlavní oxidace dosahuje kondenzace svého lokálního minima. Prudká oxidace konzumuje téměř veškerou vodní páru protékající svazkem a produkuje nekondenzovatelný vodík. Po izolaci KTMT a ukončení přísunu vodní páry do KTMT klesá rychlost kondenzace postupně až na nulovou hodnotu v čase cca 30 000 s, což je mírně později než 27 660 s, jak udává finální zpráva experimentu [15] .

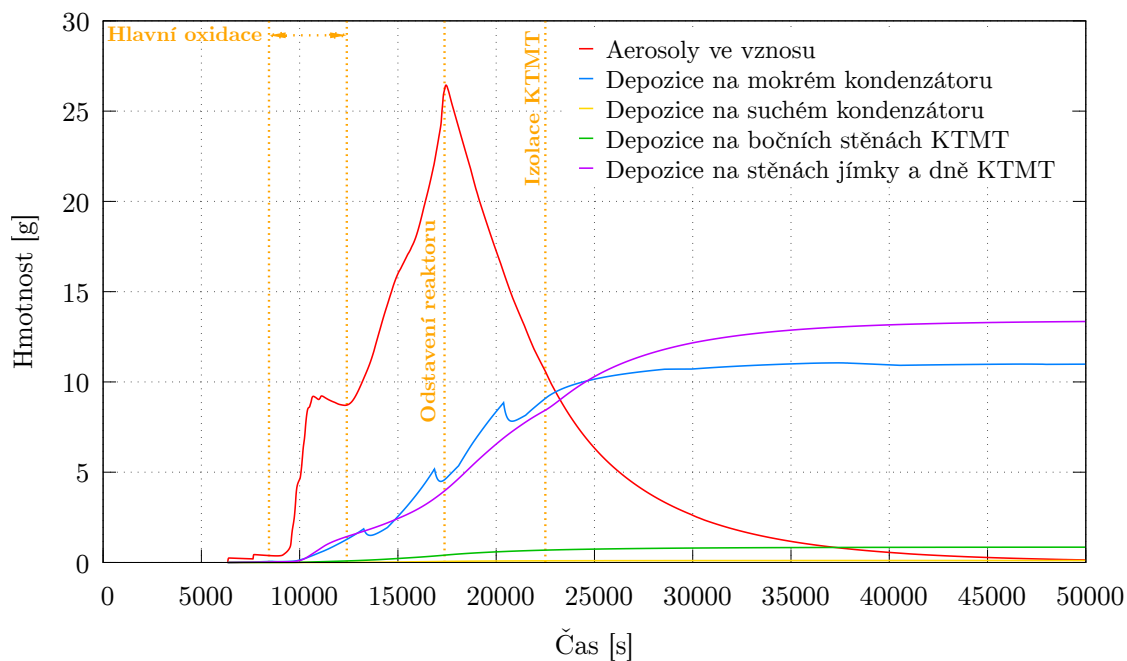
Uniklé ŠP se do KTMT dostávají buď v plynné formě nebo ve formě aerosolů, které jsou zpočátku ve vznosu v atmosféře KTMT a postupně se buď usazují gravitační sedimentací na dno nádoby a do vodní jímky, nebo se deponují na mokrém a suchém kondenzátoru nebo velmi omezeně na bočních stěnách KTMT, jak lze vidět na Obr. 5.17. Množství aerosolů ve vznosu v KTMT se postupně zvyšuje díky exotermickému efektu oxidace a zvyšování štěpného výkonu, kdy dochází postupně k intenzivnější degradaci svazku. Během hlavní oxidace dochází k prvnímu strmému růstu množství aerosolů ve vznosu, po kterém následuje krátkodobý pokles. Ten je způsoben probíhající depozicí a také koreluje s celkově sníženým hmotnostním tokem směsi vodíku a vodní páry do KTMT, která transportuje aerosoly ŠP ze svazku do vznosu v KTMT. Po obnovení průtoku chladiva na nominální hodnotu 0,5 g/s dochází opět k akumulaci. Množství aerosolů ve vznosu dosahuje svého maxima v momentě těsně před odstavením reaktoru.

Nejvýznamnější depozice dle očekávání probíhá na dně KTMT, kde napomáhá usazování gravitační sedimentace, a na mokrých kondenzátorech, v jejichž okolí se díky kondenzaci vodní páry vytváří lokální podtlak strhující aerosoly ve vznosu z jiných zón KTMT. Depozici aerosolů na povrch mokrých kondenzátorů (tj. natřených trubek s kondenzátem – vodním filmem) přispívají též termoforéza a difusioforéza. Skokové poklesy hmotnosti depozice na mokrých kondenzátorech jsou způsobeny strháváním usazených aerosolů zkondenzovanou vodní párou do malé vodní jímky kondenzátorů (ocelový žlábek), která je po dostatečné akumulaci vody na objem 1,5 cm³ opakovaně drenážována do vodní jímky.

Důvodem pro nízké usazování aerosolů na vertikálních stěnách KTMT a suchém kondenzátoru je absence kondenzace, která je způsobena udržováním těchto stěn na vyšších teplotách 110 °C resp. 120 °C přesně za tímto účelem. Samotný rozdíl mezi depozicí na bočních stěnách KTMT a na suchém kondenzátoru je způsoben rozdílnou velikostí plochy. Hmotnostní bilance aerosolů ve vznosu a depozice na kondenzátorech, stěnách a dně KTMT zcela neodpovídá z důvodu, že dochází jednak k drenážování ze žlábků mokrého kondenzátoru do vodní jímky a také že se aerosoly mohou, kromě pevných struktur, usazovat/rozpuštět přímo ve vodní jímce.



Obr. 5.16: Celková rychlost kondenzace vodní páry na mokřích kondenzátorech a na stěnách a hladině vodní jímky v KTMT.



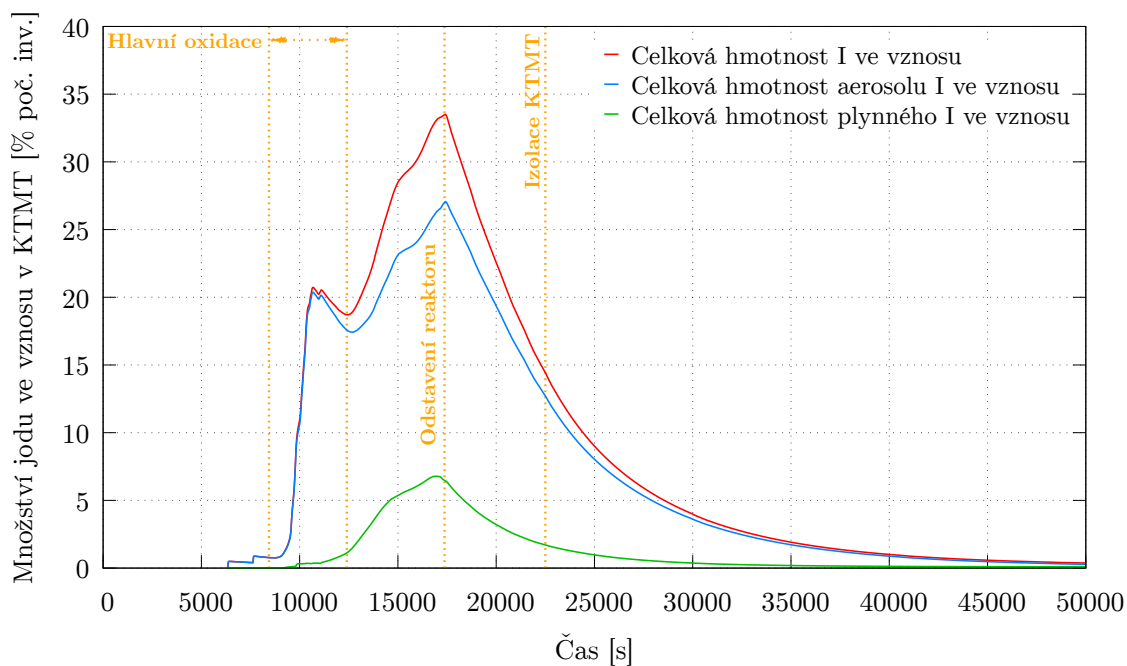
Obr. 5.17: Hmotnostní distribuce ŠP ve formě aerosolu v KTMT. Stěnami jímky a dnem (dolním koncovým krytem) KTMT jsou myšleny suché ocelové části nádoby v této oblasti.

5.4 Výsledky chemické fáze

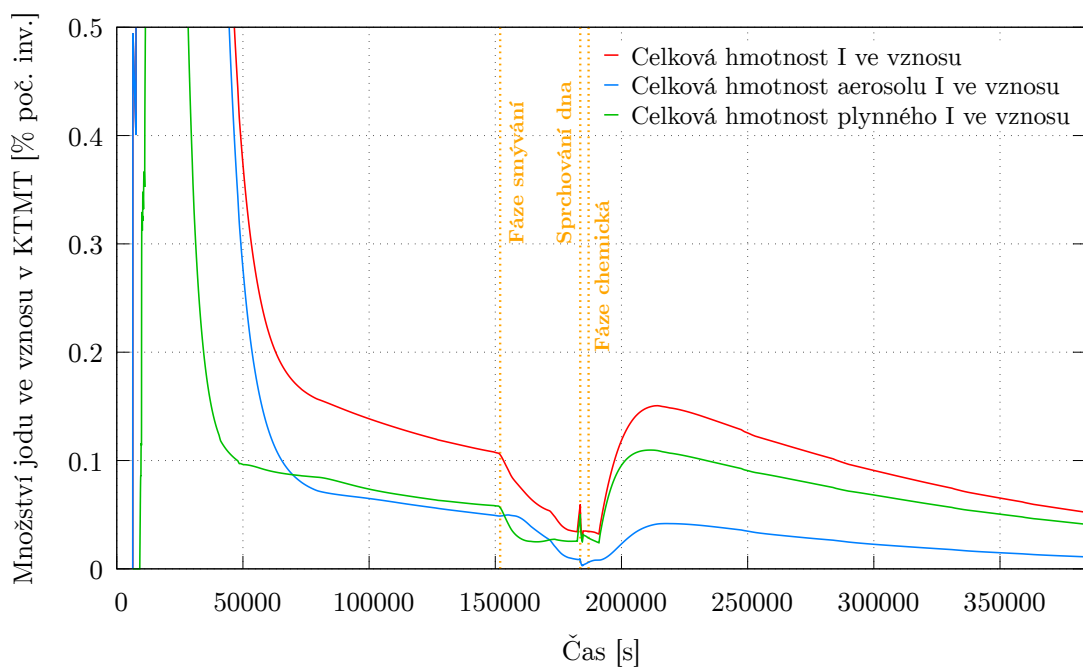
Výsledky vyhodnocené v rámci chemické fáze se výhradně týkají chování a speciace jodu v KTMT. Jelikož jod může v KTMT zaujímat různé chemické formy s celou řadou prvků o různém stechiometrickém podílu, tak jsou uvedené výsledky celkových hmotností vždy vztaženy přímo na hmotnostní podíl jodu nikoliv celé sloučeniny. V případě zkoumání speciace jodu jsou výsledky zase uváděny v molárních množstvích dané sloučeniny.

Specifickým a v té době překvapivým výsledkem experimentu FPT-3 bylo zjištění, že se jod do atmosféry nádoby reprezentující KTMT dostával především ve formě plynu a nikoliv jako aerosol (např. CsI). Tímto se experiment odlišoval od již dříve provedených jiných FPT testů v rámci programu Phebus FP, které zaznamenaly jod v atmosféře KTMT výhradně ve formě aerosolů. Tato odchylka se připisovala použití B₄C jako materiálu kontrolní tyče oproti slitině Ag-In-Cd, která byla použita v předchozích testech. Při pohlednutí na vývoj celkové hmotnosti sloučenin jodu ve vznosu (Obr. 5.18) je však zřejmé, že tomu tak ve výpočtu není. Kód správně predikuje nezanedbatelný podíl plynné formy jodu, avšak jeho zastoupení v této formě nedosahuje ani 50 %. Toto odklonění o výsledků experimentu by mohlo být způsobeno odlišným množstvím transportovaného cesia do KTMT, které tvoří nejčastější aerosolovou formu jodu – CsI. Vyšší unik cesia byl již rozebrán dříve při řešení úniku a transportu ŠP v experimentální smyčce v předchozí podkapitole.

Po úvodní akumulaci jodu ve vznosu během degradační fáze (opět se strmým růstem a následným krátkodobým poklesem během hlavní oxidace) dochází po odstavení reaktoru k postupné depozici převážně adsorpcí na mokřích kondenzátorech. Při přechodu do fáze smývání (Obr. 5.19) dochází k poklesu množství aerosolu ve vznosu, jelikož současně s depozicí kontinuálně probíhá i uvolňování plynného jodu z jímky díky radiolytické oxidaci. Tento jev je však po začátku fáze smývání utlumen, jelikož dochází ke snížení teploty vodní jímky z 90 °C na 70 °C pro minimalizování vypařování vody. Stejně tak byla snížena teplota mokré části kondenzátorů na 70 °C za účelem podpory lokální kondenzace. Po aktivaci sprchového systému a kondenzaci a relokaci aerosolů do vodní jímky dochází následně opět během chemické fáze ke zvýšenému uvolňování plynného jodu do atmosféry. To je způsobeno zvýšením teploty vodní jímky na 100 °C a poklesem pH, což má za následek zvýšenou produkci I₂ z radiolytické oxidace I⁻.



Obr. 5.18: Celková hmotnost sloučenin jodu v plynné formě a ve formě aerosolu ve vznosu v atmosféře KTMT do konce kontejnmentové fáze.

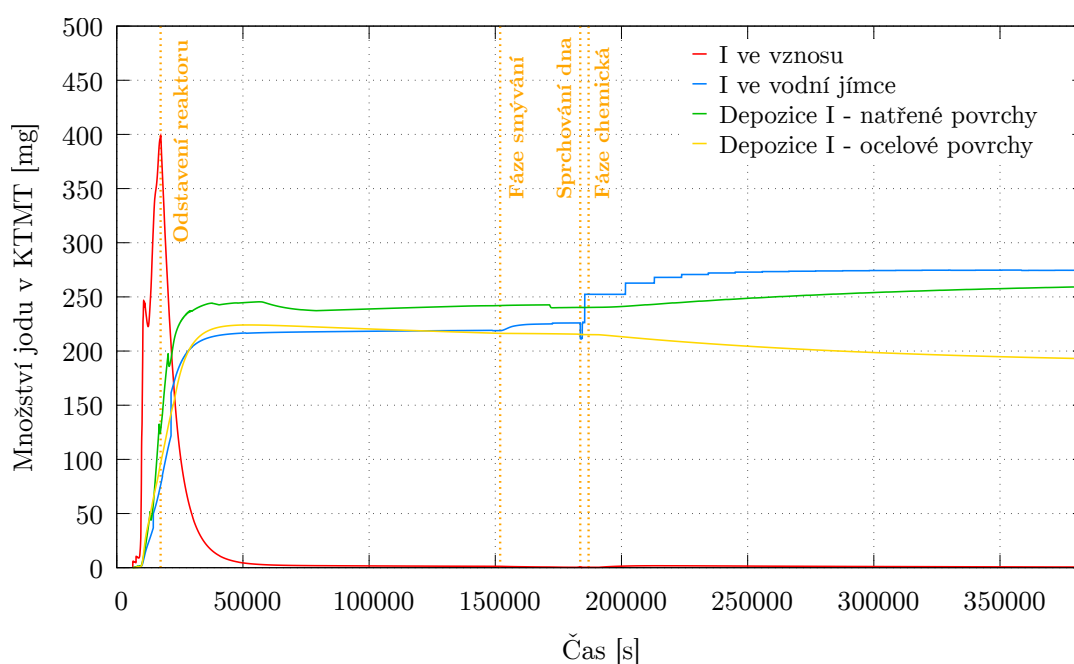


Obr. 5.19: Celková hmotnost sloučenin jodu v plynné formě a ve formě aerosolu ve vznosu v atmosféře KTMT do konce chemické fáze.

Do nádoby reprezentující KTMT bylo celkem transportováno cca 731 mg jodu, což odpovídá 63,53 % počátečního inventáře. Při pohlednutí na distribuci jodu v KTMT (Obr. 5.20) je zřejmé, že dominantním způsobem usazování je adsorpce na natřených površích (kondenzátory a vzorková deska ve vodní jímce) a usazování ve vodní jímce. To je ve shodě se závěry experimentu [15]. Adsorpce na mokřých kondenzátorech je podpořena probíhající kondenzací, která vytváří lokální podtlak a určuje směr proudění z jiných zón KTMT. Skokové nárůsty hmotnosti jodu ve vodní jímce jsou způsobeny opakovanou drenáží naakumulovaného kondenzátu z ocelového žlábků mokřých kondenzátorů do vodní jímky při překročení objemu 1,5 cm³.

Odklonem od výsledků experimentu je však vysoká depozice na ocelových stěnách KTMT, do kterých spadá i dno nádoby. Příčinou takto vysoké depozice na ocelových stěnách je s největší pravděpodobností významně vyšší podíl jodu ve formě aerosolů, které se díky gravitační sedimentaci převážně usazují na dně KTMT.

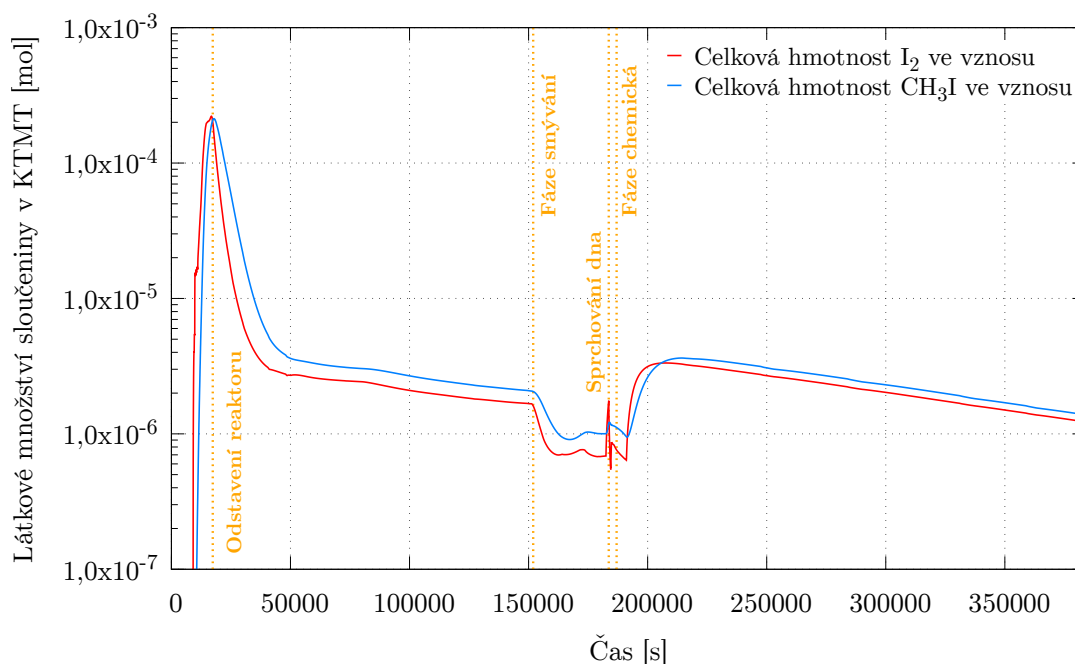
Dalším výrazným odklonem je absence relokace deponovaných aerosolů na dně KTMT do vodní jímky v okamžiku aktivace sprchového systému. Po analýze uživatelského manuálu modulu SOPHAEROS [26] byl učiněn závěr, že kód ASTEC při simulaci sprchového systému uvažuje interakci kapiček pouze se ŠP ve vznosu. Při interakci s pevnými strukturami – *WALL* bere kód v potaz pouze vliv sprchového systému na přestup tepla na dané strukturu. Pro možnost smývání ŠP ze struktury v zóně je třeba uživatelem definovat spojkou mezi zónami typu *DRAIN WALL*, která uvažuje stékání tenkého vodního filmu po stěně v přidružené zóně. Tato stěna však musí být vertikální typu *SIDE* a nikoliv horizontální typu *BOTTOM* jako je modelované dno nádoby KTMT. Pokud by však uživatel modeloval dno nádoby strukturou jiného typu než *BOTTOM*, tak by nedocházelo ke gravitační sedimentaci.



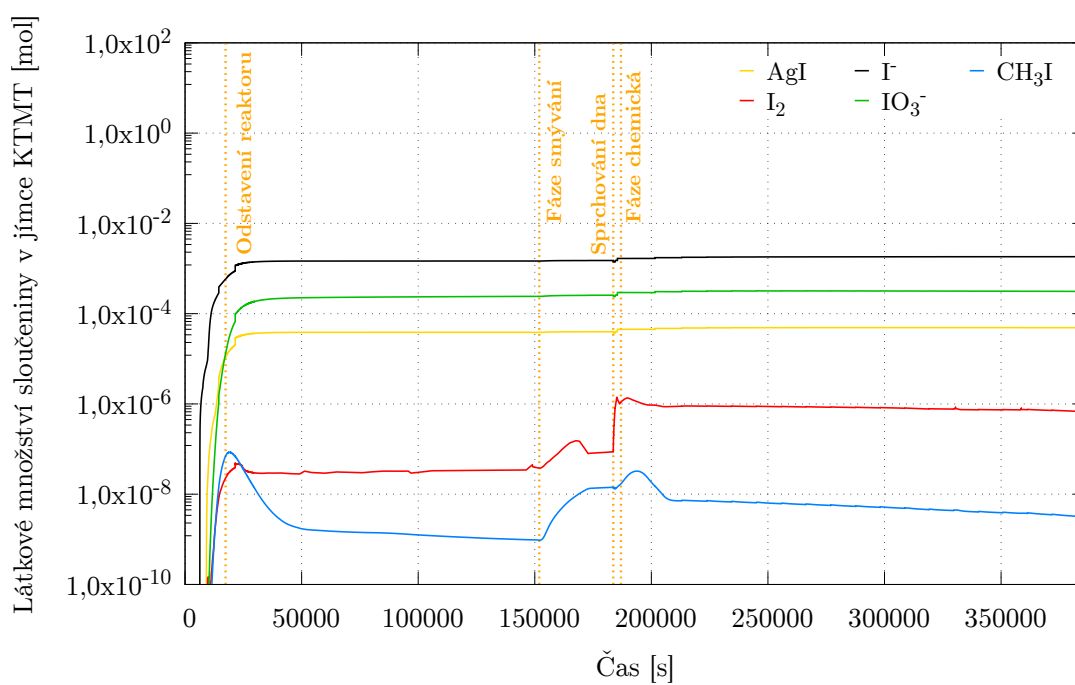
Obr. 5.20: Hmotnostní distribuce sloučenin jodu ve formě aerosolu v KTMT.

Pro zkoumání speciace jodu v plynné formě (Obr. 5.21) bylo *benchmarkem* [16] specifikováno sledování dobře definované formy I_2 a CH_3I , které reprezentuje volatilní organické jodidy. Po prvotní akumulaci a následném poklesu po odstavení reaktoru (převážně z důvodu adsorpce na mokrých kondenzátorech) dochází kontinuálně až do počátku fáze smývání k velice mírné produkci jak I_2 tak CH_3I radiolytickou oxidací, která však nepřeváží proces adsorpce. Produkce CH_3I , která je možná díky přítomnosti natřených (epoxidových) povrchů na kondenzátorech a vzorkovací desce ve vodní jímce, nastává lehce opožděně po transportu I_2 do KTMT. Během fáze smývání produkce plynů klesá kvůli snížení teploty vodní jímky z $90\text{ }^\circ\text{C}$ na $70\text{ }^\circ\text{C}$ pro minimalizování vypařování vody. Následně opět na začátku chemické fáze dochází ke zvýšené produkci plynů díky poklesu pH a zvýšení teploty vodní jímky na $100\text{ }^\circ\text{C}$.

V případě speciace jodu ve vodní jímce (Obr. 5.22) lze pozorovat postupnou akumulaci usazováním aerosolů. Největší zastoupení jodu je ve formě iontů I^- , IO_3^- a ve formě AgI . Toto pozorování odpovídá teorii, jelikož vyjma AgI jsou soli jodu (např. CsI či RbI) ve vodě rozpustné a iont pak zaujímá formu iontů I^- a IO_3^- . Během fáze smývání a fáze chemické je průběh množství I_2 a CH_3I ve vodní jímce komplementární s průběhem množství jodu ve vznosu. Díky sníženému odpařování z vodní jímky a naopak zvýšené kondenzaci roste množství I_2 a CH_3I během fáze smývání. V momentě aktivace sprchového systému skokově roste množství I_2 , které se do jímky dostalo ze vznosu díky kondenzaci na kapkách sprchového systému. Jiné sloučeniny nevykazují takový skokový nárůst, což jen potvrzuje fakt, že kód neuvažuje smývání aerosolů ze dna KTMT do jímky sprchovým systémem.



Obr. 5.21: Speciace jodu v plynné formě v KTMT. Pro velký rozsah hodnot je osa y v logaritmickém měřítku.



Obr. 5.22: Speciace jodu ve vodní jímce KTMT. Pro velký rozsah hodnot je osa y v logaritmickém měřítku.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvoření vstupního modelu integrálního *in-pile* experimentu Phebus FPT-3 v integrálním výpočetním kódu ASTEC. Konkrétně vytvoření modelu palivového svazku, experimentální smyčky simulující primární okruh a nádoby kontejnmentu, který by umožňoval provedení validačního výpočtu pro všechny fáze experimentu dle specifikací pro mezinárodní srovnávací úlohu – *benchmark* na průběh experimentu Phebus FPT-3.

Motivací zvolení právě experimentu Phebus FPT-3 pro validaci integrálního kódu ASTEC, byl jednak pro něj charakteristické použití B_4C jako absorbéru a také fakt, že se jedná o integrální *in-pile* experiment, který umožňuje studium provázanosti všech relevantních jevů doprovázejících rozvoj těžké havárie.

Tvorbě modelu nejprve předcházela rešerše fenomenologie těžkých havárií jaderných elektráren relevantní pro specifický případ integrálních *in-pile* experimentů. Dále proběhla podrobná analýza a popis celého experimentu FPT-3 ve všech jeho fázích. Nakonec v rámci teoretické části práce proběhlo vysvětlení výpočetní struktury kódu ASTEC a jeho jednotlivých vypočtených modulů využitých při tvorbě modelu.

Takto získané znalosti byly následně využity při tvorbě modelu experimentu Phebus FPT-3 v integrálním kódu ASTEC, který byl upraven dle specifikace pro mezinárodní srovnávací úlohu na průběh experimentu. Model zahrnoval všechny požadované součásti experimentu.

Validační výpočet experimentu byl proveden integrálně, zahrnoval všechny čtyři předepsané fáze a byl rozdělen do dvou etap. První etapa zahrnovala první dvě fáze experimentu, kdy byly při výpočtu aktivované všechny hlavní výpočetní moduly. Ve druhé etapě výpočtu, na kterou bylo plynule navázáno a která zahrnuje zbylé dvě fáze experimentu, jsou v kódu již aktivované jen moduly řešící problematiku jevů probíhajících v kontejnmentové nádobě.

Po dokončení validačního výpočtu došlo k vyhodnocení nejdůležitějších výstupních parametrů pro všechny fáze dle specifikace *benchmarku*. V rámci svazkové fáze bylo vyzorováno, že ve výpočtu dochází k pozdějšímu prasknutí palivového po-

krytí, ale k dřívějšímu počátku úniku štěpných produktů ze svazku. Lokálně se totiž mohou tvořit eutektika s nižší teplotou tání, které mají vliv na jevy jako je např. první selhání pokrytí. Časová prodleva mezi prvním prasknutím pokrytí a únikem štěpných produktů je ve výpočtu oproti experimentu minimální. Důvodem je konzervativní přístup kódu ASTEC, který uvažuje únik všech nahromaděných volatilních štěpných z mezery palivo-pokrytí z celé makro-komponenty najednou.

Celkové uniklé množství vybraných štěpných produktů (Xe, Ag, Cs a I) je až na nadhodnocený únik cesia a mírně podhodnocený únik xenonu v dobré shodě s experimentem v rámci nejistot měření. Počátek hlavní oxidace je kódem predikován relativně správně. Celkový časový vývoj teploty paliva i pokrytí je po celou dobu výpočtu ve velice dobré shodě s výjimkou mírně dřívějšího prvního oxidačního píku a objevením druhého oxidačního píku v pozdějších časech, který je způsoben obtížně předvídatelným procesem degradace palivového svazku. Vývoj tlaku ve svazku a vývoj hmotnostního toku vodní páry (resp. vodíku) na výstupu ze svazku jsou výpočtem též úspěšně předpovězeny. Závěrem je poměrně uspokojující shoda s experimentem (vzhledem ke komplexnosti a provázanosti jevů, ke kterým při integrálních testech dochází a vzhledem k omezeným možnostem a zjednodušením v integrálních kódech). Výjimkou je ale podhodnocení celkové produkce vodíku o 18,7 %, která byla pravděpodobně způsobena nižším štěpným výkonem předepsaným *benchmarkem* oproti měřenému celkovému výkonu zahrnující i zbytkový výkon.

Průběh teplot v horní směšovací komoře a vertikální trubce v experimentální smyčce jsou na začátku výpočtu nižší než naměřené hodnoty, které byly téměř konstantní. Spočtené teploty však v průběhu výpočtu a zvyšování výkonu svazku rostou a na nejvyšší výkonové hladině ke konci degradační fáze již měřeným hodnotám odpovídají. Experimentální data mohla být ovlivněna radiačním přenosem tepla mezi vyhřívanými stěnami a měřícími termočlánky. Při experimentu byl pozorován pokles teploty chladiva během hlavní oxidace, sníženého průtoku chladiva a intenzivní produkce vodíku. Vodík, díky své vyšší tepelné vodivosti, způsobuje větší přestup tepla z chladiva do stěn ve srovnání s vodní párou. Výpočet správně predikuje pokles teplot na výstupu ze svazku a v experimentální smyčce (s výjimkou horké větve, kde však bylo měření termočlánku pravděpodobně ovlivněno nižšími teplotami v ohybu vertikální trubky). Dále je predikován i návrat teplot chladiva na původní hodnoty po ukončení hlavní oxidace. Tím se výpočet odlišuje od údajů měření v oblasti parního generátoru, které však bylo ovlivněno problémy s měřením na termočláncích.

Celkově je však vývoj teploty chladiva v jednotlivých výškách parního generátoru mírně podhodnocen. Transport vybraných štěpných produktů v experimentální smyčce je dobře předpovězen v horké větvi, ale je silně podhodnocena retence na větvi studené, což je pravděpodobně způsobeno v experimentu dle měření realizova-

nými nižšími teplotami ve studené větvi, díky čemuž je kondenzace par a depozice aerosolů mnohem výraznější, než by tomu bylo pro vyšší teploty, jež byly dle specifičného reportu nastaveny ve výpočtu. Dalším důvodem odchylky je fakt, že výpočet nemohl předpokládat ucpání vstupu do parního generátoru sloučeninami bóru, ke kterému v průběhu experimentu došlo a které způsobuje významné depozice právě na tomto úseku.

V kontejnmentové fázi byla nalezena velice dobrá shoda průběhu tlaku, průměrné teploty, průměrné relativní vlhkosti a rychlosti kondenzace s experimentálními daty. Správně bylo v průběhu těchto veličin postihnuto odsávání vzorků atmosféry vzorkovacími stanicemi. Je správně predikována nejvyšší depozice aerosolů na suchém dně nádoby díky gravitační sedimentaci a na mokřích kondenzátorech, díky vytvořenému lokálnímu podtlaku z kondenzace a díky přispění termoforézy a difusioforézy. Absolutní hodnoty celkové hmotnosti aerosolů a jejich distribuce však nelze přímo s experimentem srovnávat z důvodu rozdílného úniku a retence na studené větvi.

Výsledky chemické fáze jsou značně ovlivněny nejen rozdílným množstvím úniku jodu a jeho retencí na studené větvi, ale také faktem, že v průběhu experimentu došlo k úniku jodu do kontejnmentu převážně v plynné formě. Tento jev se odlišoval od předchozích FPT testů, kdy byl únik jodu do kontejnmentu výhradně ve formě aerosolů (např. CsI), a je přisuzován použití materiálu B₄C místo slitiny Ag-In-Cd jako absorbéru. Kódem ASTEC je správně predikován zvýšený podíl plynné formy jodu, avšak jeho zastoupení je značně menšinové oproti aerosolu. Toto odklonění od výsledků experimentu by mohlo být způsobeno odlišným množstvím transportovaného cesia do KTMT, které tvoří nejčastější aerosolovou formu jodu – CsI a které bylo v experimentu silně ovlivněno krátkodobým ucpáním experimentální smyčky sloučeninami bóru. Zbylé výsledky chemické fáze jsou dále ve shodě s teorií speciace jodu, pokud se přihlédně k faktu, že byl únik jodu převážně ve formě aerosolu a ne plynu. Výjimkou bylo fungování sprchového systému, který svou implementací v kódu ASTEC interaguje pouze s aerosoly ve vzhledu.

Z vyhodnocení jednotlivých fází a srovnání nejdůležitějších výstupních parametrů s experimentálními daty se došlo v závěru k zhodnocení, že integrální kód ASTEC je obecně úspěšný v simulaci modelované úlohy experimentu FPT-3. Kód sice podhodnotil produkci vodíku, ale odchylka byla pravděpodobně způsobena nižším štěpným výkonem předepsaným *benchmarkem*. Kód dále podhodnotil retenci štěpných produktů na studené větvi. Ta však byla ovlivněna jednak částečným dočasným ucpáním smyčky během experimentu, které kód neuvažoval, a jednak dle měření nižšími teplotami ve studené větvi než jak byly předepsány v zadání *benchmarku*. Následkem toho je vyšší únik štěpných produktů do kontejnmentu a špatně odhadnutý poměr plynné a aerosolové formy jodu.

V rámci doporučení pro modelování specifických jevů těžkých havárií identifikovaných v experimentu Phébus FPT-3 pomocí integrálního kódu ASTEC je třeba vyzdvihnout zvolení vhodné a dostatečně jemné nodalizace, správné nastavení okrajových podmínek a detailní zadání pevných struktur, jejich ploch, orientace a jejich údajů o natřených a nenatřených površích. Všechny tyto parametry mají významný dopad na retenci štěpných produktů a na chování plynů a aerosolů včetně procesu speciace jodu. Dále je třeba si uvědomit, že proces degradace je obtížně predikovatelný a silně závislý na zjednodušených modelech degradace a lokálních jevech.

Při vypracování této diplomové práce se podařilo vytvořit vstupní model pali-
vového svazku, experimentální smyčky a nádoby kontejnmentu integrálního *in-pile*
experimentu Phebus FPT-3 v integrálním kódu ASTEC, který umožnil provedení
validačního výpočtu dle specifikací pro mezinárodní srovnávací úlohu. Bylo prove-
dono celkové zhodnocení úspěšnosti simulace a byly uděleny doporučení pro modelo-
vání specifických jevů těžkých havárií. Splněním požadavků mezinárodní srovnávací
úlohy by práce mohla přispět k validačnímu procesu výpočetního integrálního kódu
ASTEC z hlediska Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

Seznam použitých zdrojů

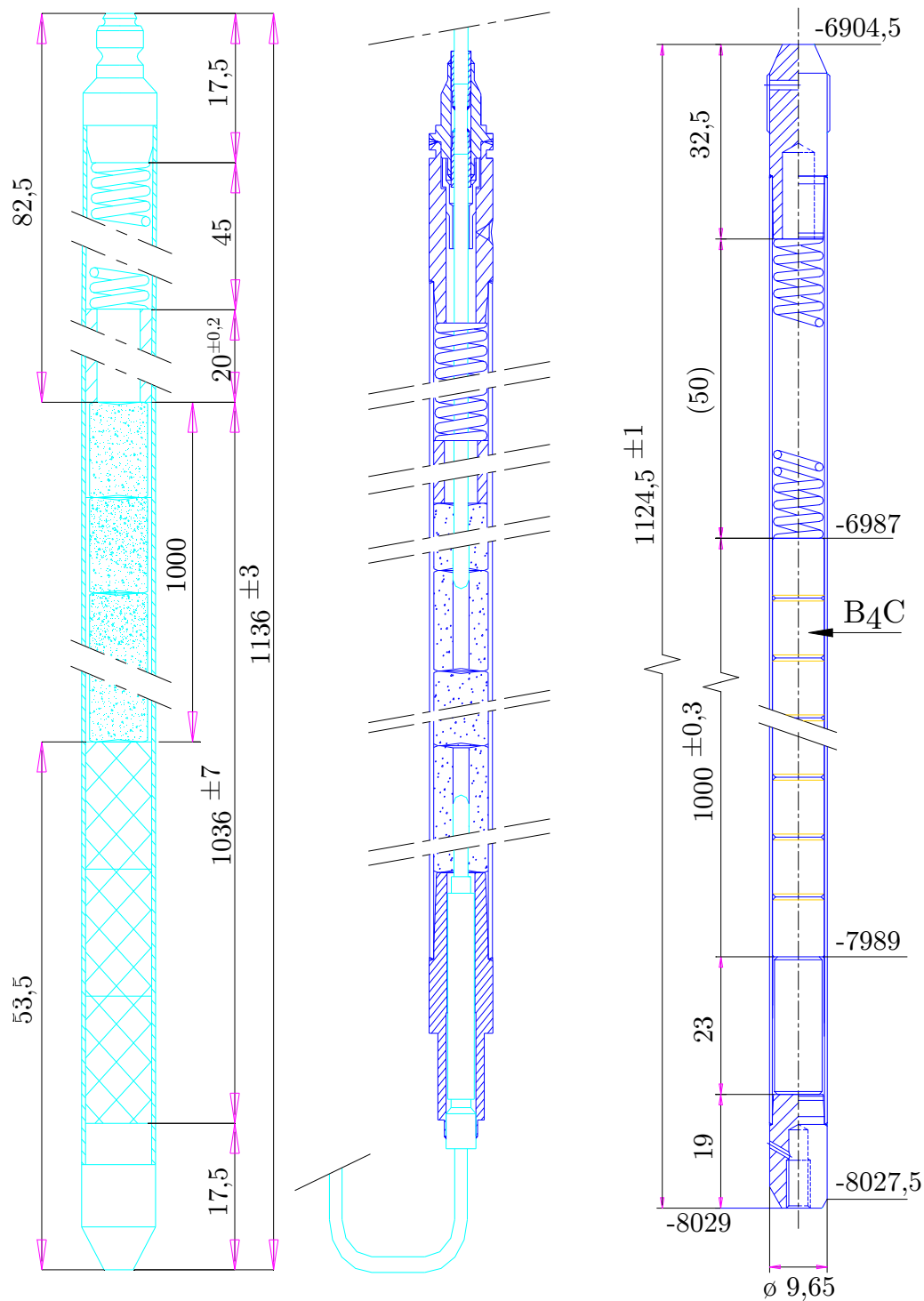
- [1] CLÉMENT, B.; ZEYEN, R. The objectives of the Phébus FP experimental programme and main findings. *Annals of Nuclear Energy*. 2013, roč. 61.
- [2] TICHÝ, Š. *Simulace degradace aktivní zóny reaktoru integrálním kódem pro analýzy těžkých havárií MELCOR*. 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [3] PELLEGRINI, M. et al. *Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Summary Report*. 2021. Tech. zpr. OECD NEA.
- [4] BANDINI, G.; WEBER, S.; AUSTREGESILO, H.; DREI, P. et al. Status and results of the OECD benchmark exercise on TMI-2 plant. In: *6th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR 2013), Avignon, France, October*. 2013.
- [5] TICHÝ, Š. *Výpočet úniku štěpných produktů do kontejnmentu při těžké havárii na reaktoru VVER-1000 kódem ASTEC*. 2023. Výzkumný úkol. České vysoké učení technické v Praze.
- [6] JACQUEMAIN, D. *Nuclear power reactor core melt accidents: Current State of Knowledge*. Francie: EDP Sciences, 2015. ISBN 978-2-7598-1835-8.
- [7] HOBBS, R.R.; MCPHERSON, G.D. *A summary of results from the LOFT LP-FP-2 test and their relationship to other studies at the power burst facility and of the three mile island unit 2 accident*. 1991. Tech. zpr. OECD NEA.
- [8] SEHGAL, B. *Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology*. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-388446-6.
- [9] VEJBORNÝ, V. *Těžké havárie jaderných elektráren*. Brno: Centrum Přípravy Personálu útvar Základní Příprava JE, ČEZ, a. s., 2015.
- [10] HOFMANN, P. et al. Chemical-Physical Behavior of Light Water Reactor Core Components Tested Under Severe Reactor Accident Conditions in the CORA Facility. *Nuclear Technology*. 1997, roč. 118, s. 200–224. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.13182/NT118-200>.
- [11] KLEYKAMP, H. The chemical state of the fission products in oxide fuels. *Journal of Nuclear Materials*. 1985, roč. 131, č. 2-3, s. 221–246.
- [12] PONTILLON, Y.; DUCROS, G. Behaviour of fission products under severe PWR accident conditions. The VERCORS experimental programme–Part 3: Release of low-volatile fission products and actinides. *Nuclear Engineering and Design*. 2010, roč. 240, č. 7, s. 1867–1881.

- [13] KOTOUČ, M. *Přepočítání integrálního experimentu Phebus FPT3 za účelem validace kódu ASTEC V2.0: Technical Report ÚJV Z-3546-T*. 2012. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.
- [14] SCHWARZ, M.; HACHE, G.; VON DER HARDT, P. PHEBUS FP: a severe accident research programme for current and advanced light water reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 1999, roč. 187, č. 1.
- [15] PAYOT, F. et al. *Phebus FP: FPT3 Final report*. 2010. Tech. zpr., DPAM/DIR-2010-148. IRSN.
- [16] BIELIAUSKAS, A.; HASTE, T. *Specifications of SARNET2 Phebus FPT3 Benchmark*. 2011. Tech. zpr., DPAM-SEMIC-2011-057. IRSN.
- [17] CHRÉTIEN, A. M. *Data Book FPT3*. 2007. Tech. zpr., DPAM-CPEX-2007-253. IRSN.
- [18] CHAILAN, L.; LABORDE, L. *Overview of the ASTEC V3.1 integral code*. 2022. Tech. zpr., IRSN/2022-00646. IRSN.
- [19] CHATELARD, P. ASCOM project overview and description of work. *SARNET-ASCOM-COORDI-P1*. 2018.
- [20] KANZLEITER, T. et al. *OECD-NEA THAI Project: Final Report - Hydrogen and Fission Product Issues Relevant for Containment Safety Assessment under Severe Accident Conditions*. 2010. Tech. zpr. Becker Technologies GmbH.
- [21] IRSN. *The ASTEC software system* [online]. [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://en.irsn.fr/research/astec-software-system>.
- [22] TOPIN, V.; CARÉNIN, L. et al. *ASTEC: CESAR physical and numerical modelling*. 2021. Tech. zpr., IRSN/2021-00185. IRSN.
- [23] REINKE, N. *ASTEC V2.1 CPA reference manual*. Tech. zpr., ASTEC-V2/DOC/15-03. IRSN.
- [24] ROBERTA, M.; FARVACQUE, M. et al. *CATHARE 2 V2.5 : a fully validated CATHARE version for various applications*. 2003.
- [25] TOPIN, V.; CARÉNIN, L. et al. *ASTEC ICARE module : User Manual*. Tech. zpr., IRSN/2021-00300. IRSN.
- [26] COINDREAU, O.; KREMER, F. *ASTEC SOPHAEROS module: User manual*. 2021. Tech. zpr., IRSN/2021-00245. IRSN.
- [27] SANTAMARINA, A.; BERNARD, D. et al. The JEFF-3.1.1 nuclear data library. *JEFF report*. 2009, roč. 22, č. 10.2, s. 2.
- [28] COUSIN, F.; JACQ, F. *ASTEC ISODOP module : theoretical manual*. Tech. zpr., PSNRES/SAG/2015-00366. IRSN.

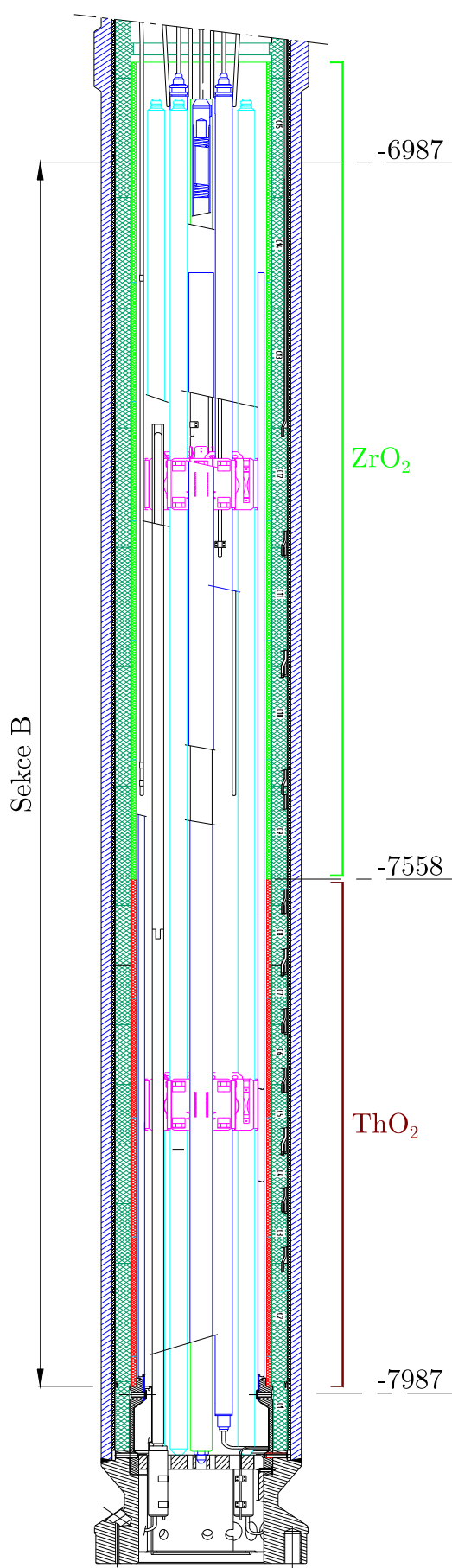
Přílohy

Příloha A

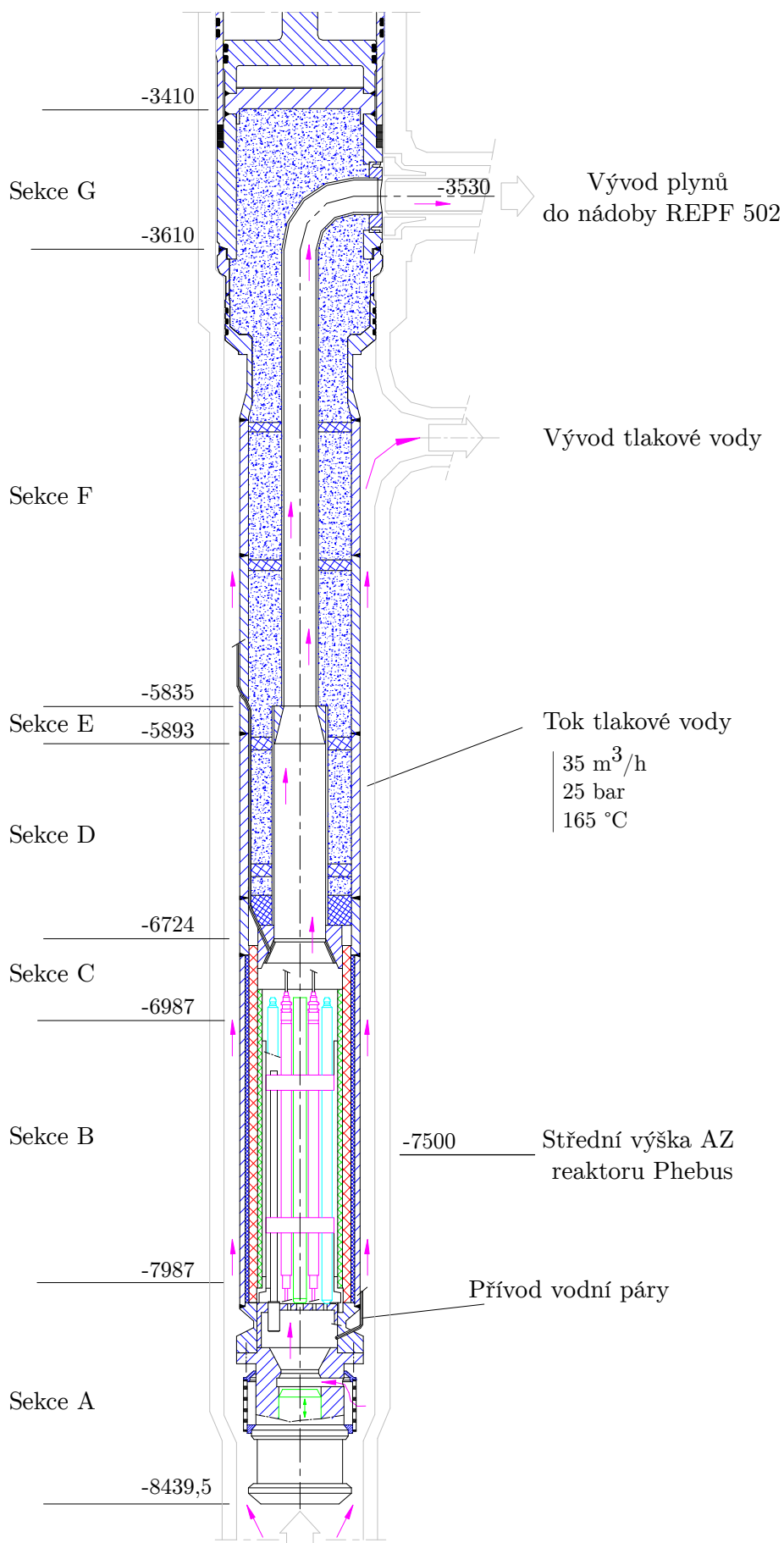
Schémata komponent experimentu Phebus FPT-3



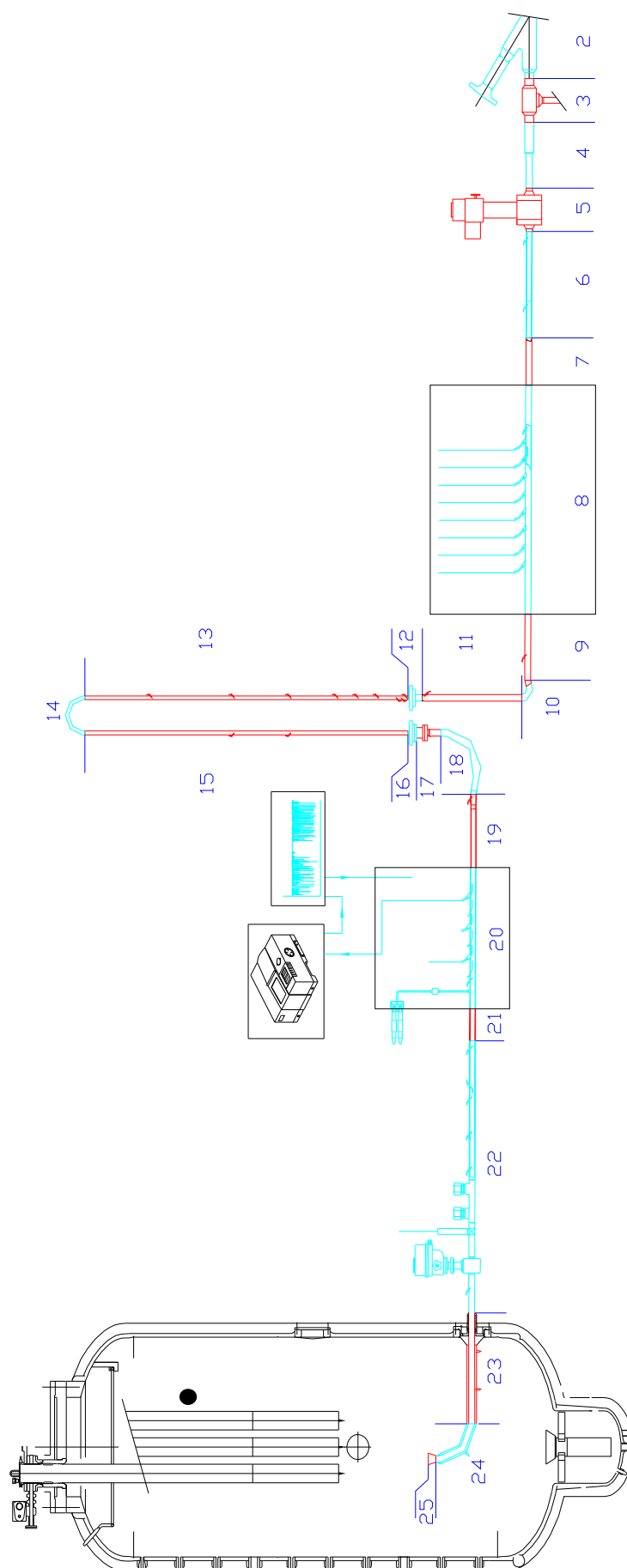
Obr. A.1: Vertikální řez předozářeným PP (vlevo), nepředozářeným čerstvým PP (uprostřed) a centrálním AP (vpravo), přeloženo z [17].



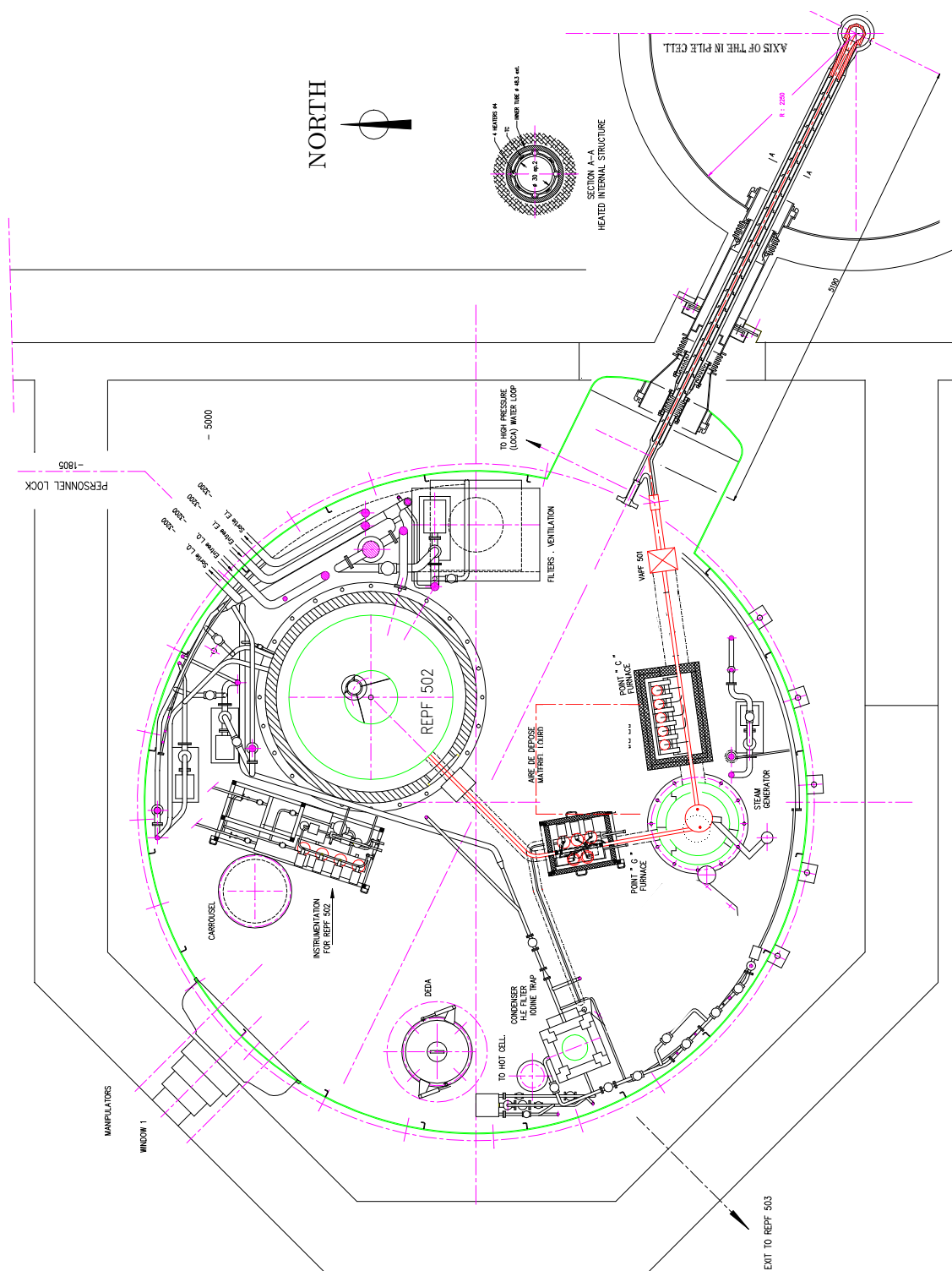
Obr. A.2: Vertikální řez palivovým svazkem, přeloženo z [17].



Obr. A.3: Vertikální řez experimentálním kanálem, kde jednotlivé sekce značí dno svazku (A), palivový svazek (B), horní směšovací komoru (C), tranzitní úsek (D), zúžení (E), vertikální trubka (F) a ohyb (G), přeloženo z [17].



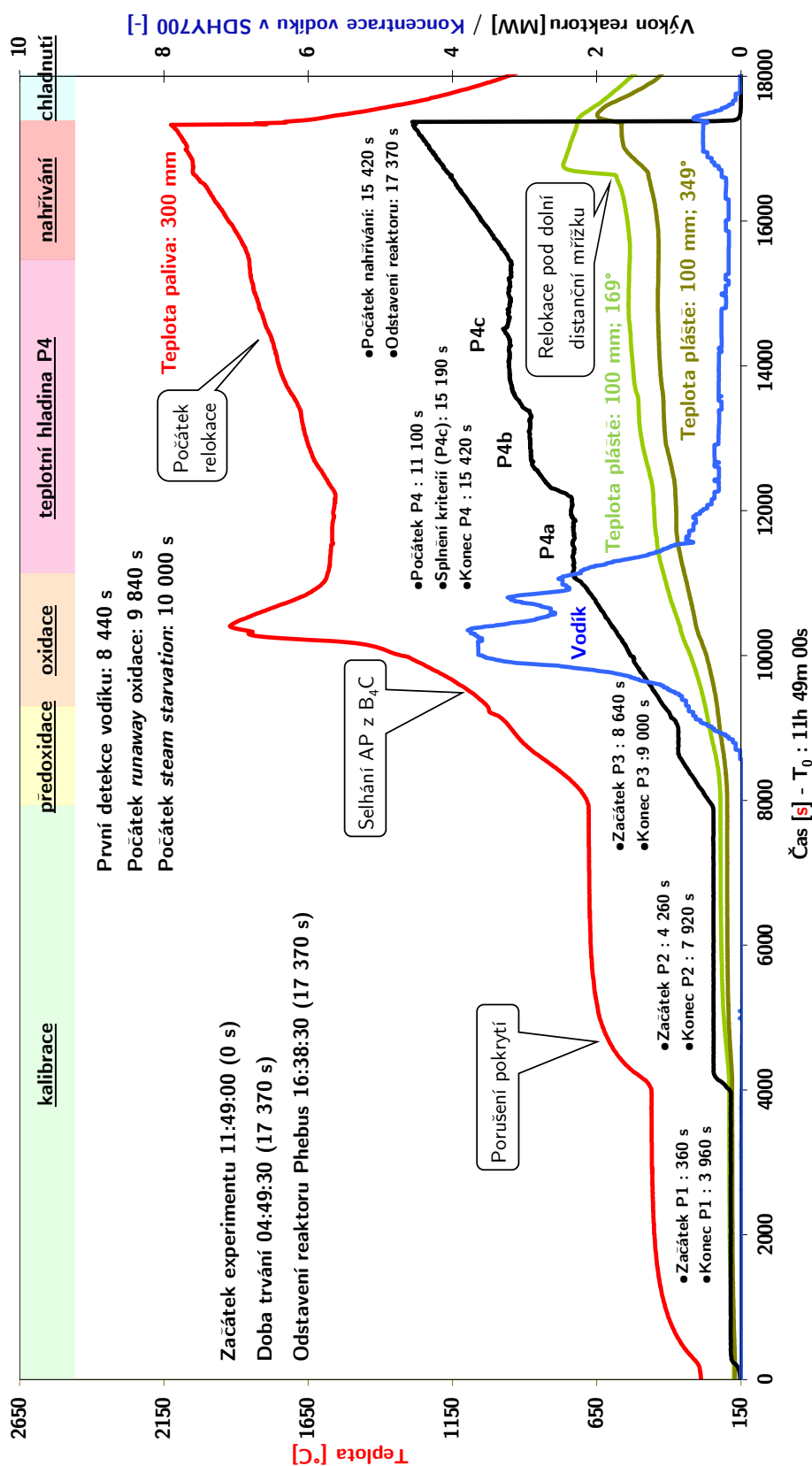
Obr. A.4: Celkový pohled na experimentální smyčku v jedné rozvinuté rovině [17].



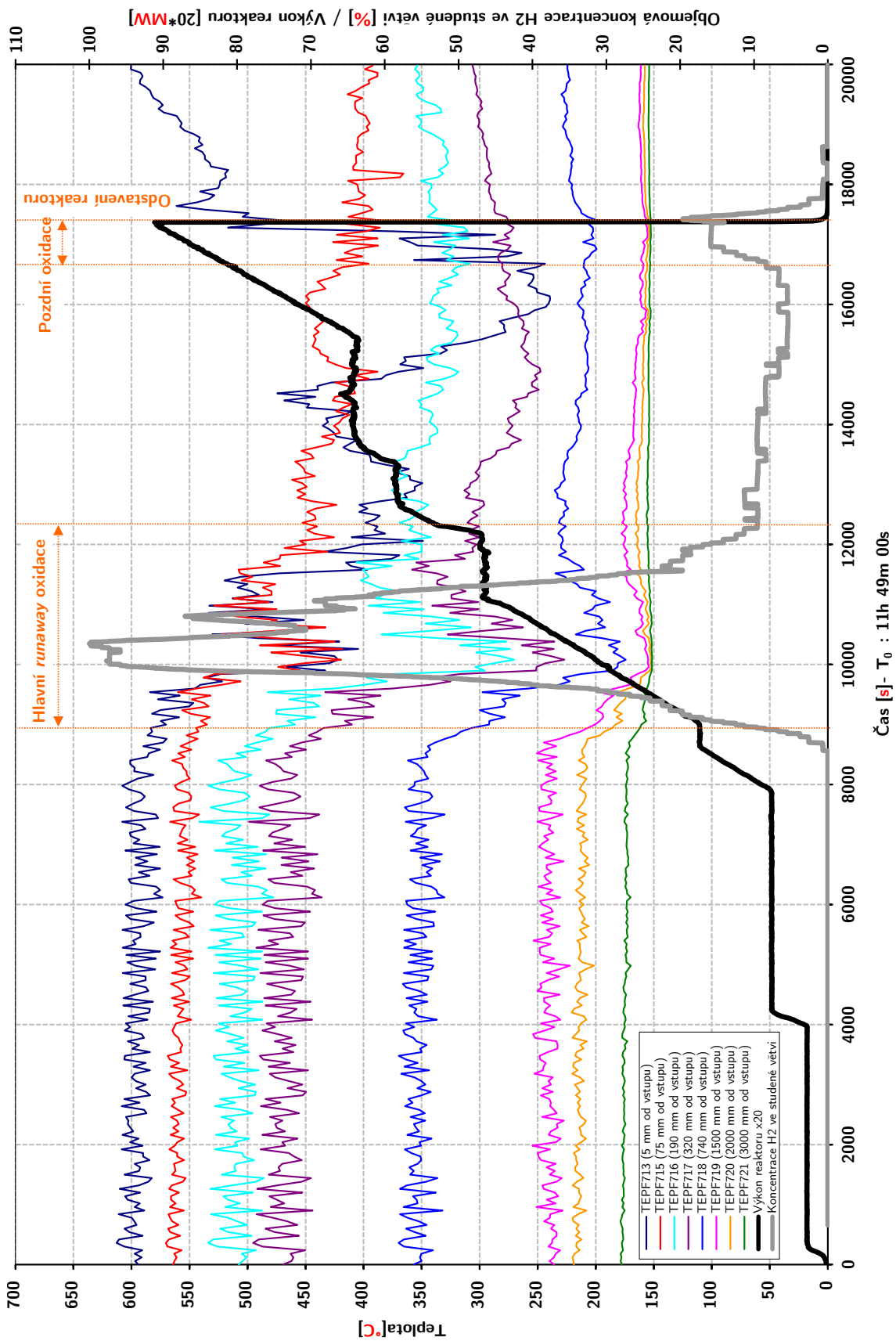
Obr. A.5: Celkový pohled shora na celé experimentální zařízení Phebus FP. Vpravo nahoře se nalézá osa experimentálního kanálu, následuje horká větev, koleno, měřící stanoviště C, PG, studená větev, měřící stanoviště G, koleno a nakonec výstup do nádoby REPF 502 – KTMT. [15]

Příloha B

Výsledky experimentu Phebus FPT-3



Obr. B.1: Průběh degradace svazku během experimentu FPT-3, přeloženo z [15].



Obr. B.2: Teploty na horké větvi PG během experimentu FPT-3, přeloženo z [15].

Tab. B.1: Hmotnostní bilance prvků ke konci degradační fáze [15]

Hmotnostní bilance experimentu [mg]										
Vzácné plyny	Metoda	Svazková část				Horká větev		PG		Studená větev
		Celkově	Paliv. svazek	Horní komora	Vertikální trub.	Deponováno	Transport	Deponováno	Deponováno	
Kr	γ-spectrometry									Transport
Xe	γ-spectrometry									1,92E+03 2,54E+04
Ag	γ-spectrometry/ICP-MS	5,22E+01	5,22E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,14E+00	9,94E+01	5,47E+00	3,02E+00	3,06E+01
Ba	γ-spectrometry/ICP-MS	1,07E+04	1,07E+04	1,36E+01	5,56E+00	2,16E+01	3,43E+02	2,86E+01	7,48E+00	6,68E+01
Cd	ICP-MS	(1,01E+02)				2,50E-01	6,63E+01	1,90E+01	3,56E+00	3,65E+01
Ce	ICP-MS	1,39E+04	1,39E+04	2,16E+01	5,22E-01	1,14E+00	1,92E+01	1,17E+00	4,68E-01	4,77E+00
Cs	γ-spectrometry	6,74E+03	5,69E+03	7,62E+02	2,86E+02	5,08E+02	9,90E+03	3,87E+03	3,41E+02	3,96E+03
I	γ-spectrometry	2,88E+02	2,50E+02	2,46E+01	1,33E+01	2,02E+00	8,89E+02	≥1,11E+02	1,98E+00	4,06E+02
Nd	ICP-MS								2,62E-02	3,55E-01
Pd	ICP-MS	(3,43E+03)				3,24E-01	5,28E+00	5,55E+00	8,47E-02	8,65E-01
Pr	ICP-MS								1,45E-02	1,51E-01
Rh	ICP-MS					6,72E-02	1,10E+00	9,29E-02		
Ru	ICP-MS	1,14E+04	1,14E+04	3,08E-02	2,66E-01	3,19E+00	5,14E+01	8,11E-01	3,01E+00	3,06E+01
Te	γ-spectrometry/ICP-MS	1,69E+03	5,45E+02	4,98E+02	6,50E+02	1,91E+02	3,44E+02	4,56E+01	1,21E+01	1,24E+02
Rb	ICP-MS	(1,78E+03)				4,32E+01	9,27E+02	7,36E+02	4,64E+01	4,71E+02
Sr	ICP-MS	(5,38E+03)				3,17E+00	5,67E+01	4,31E+00	1,59E+00	1,61E+01
Y	ICP-MS								1,05E-02	9,36E-02
Mb	γ-spectrometry/ICP-MS	1,73E+04	1,66E+04	5,57E+02	1,01E+02	2,59E+02	6,51E+03	1,18E+03	3,11E+02	3,13E+03
Tc	ICP-MS	(5,29E+03)				9,53E+00	1,50E+02	4,75E+01	1,57E+00	1,59E+01
La	ICP-MS	(8,04E+03)				2,67E-01	4,47E+00	3,36E-02	8,71E-02	8,88E-01
Sb	γ-spectrometry/ICP-MS	(3,69E+01)	(3,22E+01)	4,06E+00	6,27E-01	7,29E+00	3,09E+00	7,26E-01	5,44E-01	5,58E+00
Nb	γ-spectrometry			1,26E-03	5,76E-05	1,53E-04				
Zr	γ-spectrometry	2,74E+04	2,74E+04	6,76E-01		1,48E+00				
Eu	γ-spectrometry	5,41E+02	5,41E+02							
B	ICP-MS / gas	≥1,34E+04								
Sn	ICP-MS	(3,74E+04)				5,47E+02	8,60E+03	≥4,34E+03	1,33E+02	1,35E+03
Zr	ICP-MS	(3,69E+06)				8,90E+02	1,40E+04	6,60E+02	1,60E+02	1,62E+03
W	ICP-MS	(2,04E+04)				2,06E+02	9,85E+01	4,02E+00	4,90E+00	4,98E+01
Re	ICP-MS	(4,41E+05)				1,57E+02	2,65E+03	2,59E+01	9,99E+01	1,02E+03
U	ICP-MS	(9,89E+06)				7,54E+02	1,19E+04	2,23E+03	7,17E+01	1,23E+03
Pu	ICP-MS	(5,84E+04)				4,05E+02	6,38E+03	1,42E+03	6,44E+00	6,54E+01
						3,49E-04	5,49E-03	1,08E-03	1,97E-04	2,01E-03

Tab. B.2: Procentuální hmotnostní bilance prvků ke konci degrační fáze [15]

Hmotnostní bilance experimentu [% poč. inv.]															
Vzácné plyny	Metoda	Svazková část				Horká větev			PG			Studená větev			
		Celkově	Paliv. svazek	Horní komora	Vertikální trub.	Deponováno	Transport	Deponováno	Deponováno	Deponováno	Transport	Deponováno	Transport		
Kr	γ-spectrometry														
Xe	γ-spectrometry														
Ag	γ-spectrometry/ICP-MS	2,97E+01	2,97E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,36E+00	5,66E+01	3,12E+00	1,72E+00	1,75E+01	1,72E+00	1,75E+01	1,75E+01	7,40E+01	8,15E+01
Ba	γ-spectrometry/ICP-MS	9,39E+01	9,37E+01	1,20E-01	4,89E-02	1,90E-01	3,01E+00	2,51E-01	6,57E-02	5,86E-01	6,57E-02	5,86E-01	5,86E-01	7,40E+01	8,15E+01
Cd	ICP-MS	(6,04E+01)				1,49E-01	3,94E+01	5,53E-01	2,12E+00	2,17E+01	2,12E+00	2,17E+01	2,17E+01	7,40E+01	8,15E+01
Ce	ICP-MS	9,06E+01	9,05E+01	1,41E-01	3,41E-03	7,44E-03	1,25E-01	7,64E-03	3,05E-03	3,12E-02	3,05E-03	3,12E-02	3,12E-02	7,40E+01	8,15E+01
Cs	γ-spectrometry	4,21E+01	3,55E+01	4,76E+00	1,79E+00	3,18E+00	6,19E+01	2,42E+01	2,13E+00	2,48E+01	2,13E+00	2,48E+01	2,48E+01	7,40E+01	8,15E+01
I	γ-spectrometry	2,43E+01	2,11E+01	2,07E+00	1,12E+00	1,70E-01	7,48E+01	≥9,37E+00	1,67E-01	3,41E+01	1,67E-01	3,41E+01	3,41E+01	7,40E+01	8,15E+01
Nd	ICP-MS													7,40E+01	8,15E+01
Pd	ICP-MS	(9,98E+01)				9,42E-03	1,53E-01	1,61E-01	2,46E-03	2,51E-02	2,46E-03	2,51E-02	2,51E-02	7,40E+01	8,15E+01
Pr	ICP-MS													7,40E+01	8,15E+01
Rh	ICP-MS					2,29E-03	3,76E-02	1,26E-03	1,97E-04	2,05E-03	1,97E-04	2,05E-03	2,05E-03	7,40E+01	8,15E+01
Ru	ICP-MS	9,92E+01	9,92E+01	2,69E-04	2,32E-03	2,78E-02	4,48E-01	7,08E-03	2,63E-02	2,67E-01	2,63E-02	2,67E-01	2,67E-01	7,40E+01	8,15E+01
Te	γ-spectrometry/ICP-MS	6,21E+01	2,00E+01	1,83E+01	2,38E+01	7,01E+00	1,26E+01	1,67E+00	4,43E-01	4,54E+00	1,67E+00	4,43E-01	4,54E+00	7,40E+01	8,15E+01
Rb	ICP-MS	(6,47E+01)				1,57E+00	3,37E+01	2,68E+01	1,69E+00	1,71E+01	1,69E+00	1,71E+01	1,71E+01	7,40E+01	8,15E+01
Sr	ICP-MS	(9,89E+01)				5,83E-02	1,04E+00	7,92E-02	2,92E-02	2,96E-01	2,92E-02	2,96E-01	2,96E-01	7,40E+01	8,15E+01
Y	ICP-MS													7,40E+01	8,15E+01
Mb	γ-spectrometry/ICP-MS	7,99E+01	7,69E+01	2,58E+00	4,68E-01	1,20E+00	2,80E+01	5,09E+00	1,34E+00	1,35E+01	1,34E+00	1,35E+01	1,35E+01	7,40E+01	8,15E+01
Tc	ICP-MS	(9,71E+01)				1,75E-01	2,75E+00	8,71E-01	2,87E-02	2,92E-01	2,87E-02	2,92E-01	2,92E-01	7,40E+01	8,15E+01
La	ICP-MS	(9,99E+01)				3,32E-03	5,56E-02	4,18E-04	1,08E-03	1,10E-02	1,08E-03	1,10E-02	1,10E-02	7,40E+01	8,15E+01
Sb	γ-spectrometry/ICP-MS	(7,81E+01)	(6,81E+01)	8,59E+00	1,33E+00	1,54E+01	6,53E+00	1,54E+00	1,15E+00	1,18E+01	1,54E+00	1,15E+00	1,18E+01	7,40E+01	8,15E+01
Nb	γ-spectrometry					5,33E-03								7,40E+01	8,15E+01
Zr	γ-spectrometry	1,03E+02	1,03E+02	4,42E-02	2,01E-03	5,58E-03								7,40E+01	8,15E+01
Eu	γ-spectrometry	1,37E+02	1,37E+02	2,54E-03										7,40E+01	8,15E+01
B	ICP-MS / gas	≥2,30E+01				9,35E-01	1,47E+01	≥7,42E+00	2,27E-01	2,31E+00	≥7,42E+00	2,27E-01	2,31E+00	7,40E+01	8,15E+01
Sn	ICP-MS	(7,15E+01)				1,70E+00	2,68E+01	1,26E+00	3,05E-01	3,10E+00	1,26E+00	3,05E-01	3,10E+00	7,40E+01	8,15E+01
Zr	ICP-MS	(1,00E+02)				5,58E-03	2,67E-03	1,09E-04	1,33E-04	1,35E-03	1,09E-04	1,33E-04	1,35E-03	7,40E+01	8,15E+01
W	ICP-MS	(8,79E+01)				6,75E-01	1,14E+01	1,11E-01	4,30E-01	4,37E+00	1,11E-01	4,30E-01	4,37E+00	7,40E+01	8,15E+01
Re	ICP-MS	(9,72E+01)				1,66E-01	2,62E+00	4,93E-01	1,58E-02	2,72E-01	4,93E-01	1,58E-02	2,72E-01	7,40E+01	8,15E+01
U	ICP-MS	(9,99E+01)				4,52E-03	7,10E-02	1,58E-02	7,17E-05	7,29E-04	1,58E-02	7,17E-05	7,29E-04	7,40E+01	8,15E+01
Pu	ICP-MS	(1,00E+02)				3,49E-04	5,49E-03	1,08E-03	1,97E-04	2,01E-03	1,08E-03	1,97E-04	2,01E-03	7,40E+01	8,15E+01