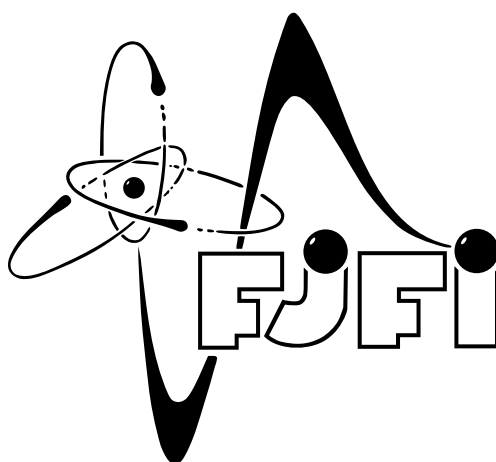


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra jaderných reaktorů
Obor: Jaderné inženýrství



**Simulace degradace aktivní zóny reaktoru
integrálním kódem pro analýzy těžkých havárií
MELCOR**

**Numerical Study of Reactor Core Degradation
Carried out with the MELCOR Severe Accident
Analysis Code**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Štěpán Tichý

Vedoucí práce: Ing. Sebastian Nývlt

Konzultant práce: Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.

Rok: 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- Student: **Štěpán Tichý**
- Studijní program: Aplikace přírodních věd
- Obor: Jaderné inženýrství
- Název práce česky: **Simulace degradace aktivní zóny reaktoru integrálním kódem pro analýzy těžkých havárií MELCOR**
- Název práce anglicky: Numerical Study of Reactor Core Degradation Carried out with the MELCOR Severe Accident Analysis Code

Pokyny pro vypracování:

1. Nastudujte základní fenomenologii těžkých havárií (TH) jaderných energetických reaktorů lehkovodního typu, a to především jevy spjaté s degradací aktivní zóny (AZ): nahřívání paliva, únik plynných štěpných produktů (ŠP), vysokoteplotní oxidaci palivového pokrytí, hroucení (relokaci) a tavení částí AZ a selhání dna reaktorové nádoby vlivem jeho tepelně-mechanického namáhání od vytvořeného bazénu taveniny (koria).
2. Seznamte se se základními charakteristikami reaktoru VVER-1000/320 (JE Temelín, ETE). Zaměřte se zejména na konstrukci palivových souborů a vnitro-reaktorových komponent, dále pak na prvky I.O, resp. II.O a zevrubně na dispozici ochranné obálky – kontejnmentu.
3. Seznamte se s aktuální verzí (2.2.18019) kódu MELCOR, zejména s jeho částmi-moduly, řešícími fyzikálně specifické oblasti problematiky TH: degradaci AZ (COR), přestup tepla a hmoty konvekcí (CHV/FL), vedení tepla v pevných strukturách (HS) a uvolňování a transport ŠP včetně přiřazení adekvátního rozpadového tepla (DCH/RN). Dále se seznamte s architekturou vstupních dat pro kód MELCOR, a to na příkladu předpřipraveného vzorového souboru vstupních parametrů pro JE s reaktorem VVER-1000/320 (ETE).
4. Identifikujte takové parametry nastavení fyzikálních modelů a charakteristik JE, jež mají potenciál významně ovlivnit výsledky analýz sekvencí TH. Variováním těchto parametrů (s využitím programu DAKOTA) proveďte citlivostní studii výpočtů 2 základních scénářů TH: LOCA a SBO. Pro post-processing výsledků použijte zobrazovací nástroj VINSAP.

Doporučená literatura:

- [1] Sehgal B. R.: Nuclear Safety in Light Water Reactors, Severe Accident Phenomenology, ELSEVIER, 2012, ISBN: 978-0-12-388446-6
- [2] Kotouč M.: Výchozí parametry palivového systému JE Temelín se soubory TVSA-T pro účely analýz těžkých havárií, ÚJV Řež, 2010, Z-3020-T
- [3] Humphries L. L., Beeny B. A., Gelbard F., Louie D. L., Phillips J., Schmidt R. C., Bixler N. E.: MELCOR Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide Version 2.2.19018, Sandia National Laboratory, 2021, SAND2021-0252 O
- [4] Kotouč M.: Aktualizovaná analýza scénáře SBO pro JE Temelín provedená kódem MELCOR 2.2: základní varianta, ÚJV Řež, 2018, Z-5014-T
- [5] Mascari F., Bersano A., Agnello G., Angelucci M.: MELCOR/DAKOTA coupling in the SNAP environment/architecture, Proceedings of the CSARP/MCAP Meeting (virtual – MS Teams), June 7-11 2021
- [6] Svatek J., Tschiesche J.: Vizualizační aplikace pro MELCOR, uživatelská příručka, ÚJV Řež, 2017, Z-4913

Jméno a pracoviště vedoucího práce: **Ing. Sebastian Nývlt**
KJR FJFI ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště konzultanta práce: **Ing. Miroslav Kotouč, Ph.D.**
ÚJV Řež, a.s.


Datum zadání bakalářské práce: 11.10. 2021

Datum odevzdání bakalářské práce: 7.7. 2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

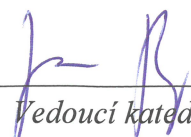
V Praze dne 11.10. 2021

doc. Ing. Martin Kropík, CSc.



Garant oboru

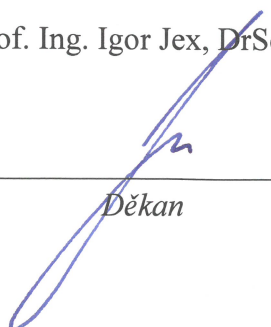
Ing. Jan Rataj, Ph.D.



Vedoucí katedry



prof. Ing. Igor Jex, DrSc.



Děkan

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Štěpán Tichý

Poděkování

Tímto děkuji Ing. Sebastianu Nývltovi a Ing. Miroslavu Kotoučovi, Ph.D., za ochotu, trpělivost, pomoc a odborné rady, které mi společně s jejich mentorstvím napomohly nejen při vypracování této bakalářské práce, ale také při volbě další pracovní kariéry.

Dále chci poděkovat Hance Horákové za neustávající podporu, porozumění a pomoc s jazykovou a typografickou korekturou.

Štěpán Tichý

Název práce:

Simulace degradace aktivní zóny reaktoru integrálním kódem pro analýzy těžkých havárií MELCOR

Autor: Štěpán Tichý

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Jaderné inženýrství

Druh práce: Bakalářská 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 identifikovat potenciálně významné parametry ovlivňující průběh výpočtové analýzy těžké havárie v kódu MELCOR na modelu jaderného reaktoru VVER-1000 a sledovat vliv těchto parametrů na výsledky – formou citlivostní studie. Práce shrnuje dostupné informace o fenomenologii těžkých havárií, jaderném reaktoru VVER-1000 na JE Temelín a o struktuře a vlastnostech kódu MELCOR. V praktické části práce jsou vybrány parametry pro variaci a popsána metoda analýzy rozptylu, která byla použita pro zjištění případného statisticky významného vlivu některého z parametrů. V závěrečné části práce je provedena podrobná analýza a vyhodnocení skutečnějších výpočtů těžké havárie.

Klíčová slova: těžká havárie, MELCOR, citlivostní analýza, jaderná elektrárna, VVER-1000

Abstract: The aim of the thesis is to identify potentially significant parameters prone to alter the course of a severe accident analyzed with the aid of the MELCOR code for the WVER-1000 and to monitor the influence of these parameters on the results – in the form of a sensitivity study. The thesis summarizes available pertinent information on the phenomenology of severe accidents, the WVER-1000 nuclear reactor of the Temelín NPP and on the structure and characteristics of the MELCOR code. In the practical part of the thesis, parameters for variation are selected and a method of variance analysis is described. This method was used to determine the possible statistically significant influence of any of the parameters. In the final part of the thesis, a detailed analysis of 2 substantially different severe accidents is performed together with the evaluation of the sensitivity study.

Key words: severe accident, MELCOR, sensitivity study, nuclear power plant, WVER-1000

Obsah

Seznam použitých zkratk	3
Seznam tabulek	5
Seznam obrázků	6
Úvod	9
1 Fenomenologie těžké havárie	11
1.1 Jaderná bezpečnost a stavy JZ	12
1.2 Iničiační událost a rozvoj těžké havárie	16
1.3 Termohydraulické procesy v degradující AZ	17
1.4 Oxidace a zvyšování teploty AZ	19
1.5 Ztráta geometrie AZ	21
1.6 Selhání dna tlakové nádoby reaktoru	26
1.7 Jevy v kontejnmentu	29
2 Blok JE s VVER-1000/320	31
2.1 Konstrukce palivového souboru a vnitroreaktorových komponent	31
2.2 Základní zařízení primárního okruhu	35
2.3 Technologické systémy v sekundárním okruhu	40
2.4 Kontejnment	44
2.5 Systém havarijního chlazení AZ	45
3 Výpočetní kód MELCOR	47
3.1 Struktura a vlastnosti kódu	48
3.2 Rozbor a popis výpočetních modulů	50
3.3 Architektura vstupních a výstupních dat	56
4 Citlivostní studie výpočtu scénáře těžké havárie	59
4.1 Popis zvolených scénářů SBO a LOCA	59
4.2 Specifikace studovaných parametrů	60
4.3 Koncepce metodiky	62
4.4 Diskuze výsledků	67

Závěr	76
Seznam použitých zdrojů	81
Přílohy	
A Výsledné grafy a vizualizace AZ	I.A
B Výsledky analýzy rozptylu	I.B

Seznam použitých zkratek

České zkratky

AZ	aktivní zóna
BN	barbotážní nádrž
HCC	hlavní cirkulační čerpadlo
I.O	primární okruh
II.O	sekundární okruh
IU	iniciační událost (těžké) havárie
JE	jaderná elektrárna
JZ	jaderné zařízení
KO	kompensátor objemu
KTMT	kontejnment – ochranná obálka reaktoru
MPN	maximální projektová nehoda
NT	nízkotlaký/á
PG	parní generátor
PP	palivový proutek
PS	palivový soubor
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TH	těžká havárie
TNR	tlaková nádoba reaktoru
VT	vysokotlaký/á
Zr	zirkonium/ový
ŠP	štěpné produkty

Cizojazyčné zkratky

ANOVA	analysis of variance (analýza rozptylu)
BWR	boiling water reactor (varný typ reaktoru)
CFD	computational fluid dynamics (numerická dynamika tekutin)
CSARP	Cooperative Severe Accident Research Program (kooperativní program výzkumu těžkých havárií)
CV	control volume (kontrolní objem)
DBA	design basic accident (základní projektová nehoda)
DCH	direct containment heating (přímý ohřev kontejnmentu)
DEC	design extension conditions (rozšířené projektové podmínky). DEC A – události bez vážného poškození paliva, DEC B – události s vážným poškozením paliva
DiD	defense in depth (ochrana do hloubky)
FOM	figure of merit (sledovaný parametr)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
INES	The International Nuclear Event Scale (mezinárodní stupnice závažnosti nehod na jaderných zařízeních)
IVMR	in-vessel melt retention (zadržení taveniny uvnitř reaktorové nádoby)
LHS	latin hypercube sampling (latinské hyperkrychle vzorkování)
LOCA	loss of coolant accident (nehoda s únikem chladiva z primárního okruhu)
LP	lumped parameters (sdružené parametry)
MCCI	molten core-concrete interaction (interakce taveniny s betonem)
OA	orthogonal array (ortogonální pole)
PSA	probabilistic safety assessment (pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti)
PWR	pressurized water reactor (tlakovodní typ reaktoru)
SAMG	severe accident management guidelines (návody na zvládání těžkých havárií)
SBO	station blackout (úplná ztráta vnějších i vnitřních zdrojů střídavého elektrického napájení)
SNL	Sandia National Laboratories
US NRC	United States National Regulatory Commission (Jaderný regulační úřad Spojených států amerických)
VVER	vodo-vodní energetický reaktor (přeloženo z ruštiny)

Seznam tabulek

1.1	Přehled stavů jaderných zařízení (dle projektu) podle SÚJB	13
1.2	Přehled úrovní ochrany do hloubky	14
1.3	Struktura mezinárodní stupnice INES	15
1.4	Pásma četností výskytu iniciačních událostí	17
3.1	Částečná validační matice kódu MELCOR	49
3.2	Rozdělení radionuklidů v kódu MELCOR	55
4.1	Schéma použitého ortogonálního pole (9,4,3,2)	63
4.2	Ilustrativní příklad ANOVA tabulky	65
4.3	Výsledná tabulka pro scénář SBO.	67
4.4	Výsledná tabulka pro scénář LOCA.	72
B.1	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{H_2} ve scénáři SBO	I.B
B.2	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{tav} ve scénáři SBO.	II.B
B.3	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM $m_{\xi P}$ ve scénáři SBO.	III.B
B.4	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM τ_{end} ve scénáři SBO.	IV.B
B.5	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{H_2} ve scénáři LOCA	V.B
B.6	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{tav} ve scénáři LOCA	VI.B
B.7	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM $m_{\xi P}$ ve scénáři LOCA	VII.B
B.8	Výsledek analýzy rozptylu pro FOM τ_{fail} ve scénáři LOCA	VIII.B

Seznam obrázků

1.1	Vizualizace přirozených cirkulací v primárním okruhu	18
1.2	Osa nejdůležitějších teplot z pohledu rozvoje těžké havárie	22
1.3	Mechanismus poškození palivového pokrytí při nízkotlakém scénáři	23
1.4	Mechanismus poškození palivového pokrytí při vysokotlakém scénáři	24
1.5	Potenciální rozložení metalických a oxidických vrstev koria	27
1.6	Rozložení teplot a tepelného toku v tavenině na dně TNR	28
2.1	Konstrukce palivového souboru TVSA-T	32
2.2	Schéma konstrukce palivového proutku TVEL	33
2.3	Schéma svazku absorpčních tyčí – klastru	34
2.4	Zařízení primárního okruhu JE Temelín	35
2.5	Jaderný reaktor VVER-1000/320	36
2.6	Schéma parního generátoru na JE Temelín	38
2.7	Konstrukce kompenzátoru objemu	39
2.8	Konstrukce parní turbíny na JE Temelín	42
3.1	Příklad vstupních dat pro modul COR	56
3.2	Příklad vstupních dat pro modul CVH	57
4.1	Znázornění ortogonálního LHS rozdělení ve 2-parametrickém prostoru	63
4.2	Vizualizace složek variability v metodě ANOVA	64
4.3	Diagram propojení programu DAKOTA a kódu MELCOR	66
4.4	Vizualizace AZ pomocí nástroje VINSAP	68
4.5	Teplota chladiva na výstupu z AZ ve scénáři SBO	69
4.6	Produkce vodíku z oxidace B_4C ve scénáři SBO	70
4.7	Celková produkce vodíku ve scénáři SBO	70
4.8	Hmotnost ŠP uniklých z paliva ve scénáři SBO	71
4.9	Hmotnost taveniny na dně TNR ve scénáři SBO	71
4.10	Teplota chladiva na výstupu z AZ ve scénáři LOCA	73
4.11	Produkce vodíku z oxidace B_4C ve scénáři LOCA	74
4.12	Celková produkce vodíku ve scénáři LOCA	74
4.13	Hmotnost ŠP uniklých z paliva ve scénáři LOCA	75
4.14	Hmotnost taveniny na dně TNR ve scénáři LOCA	75

A.1	Nodalizace TNR v kódu MELCOR	I.A
A.2	AZ okamžik před IU ve scénáři SBO	II.A
A.3	Selhání opěrné desky AZ ve scénáři SBO	III.A
A.4	Moment před selháním dna TNR ve scénáři SBO	IV.A
A.5	Složky produkce vodíku ve scénáři SBO	V.A
A.6	Celková hmotnost koria v TNR ve scénáři SBO	V.A
A.7	Počátek degradace AZ ve scénáři LOCA	VI.A
A.8	Znovuzaplavení AZ ve scénáři LOCA	VII.A
A.9	Hladina chladiva v AZ ve scénáři LOCA	VIII.A
A.10	Složky produkce vodíku ve scénáři LOCA	VIII.A
A.11	Celková hmotnost koria v TNR ve scénáři LOCA	IX.A

Úvod

Společně se stále rostoucími požadavky na jadernou bezpečnost, nejen v České republice, se čím dál tím více klade důraz i na prozkoumání a pochopení fenoménu těžkých havárií – obecně událostí s vážným poškozením jaderného paliva. Přesto, že pravděpodobnost výskytu takové události by měla být extrémně nízká, tak není nulová, a je proto třeba se pokusit dané problematice porozumět, pokud jí chceme předcházet. Vzhledem k nákladnosti fyzikálních experimentů zabývajících se jevy při těžkých haváriích, které jsou navíc mnohdy náročné na zajištění dostatečné bezpečnosti, je zdroj experimentálních dat omezený, a to i při hledání experimentálních dat z již proběhlých těžkých havárií. Z tohoto důvodu je stěžejní metodou pro zkoumání fenoménu těžkých havárií simulace ve výpočtových kódech. Představitelem této skupiny kódů je například integrální kód MELCOR, který za určitých zjednodušení modeluje kompletní chování všech částí JE, které mohou ovlivnit rozvoj těžké havárie. *Integrální* vlastnost kódu MELCOR znamená, že tento výpočtový kód simuluje kompletní sekvenci těžké havárie – od iniciační události až po potenciální únik radioaktivních látek do okolí.

Tématem předkládané bakalářské práce je identifikování a variování takových parametrů fyzikálních modelů a charakteristik JE, které mají potenciál významně ovlivnit průběh těžké havárie na předpřipraveném modelu JE Temelín s reaktorem VVER-1000/320. Motivací pro následné provedení citlivostní studie byla snaha zjistit, jakým způsobem, a zda správně, je tento model podmíněn těmito parametry.

K identifikování potenciálně významných parametrů bylo nejprve třeba si určit rámec, ve kterém bude těžká havárie zkoumána, a které stěžejní parametry její rozvoj popisují. Pro dosažení tohoto cíle byla v teoretické části této práce potřeba rešerše fenomenologie těžkých havárií, seznámení se se základními zařízeními primárního a sekundárního okruhu, ochrannou obálkou reaktoru – kontejnmentem a se systémy havarijního chlazení AZ na JE Temelín a také se se strukturou kódu MELCOR a architekturou jeho vstupních a výstupních dat.

První kapitola nejprve uvádí pojem těžké havárie do kontextu možných stavů jaderného zařízení a jaderné bezpečnosti. Dále kapitola postupně rozebírá a popisuje

jevy, které probíhají při těžké havárii od její iniciace až po únik radioaktivních látek do okolí daného jaderného zařízení.

Druhá kapitola se zabývá popisem zařízení a komponent na JE Temelín, které mohou mít na rozvoj těžké havárie vliv a je potřeba je při simulaci těžké havárie modelovat. Kapitola nejprve popisuje základní zařízení primárního a sekundárního okruhu a následně přechází na popis ochranné obálky a havarijního chlazení AZ reaktoru.

Teoretická část práce je ukončena třetí kapitolou, která uvádí základní strukturu integrálního kódu pro simulace těžkých havárií MELCOR. Postupně popisuje funkce a návaznost jeho jednotlivých částí – modulů a na závěr rozebírá architekturu vstupních dat předpřipraveného modelu JE Temelín.

Ve čtvrté kapitole, která se sestává z praktické části práce, jsou nejprve definovány a popsány zvolené scénáře těžké havárie s iniciačními událostmi *Station Blackout* a LOCA. Následuje volba potenciálně významných parametrů a její zdůvodnění, proč právě zvolené parametry byly vybrány, společně s určením okrajových podmínek simulace a s vybráním významných parametrů, které budou v rámci citlivostní studie sledovány.

Hlavním úkolem praktické části bylo po volbě potenciálně významných parametrů provést citlivostní studii. K tomu byla vybrána statistická metoda analýzy rozptylu společně se vzorkovací metodou ortogonálního pole, která umožnila provést studii s relativně malým počtem výpočtů. Pro samotné spuštění potřebných výpočtů kódu MELCOR a statistické zpracování výsledků byla vytvořena série skriptů, které propojily kód MELCOR s programem pro statistické metody DAKOTA. Ke konci čtvrté kapitoly jsou interpretovány a diskutovány výsledky použitých statistických metod a rozebrány průběhy jednotlivých výpočtů.

Práce končí závěrem z citlivostní studie, zhodnocením dosažených cílů a diskuzí možností pro navazující akademické práce. K samotné práci jsou připojeny rozsáhlé přílohy shrnující grafické znázornění vybraných veličin, které kvůli zachování přehlednosti nejsou umístěny v hlavním textu práce.

Kapitola 1

Fenomenologie těžké havárie

V případě těžkých havárií (TH) – obecně událostí s vážným poškozením jaderného paliva – musíme hovořit o fenomenologii, tedy zkoumání jevů pomocí zkušeností nabytých díky empirickému pozorování, jelikož jejich vznik a průběh obsahuje málo prozkoumané a často dosti komplexní jevy propojující mnohé vědní obory. Fenomenologie těžkých havárií se tedy zabývá popisem jejich průběhu bez nutnosti znalosti a pochopení všech konkrétních zkoumaných jevů.

V oboru zkoumání TH nelze z důvodu bezpečnosti a financování realizovat všechny experimenty v plném rozsahu jaderného zařízení (JZ) a ani není možno postihnout všechny možné situace, které by mohly nastat. Výzkum v tomto oboru je proto zaměřen na provádění experimentů, jak úzce specializovaných (zaměřených na jeden konkrétní jev), tak integrálních (zaměřených na vzájemné provázání jevů). Je snaha o hlubší pochopení daného jevu a snížení neurčitostí v jeho kvantifikaci. Konečným cílem je vytváření modelů, které mohou být následně extrapolovány na samotné JZ a využity např. pro výpočtové ověření bezpečnosti konkrétního JZ.

Příkladem experimentu separátního jevu je projekt ThAI [1] zaměřený na výzkum termohydrauliky a chování aerosolů a štěpných produktů (ŠP) v podmínkách TH v kontejnmentu (KTMT) jaderné elektrárny (JE). Naopak integrálním experimentem, provazující více jevů, je program Phebus [2] zaměřený na hlubší pochopení tavení aktivní zóny (AZ) a úniku ŠP.

Existuje více způsobů, jak je možno třídit nehody, poruchy a havárie JZ. V první řadě je to inženýrsko-fyzikální přístup, který vychází z fyzikální podstaty zkoumaných jevů. Z pohledu tohoto přístupu můžeme případné události, jenž samy o sobě jsou nebo mohou vést na havárie, rozdělit do následujících pěti tříd [3]:

- Havárie vyvolané kladnou změnou reaktivity – např. „vystřelení“ regulační tyče, chybné zavezení paliva, náhlé uvolnění usazenin absorpčního charakteru,

dále třeba náhlé snížení teploty (např. připojením odstavené smyčky s chladnější vodou).

- Havárie se ztrátou chladiva (loss of coolant accident, LOCA) – prasknutí potrubí primárního okruhu (I.O), prasknutí trubky v parním generátoru (PG), dále neuzavření ventilu kompenzátoru objemu (KO), netěsná ucpávka na hlavním cirkulačním čerpadle (HCČ) atp.
- Havárie v systému odvodu tepla – např. selhání HCČ nebo turbíny z důvodu úplné ztráty vnějších i vnitřních zdrojů střídavého elektrického napájení (station blackout, SBO).
- Ostatní havárie – např. havárie při manipulaci s palivem, havárie systémů zpracování radioaktivního odpadu.
- Vnější vlivy – např. zemětřesení, záplavy, požár, sabotáž, pád letadla.

1.1 Jaderná bezpečnost a stavy JZ

V rámci českého právního řádu Vyhláška SÚJB č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderných zařízení [4] definuje stavy JZ následovně:

O JZ řekneme, že se nachází v normálním provozu, pokud jsou dodrženy limity a podmínky. V případě mírných odchylek, které nevedou k závažnému poškození systému, konstrukcí ani komponent, mluvíme o abnormálním provozu. Pokud je JZ v normálním nebo abnormálním provozu, řekneme, že je v provozním stavu. Havarijní podmínky pak nazýváme stav, který není provozním stavem. Základní havarijní nehodou nazveme takové havarijní podmínky, při kterých správná funkce bezpečnostních systémů zajistí, že nedojde k překročení odpovídajících referenčních úrovní nebo limitů ozáření. Rozšířenými projektovými podmínkami (design extension conditions, DEC) nazveme havarijní podmínky vyvolané scénáři závažnějšími než základní projektová nehoda (design basis accident, DBA), které jsou zohledněny při projektování JZ. Nakonec prakticky vyloučenou skutečností se rozumí podmínka, stav nebo událost, jejichž výskyt je považován za fyzikálně nemožný nebo které jsou s vysokým stupněm věrohodnosti velmi nepravděpodobné.

Kategorie DEC byla zavedena, aby mohly být prozkoumány schopnosti JZ předejít nebo odolat závažnějším událostem, než jsou události definované jako DBA. DEC jsou podle stupně závažnosti poškození paliva členěny na dvě následující podkategorie: DEC A - bez vážného poškození paliva s cílem opatření zabránit vzniku TH a DEC B - těžká havárie (událost s vážným poškozením paliva) s cílem opatření omezit následky TH na nejnižší prakticky dosažitelnou úroveň. Pro lepší přehled je v Tab. 1.1 uvedeno rozdělení možných stavů JZ dle SÚJB. [5]

Mezi základní způsoby zajištění jaderné bezpečnosti patří uplatnění principu ochrany do hloubky (defence in depth, DiD). V českém právním řádu je zakotvena v rámci Zákona č. 263/2016 Sb, atomový zákon [6] definice ochrany do hloubky, jako způsob ochrany založený na několika nezávislých úrovních stupňovitě bránících vzniku možnosti ozáření pracovníků a obyvatelstva, šíření ionizujícího záření a úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

Tab. 1.1: Přehled stavů JZ (dle projektu) podle SÚJB, upraveno z [5].

Stavy jaderného zařízení (dle projektu)					Prakticky vyloučené skutečnosti (podmínky, stavy)
Provozní stavy		Havarijní podmínky			
Normální provoz	Abnormální provoz	Základní projektové nehody (DBA)	Rozšířené projektové podmínky (DEC)		
			Události bez vážného poškození paliva (DEC A)	Těžké havárie (Události s vážným poškozením paliva) (DEC B)	

Koncept DiD požaduje několik úrovní na sobě nezávislých projektových opatření nezávisle zálohující zajištění bezpečnostních funkcí. Ty jsou podle § 45 zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon [6] následující: okamžité dosažení a dlouhodobé udržení podkritičnosti; zabránění nekontrolovanému rozvoji štěpné řetězové reakce; fyzické znemožnění vzniku kritického a nadkritického stavu mimo vnitřní prostor reaktoru; zajištění odvodu tepla z AZ reaktoru a z vyhořelého paliva; zajištění stínění a zabránění úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí.

DiD používá sérii technických a organizačních opatření společně s fyzickými bariérami oddělující uvolňované ŠP od životního prostředí. Úrovně bariér jsou: [3, 7]

- I** Chemická a fyzikální struktura jaderného paliva. Pokud nedojde k roztavení paliva, zůstává převážná část uvolněných radioaktivních produktů štěpení vázána v krystalické struktuře paliva.
- II** Povlak palivových tyčí zamezující pronikání zejména plyných ŠP do chladiwa I.O.
- III** Tlaková hranice primárního okruhu (nádoba reaktoru, stěny potrubí a dalších komponent I.O).
- IV** Ochranná obálka (KTMT), nebo jiný systém lokalizace radioaktivních látek.

Fyzické bariéry nemohou požadované bezpečnostní funkce zajistit samy o sobě. Součástí projektu JZ jsou proto projektová opatření (zahrnující aktivní a pasivní funkce nebo inherentní vlastnosti systémů, konstrukce a komponent) v jednotlivých úrovních DiD, jejichž přehled je Tab. 1.2. Opatření přispívají k zajištění účinnosti těchto fyzických bezpečnostních bariér tím, že bariéry před porušením chrání. [8]

Tab. 1.2: Přehled úrovní ochrany do hloubky podle SÚJB, upraveno z [8].

Úroveň	Stav JE	Skupina událostí	Dílčí bezpečnostní cíle	Prostředky úrovní ochrany do hloubky
1	Normální provoz	Provozní režimy a provozní zatížení	<ul style="list-style-type: none"> • prevence odchýlení provozního stavu JE od normálního provozu • prevence poruch komponent JE důležitých pro bezpečnost 	<ul style="list-style-type: none"> • provozní systémy kontroly a řízení JE • konzervativní projekt. vysoká kvalita provedení a provozování JE
2	Abnormální provoz	Očekávané provozní události	<ul style="list-style-type: none"> • detekce vzniku a zvládnání očekávané události • prevence přechodu provozního stavu JE do havarijních podmínek 	<ul style="list-style-type: none"> • limitační systémy kontroly a řízení JE, a monitorovací funkce, ochrany systémů, konstrukce a komponent JE • provozní systémy a postupy
3	a	Základní projektové nehody	<ul style="list-style-type: none"> • detekce vzniku a zvládnání DBA a zvládnání scénářů vyvolaných očekávanou provozní událostí 	<ul style="list-style-type: none"> • projektová opatření a havarijní informační systémy • bezpečnostní systémy a příslušné havarijní postupy
	b	Rozšířené projektové podmínky	<ul style="list-style-type: none"> • detekce rozšířených projektových podmínek a jejich zvládnání bez závažného poškození jaderného paliva 	<ul style="list-style-type: none"> • diverzní a alternativní prostředky a příslušné havarijní postupy
4	Rozšířené projektové podmínky	DEC B	<ul style="list-style-type: none"> • detekce vzniku a zajištění zvládnání těžkých havárií • prevence vzniku radiační havárie v okolí JE 	<ul style="list-style-type: none"> • havarijní informační systémy • projektové a alternativní prostředky a příslušné havarijní postupy pro kontrolu a řízení systémů zmírňování TH
5	Situace při radiační havárii	Radiační havárie	<ul style="list-style-type: none"> • detekce a zmírňování následků radiačních nehod a radiačních havárií 	<ul style="list-style-type: none"> • havarijní informační systémy • projektová opatření podle vnitřního a vnějšího havarijního plánu JE

Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí (The International Nuclear Event Scale, INES) slouží k rychlé komunikaci s veřejností o závažnosti události spojené se zdrojem záření. [9]

Stupnice INES hodnotí jaderné události v sedmi stupních, kdy události 4–7 stupně se označují jako havárie (accidents) a stupně 1–3 nehody (incidents). Události bez bezpečnostního významu jsou klasifikovány jako „Pod stupnicí/stupeň 0“. Při návrhu bylo cílem koncipovat stupnici jako logaritmickou, kdy každý stupeň značí závažnost události asi o řád větší. Struktura stupnice je uvedena v Tab. 1.3. Události

jsou uvažovány z hlediska jejich dopadu ve třech různých oblastech: vliv na obyvatele a životní prostředí; dopad na radiační bariéry a radiační opatření v zařízení; dopad na ochranu do hloubky. Klasifikace události je pak určena jako nejvyšší stupeň při uvážení každé z těchto tří oblastí. [10]

Tab. 1.3: Struktura mezinárodní stupnice INES, upraveno z [10].

Popis a stupně INES	Obyvatelé a životní prostředí	Radiační bariéry a opatření v zařízení	Ochrana do hloubky
7 Velmi těžká havárie	Velký únik radioaktivních látek s rozsáhlým rozptylem, účinky na zdraví obyvatel a životní prostředí		
6 Těžká havárie	Významný únik radioaktivních látek, pravděpodobně nasazení plánovaných protiopatření		
5 Havárie s širšími následky	Omezený únik radioaktivních látek, pravděpodobně nasazení některých plánovaných protiopatření	Vážné poškození AZ reaktoru, uvolnění velkého množství radioaktivních látek uvnitř zařízení	
4 Havárie s místními následky	Malý únik radioaktivních látek pravděpodobně bez nutnosti nasazení plánovaných protiopatření	Tavení paliva nebo poškození paliva, vedoucí k uvolnění více jak 0,1 % inventáře AZ	
3 Vážná nehoda	Dávka přesahující desetkrát stanovený roční dávkový limit na pracovníka	Dávkové příkony větší než 1 Sv/h v provozním prostoru	„Téměř havarijní stav“, kdy nezůstala k dispozici žádná bezpečnostní opatření
2 Nehoda	Ozáření jednotlivce z obyvatel přesahující 10 mSv, Ozáření pracovníka přesahující roční limity	Úroveň záření v provozním prostoru větší než 50 mSv/h	Významné selhání bezpečnostních opatření (předpisů) bez skutečných následků
1 Anomálie			Malé problémy s bezpečnostními komponenty s významnou zbývající ochranou do hloubky
Žádný bezpečnostní význam (pod stupnicí/stupeň 0)			

Jak lze vidět, existuje více způsobů, jak je možno klasifikovat, kdy se jedná o TH a kdy ne, a to se odráží v nejednotnosti definice TH ve světě. Následuje výčet definic TH od vybraných regulačních orgánů a organizací států s rozvinutou jadernou energetikou. Konkrétně od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB), Jaderného regulačního úřadu Spojených států amerických (United States National Regulatory Commission, US NRC), francouzského Institutu pro ochranu před radiací a nukleární bezpečnost – IRSN a od Mezinárodní agentury pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency, IAEA).

SÚJB – *havarijní podmínky, při kterých dochází k vážnému poškození jaderného paliva, a to vážným poškozením a nezvratnou ztrátou struktury aktivní zóny jaderného reaktoru nebo systému pro skladování jaderného paliva poškozením palivových souborů v důsledku tavení jaderného paliva.* [4]

US NRC – *druh havárie, který může zatížit bezpečnostní systémy na mnohem vyšší úrovni, než se očekávalo.* [11]

IRSN – *událost způsobující významné poškození paliva v reaktoru, která vede více či méně k kompletnímu roztavení aktivní zóny.* [12]

IAEA – *havárie, které přesahují základní projektovou nehodu a zahrnují vážné poškození aktivní zóny reaktoru.* [13]

1.2 Iniciační událost a rozvoj těžké havárie

V projektu jakéhokoliv JZ musí být dle české legislativy [4] stanovena a vyhodnocena rozumně proveditelná opatření pro zvládnutí postulované TH. Je tedy třeba uvážení možných postulovaných iniciačních událostí (IU) a scénářů, které vyústí v TH, pomocí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (probabilistic safety assessment, PSA) a deterministických analýz. PSA komplexně oceňuje riziko JZ. Výsledkem jeho 1. úrovně je určení frekvence vážného poškození paliva. Výsledkem 2. úrovně s použitím zdrojového členu (velikost a radionuklidové složení úniku) je stanovení frekvence úniku radioaktivních látek do okolí JZ. Výsledkem PSA 3. úrovně je vyhodnocení následků úniku radioaktivních látek do okolí daného JZ. [14]

Na základě výstupu PSA 1. úrovně je sestaven seznam postulovaných IU, které mohou být tříděny podle mechanismu vzniku nebo dle četnosti výskytu daného scénáře nebo IU vedoucí na určitý stav JZ. Dle vyhlášky SÚJB [4] jsou zdefinovány kategorie četnosti výskytu postulované IU, které musí odpovídat kategoriím stavu JZ. Jejich rozdělení je shrnuto v Tab. 1.4. Dále je také možné pro sestavení seznamu postulovaných IU využít doporučené seznamy z dokumentů mezinárodně uznávaných organizací (IAEA, US NRC, WENRA, EUR, OECD-NEA apod.), avšak tyto seznamy musí být přizpůsobeny pro konkrétní JZ. [15]

Tab. 1.4: Kategorie postulovaných iniciačních událostí dle četností výskytu odpovídající stavům JZ, upraveno z [15].

Stavy jaderného zařízení (dle projektu)				
Provozní stavy		Havarijní podmínky		
Normální provoz	Abnormální provoz	Základní projektové nehody (DBA)	Rozšířené projektové podmínky	
			DEC A	DEC B
Kategorie četnosti výskytu postulované IU				
-	Vysoká	Střední	Nízká četnost	Velmi nízká četnost
-	Více než 1x za rok	Nižší než 1x za 10 let	Nižší než 1x za dobu životnosti JZ	Nižší než 1x za stonásobek doby životnosti JZ

Výsledný seznam IU a scénářů DEC B by měl obsahovat scénáře těžkých havárií způsobených [5]:

- iniciační událostí typu SBO,
- iniciační událostí typu velká/malá LOCA.

Scénář s iniciační událostí SBO (dále jen scénář SBO) uvažuje selhání všech aktivních bezpečnostních systémů pro zvládnutí TH, přestože jsou zálohované, fyzicky separované, diverzifikované a splňující požadavky na vysokou jakost. Scénář SBO reprezentuje tzv. *vysokotlakou (VT) sekvenci* (až do momentu odtlačování I.O), kdy dochází k postupnému vyvařování vody v AZ a odhalení paliva. Oproti tomu scénář s iniciační událostí LOCA (dále jen scénář LOCA), který je příkladem tzv. *nízkotlaké (NT) sekvence*, obsahuje rychlejší sled událostí, kdy dochází k odhalení paliva mnohem dříve. Třebaže se tyto scénáře odlišují IU, vedou po poškození jaderného paliva k podobnému rozvoji TH, který lze rozdělit na dvě fáze. [3]

První *in-vessel* fáze probíhá v tlakové nádobě reaktoru (TNR) do okamžiku jejího případného selhání. Během *in-vessel* fáze nastává po odstavení reaktoru postupné přehřívání paliva zbytkovým výkonem reaktoru vlivem rozpadu radioaktivních ŠP. Degradace AZ může vést k významné produkci vodíku, úniku ŠP a vzniku bazénu taveniny a trosků na dně TNR, kde dochází k nahřívání a případně následnému protavení TNR. Tím se přechází do *ex-vessel* fáze, během níž probíhají další jevy v KTMT. [16]

1.3 Termohydraulické procesy v degradující AZ

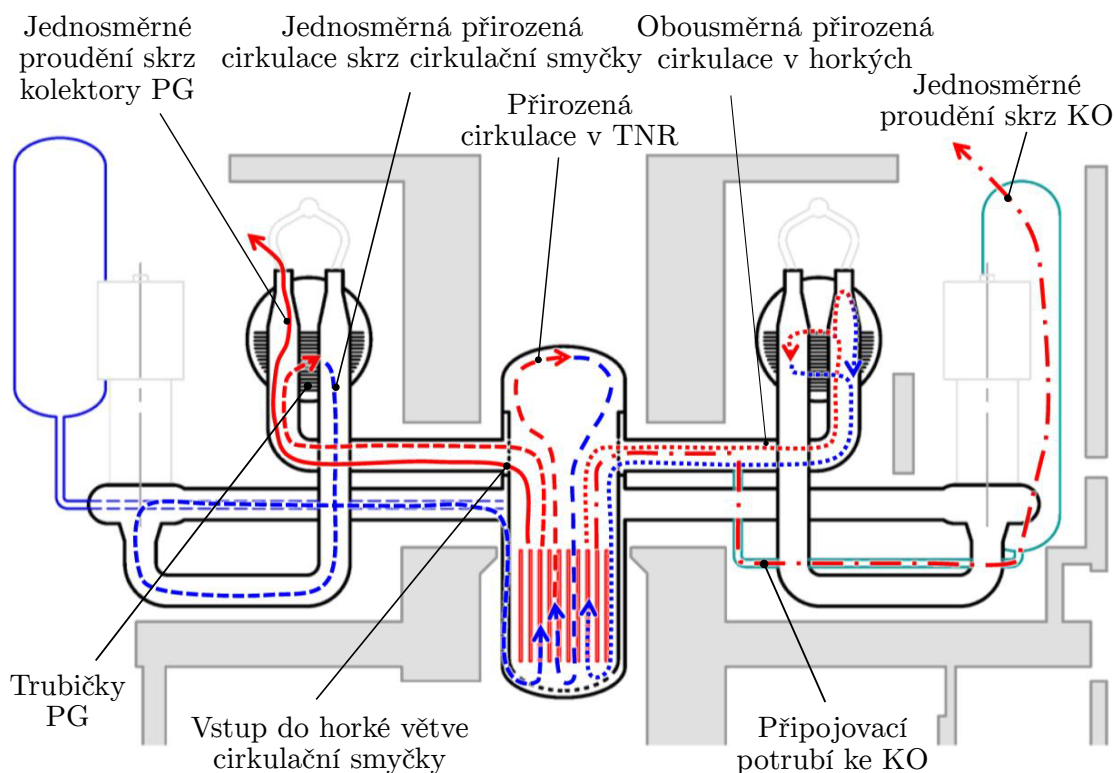
Na počátku TH jsou termohydraulické procesy jediným a hnacím mechanismem rozvoje IU do havárie. Do těchto procesů můžeme zařadit proudění chladiva, přenos tepla různými způsoby, úniky chladiva, havarijní doplňování chladiva, vypařování chladiva, odhalování paliva apod. [17]

Termohydraulická odezva AZ na IU je ovlivněna samotným designem JZ, odezvou bezpečnostních systémů a komponent na IU, zásahy operátorů a dalšími externími faktory. [18]

Není reálné definovat obecné trendy termohydraulické odezvy pro všechny možné typy JE a podmínky havárie. Jakmile je však známa specifická konstrukce JE a okrajové podmínky havárie, je v současnosti možné správně predikovat termohydraulickou odezvu použitím vypočtených kódů. [19]

Mnoho jevů může ovlivnit termohydraulickou odezvu AZ. Naprostá většina z nich, jako ohřev AZ či ustálení přirozené cirkulace, je dobře prozkoumána a objasněna. Jedním z nejvíce významných zásahů pro zvládnání TH je však znovuzaplavení odhalené AZ, které je stále jednou z mála nevyřešených fenomenologických otázek a bude rozebrána později. AZ v pozdější fázi rozvoje TH dosahuje vysokých teplot, ale v momentě relokace taveniny na dno TNR je ve většině scénářů přítomna na dně voda stále v kapalně fázi. [17]

U designů tlakovodních JE mohou nastat různé druhy přirozené cirkulace v průběhu ohřevu AZ jako důsledek rozdílných teplot mezi jednotlivými částmi I.O, II.O a navazujících systémů. Patří mezi ně: přirozená cirkulace uvnitř TNR; obousměrná cirkulace v horkých větvích cirkulačních smyček; cirkulace skrz smyčky I.O. Schéma těchto cirkulací je zobrazeno na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Vizualizace možných přirozených cirkulací v I.O, upraveno z [17].

Cirkulace uvnitř TNR je ovlivněna nafukováním (tzv. *ballooning*) a prasknutím palivového pokrytí, ucpáním průtočných kanálů nebo stavem poškozeného paliva. Velký vliv má též zdroj tepla z oxidace zirkoniového (Zr) pokrytí, která bude rozebrána později. Jednosměrná přirozená cirkulace skrz celou cirkulační smyčku se může ustavit pouze, když v horké větvi dané cirkulační smyčky není žádná voda blokující proudění páry skrze kolektory PG. [17, 19]

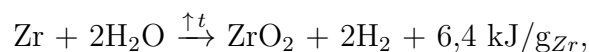
Hlavním dopadem přirozené cirkulace je oddálení poškození AZ a I.O (do momentu vyvaření vody v PG) i II.O díky více efektivnímu odvodu tepla do ostatních částí primárního systému. Výsledkem je více rovnoměrné rozložení teplot v AZ. V momentě, kdy dosáhne teplota pokrytí přibližně 1200 °C, je však efekt přirozené cirkulace redukován, jelikož dochází k tzv. *breakaway* oxidaci, tj. velmi prudkému nárůstu teploty a oxidace vlivem „šupinatění“ povrchu pokrytí; viz dále v textu. [19]

Negativním dopadem přirozené konvekce může být ohřátí navazujících systémů (např. trubky PG, spojovací potrubí do KO) a jejich poškození mechanismem creepu. Takto mohou vznikat lokální úniky chladiva a potenciální cesty pro šíření radioaktivních látek. Creep je pomalá plastická deformace materiálu v pevném stavu. Pokud je materiál vystaven napětí menšímu než je jeho mez kluzu po dostatečně dlouhou dobu za zvýšené teploty, tak dochází k plastické deformaci. Z pohledu TH je creep významný faktor deformace ve fázi prvotního náhřevu komponent při TH (např. trubičky PG) a je též hlavním mechanismem selhání dna TNR po jeho ohřátí taveninou, které je dále rozebráno v sekci 1.6. [17]

1.4 Oxidace a zvyšování teploty AZ

V pozdější části havárie, kdy postupně dochází k přehřívání AZ, je v podstatné části AZ pouze přehřátá pára a případně i vodík. Výjimkou je dno TNR, které je nejpravděpodobněji ještě zaplaveno vodou, jelikož teplo generované v AZ je odváděno párou do horní části TNR. [17]

Oxidace materiálů obsažených v AZ 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. Rovnice oxidické reakce je následující:



kde kromě tvorby tepla, jelikož se jedná o silně exotermickou reakci, vzniká 44,2 g vodíku na jeden kilogram zoxidovaného Zr. [16]

Rychlost této reakce závisí exponenciálně na teplotě (Arrheniův vztah), a proto s rostoucí teplotou prudce roste kinetika oxidace, která dále zvyšuje teplotu. Jedná se tedy reakci s pozitivní zpětnou vazbou. Oxidace probíhá v zanedbatelné míře i za normálního provozu. Vlivem zbytkového výkonu dochází k ohřevu přibližnou rychlostí nižší než 1 °C/s v závislosti na tom, zda se jedná o NT (typicky méně než $0,3\text{ °C/s}$) nebo VT sekvenci (nad $0,5\text{ °C/s}$). Avšak po překročení teploty 900 °C se již rozbíhá oxidace Zr vodní párou a rychlost ohřívání AZ se začne rapidně zvětšovat. Po překročení teploty 1200 °C začíná být generované teplo oxidací v některých momentech větší než teplo vznikající ze zbytkového výkonu rektoru a AZ se stává neuchladitelnou pouze konvekcí vodní párou. Oxidací materiálu se vytvářejí i deformace a vzniká porozita, která dává oxidaci větší reakční plochu (*breakaway efekt*). S rostoucí tloušťkou oxidické vrstvy se však míra oxidace zmenšuje. Při dosažení 1500 °C se mění krystalická mřížka fáze vznikajícího ZrO_2 z tetragonální na kubickou. Ta má větší difuzní koeficient pro H_2O a dochází tak k další oxidaci, které předtím bránila oxidická vrstva. S následným růstem teploty dochází k tavení neoxidovaných metalických komponent a po dosažení 1800 °C dochází i k tavení samotného Zr. V momentě, kdy oxidace Zr dosahuje svého maxima, je trend ohřevu řádově až 10x vyšší než ze zbytkového výkonu, jak ukázal experiment LOFT-FP-2. [16, 20]

Třebaže teplo generované oxidací Zr je dostatečné pro dosažení 2850 °C , kdy se začíná tavit i samotné palivo UO_2 , je několik efektů, které mohou oxidaci limitovat: dostupnost páry v AZ pro oxidaci; difuze páry skrz vodíkovou mezní vrstvu, která se vlivem oxidace vytváří na pokrytí (tzv. *hydrogen blanketing*) a difuzní rychlost H_2O skrz oxidickou vrstvu ZrO_2 . Při VT sekvenci (např. SBO), kdy dochází k pomalejšímu počátečnímu růstu teploty AZ, zoxiduje velká část pokrytí v jeho původním místě a geometrie paliva může zůstat zachována déle, jelikož ZrO_2 má oproti Zr vyšší teplotu tavení. Naopak rychlý počáteční ohřev AZ při NT sekvenci, které odpovídá scénář LOCA, má za následek rychlé dosažení teploty tavení pokrytí, které se následně přesouvá jako tavenina do dolní části TNR před jeho zoxidováním a s poklesem teploty roztaveného Zr se brzdí oxidace. [19]

Oxidace dalších materiálů v AZ, převážně – B_4C pokud je použit v regulačních tyčích, nebo slitiny Ag-In-Cd, může být v některých scénářích také významná. Předmětem této práce jsou však reaktory typu VVER, které používají regulační tyče s B_4C , a tak další možné typy materiálu pro regulační tyče nebudou dále uvažovány. K oxidaci B_4C dochází ve větší míře až při teplotách nad 1200 °C za produkce H_2 , CO a CO_2 a zanedbatelného množství CH_4 [21]. Podíl této reakce na celkové produkci vodíku v závislosti na scénáři se uvádí maximálně 15 % [19], jelikož je B_4C zastoupen v AZ mnohonásobně méně než Zr a dochází dříve k jeho tavení, což vede k menší době oxidování před relokací. Teplota tavení samotného B_4C je 2400 °C ,

ale s Zr tvoří eutektickou slitinu s nižší teplotou tavení (viz dále v textu). Oproti H_2 jsou CO a CO_2 produkovány převážně až v momentě případného znovuzaplavení AZ. Ze závěrečné zprávy experimentu Phébus FPT3 [22] však vyplývá, že může B_4C zoxidovat až z 70-80 %, zatímco například v kódu MELCOR jsou uvažovány ve výchozím nastavení maximálně 2 % [23].

Na základě experimentů CORA [24] nebo Phébus FPT3 [22] byl zjištěn vliv B_4C na postup relokace materiálu směrem ke dnu TNR. Přítomnost B_4C podporuje lokální tavení palivových tyčí v průběhu degradace tvořením eutektických slitin s nižší teplotou tavení. Hlavním vlivem oxidace B_4C je však změna chemických procesů v I.O a KTMT z pohledu šíření radioaktivních látek.

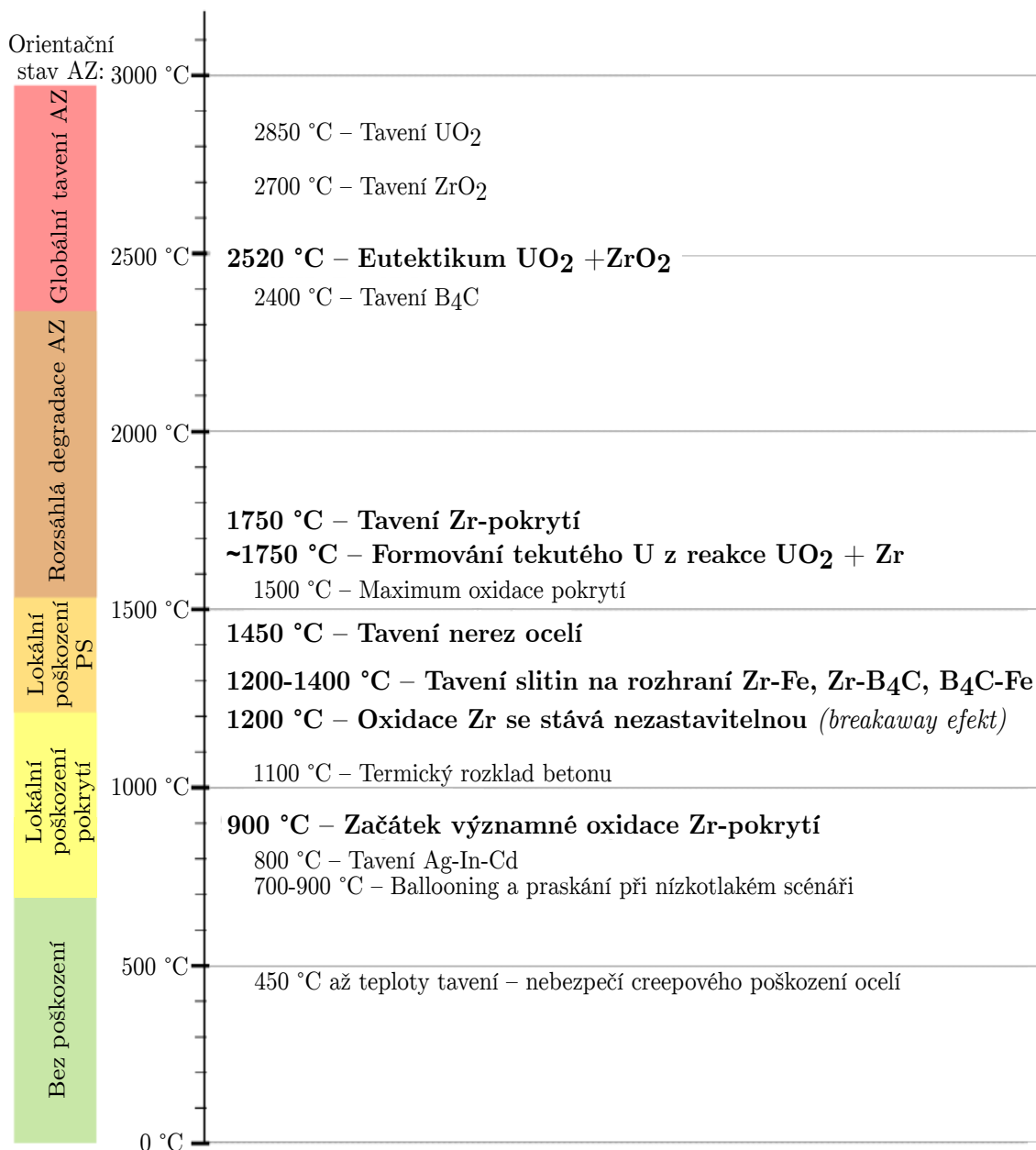
Na celkové produkci vodíku z oxidace se v řádu jednotek procent podílí i ocel. Konstrukční materiály AZ z nerezové oceli jsou většinou roztaveny a přemístěny do spodní části AZ dříve, než mohou významněji zoxidovat. To může vést při stratifikaci taveniny k vytvoření tenké metalické vrstvy, které má dobré teplo-vodivé vlastnosti (tzv. *fokusační efekt* viz dále).

Oxidace Zr nemusí probíhat pouze kyslíkem z vodní páry, ale i kyslíkem ze vzduchu. Vzdušným kyslíkem může oxidovat např. Zr v otevřeném reaktoru nebo bazénu skladování vyhořelého paliva. Tepelný výtěžek chemické reakce je o 80 % větší než při reakci s párou. Samotný proces oxidace je na vzduchu rychlejší než ve vodní páře, jelikož se tvoří nitridová oxidická vrstva, která další oxidaci nezabraňuje tolik jako ZrO_2 . [25]

1.5 Ztráta geometrie AZ

Ke ztrátě geometrie AZ začíná docházet postupně různými jevy v časovém rozmezí minut až hodin od okamžiku IU v rozsahu teplot 1200 °C až 2800 °C. Konkrétní časy a rozsah teplot velmi záleží na materiálech, ze kterých je AZ složena, počátečním odhalení AZ, rychlosti ohřevu AZ, tlaku a celkové termodynamické zpětné vazbě JZ. Z tohoto důvodu platí následně uvedené hodnoty pro lehkovodní reaktory s jaderným palivem UO_2 a regulačními tyčemi z B_4C . Teplotní osa významných teplot pro průběh TH je vyznačena na Obr. 1.2. Prvotní ztrátu geometrie AZ způsobují chemické interakce mezi materiály AZ, které vedou k tvoření eutektických slitin s nižší teplotou tavení, než mají jednotlivé materiály. K tomuto poškození může dojít lokálně na několika místech současně. V případě lehkovodních reaktorů v místech, kde jsou v přímém kontaktu kombinace materiálu jako Fe-Zr, B_4C -Fe nebo B_4C -Zr, dojde v důsledku nižší teploty tání utvořených směsí k tavení již v rozmezí 1200 °C až 1400 °C. Může tedy dojít k přesunu komponent AZ tavením v místech jako jsou

kontakty případných inconelových distančních mřížek s pokrytím, nebo koncovky regulačních tyčí. Největším rizikem relokace materiálu kontrolních orgánů vlivem tavení je oddělení abosbátoru od paliva a možnost opětovného dosažení kritičnosti v případě znovuzaplavení AZ.

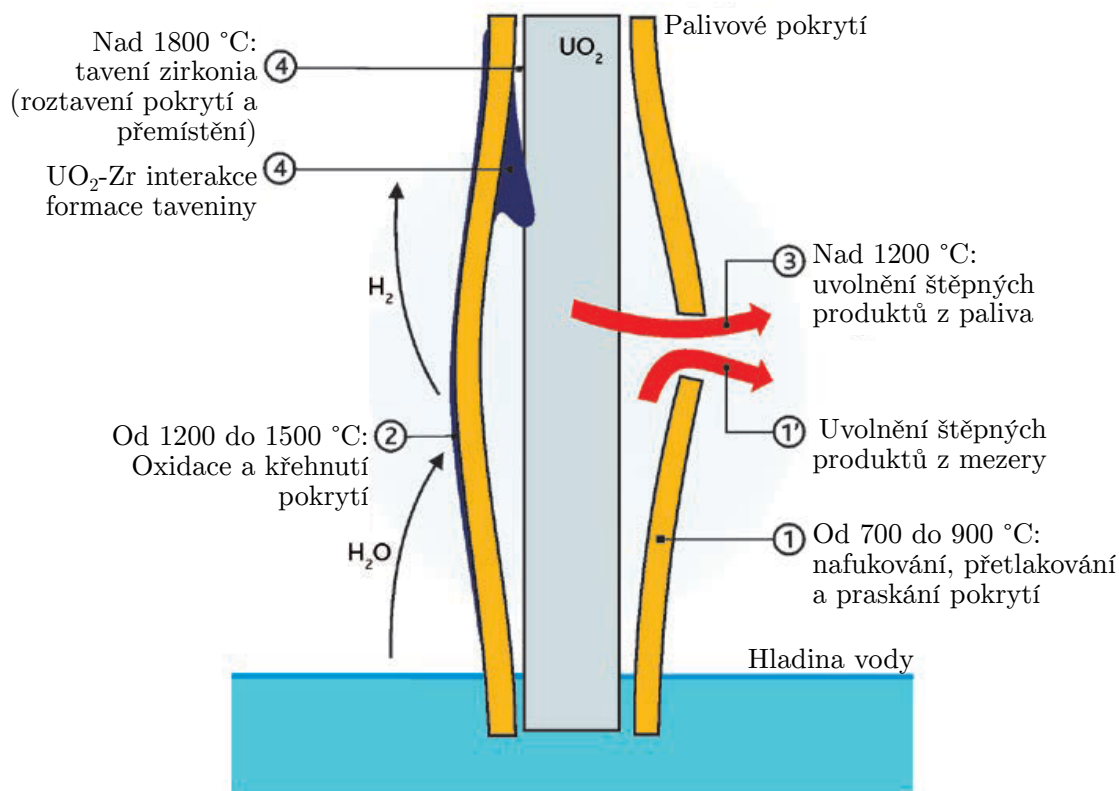


Obr. 1.2: Osa nejdůležitějších teplot z pohledu rozvoje TH, upraveno z [17].

Zvýšená teplota paliva a hromadění plyných ŠP uvnitř palivového proutku (PP) zvyšuje tlak. Palivové pokrytí se začíná deformovat v momentě, kdy jeho teplota překročí 700 °C z důvodu degradace jeho mechanických vlastností. V závislosti na druhu scénáře TH (s výjimkou SBO s neodtlakovaným I.O) tlak uvnitř PP dříve nebo později předčí tlak v AZ. Tlakování uvnitř PP vede k jeho pokrivení z důvodu tečení materiálu (tzv. creep). [16]

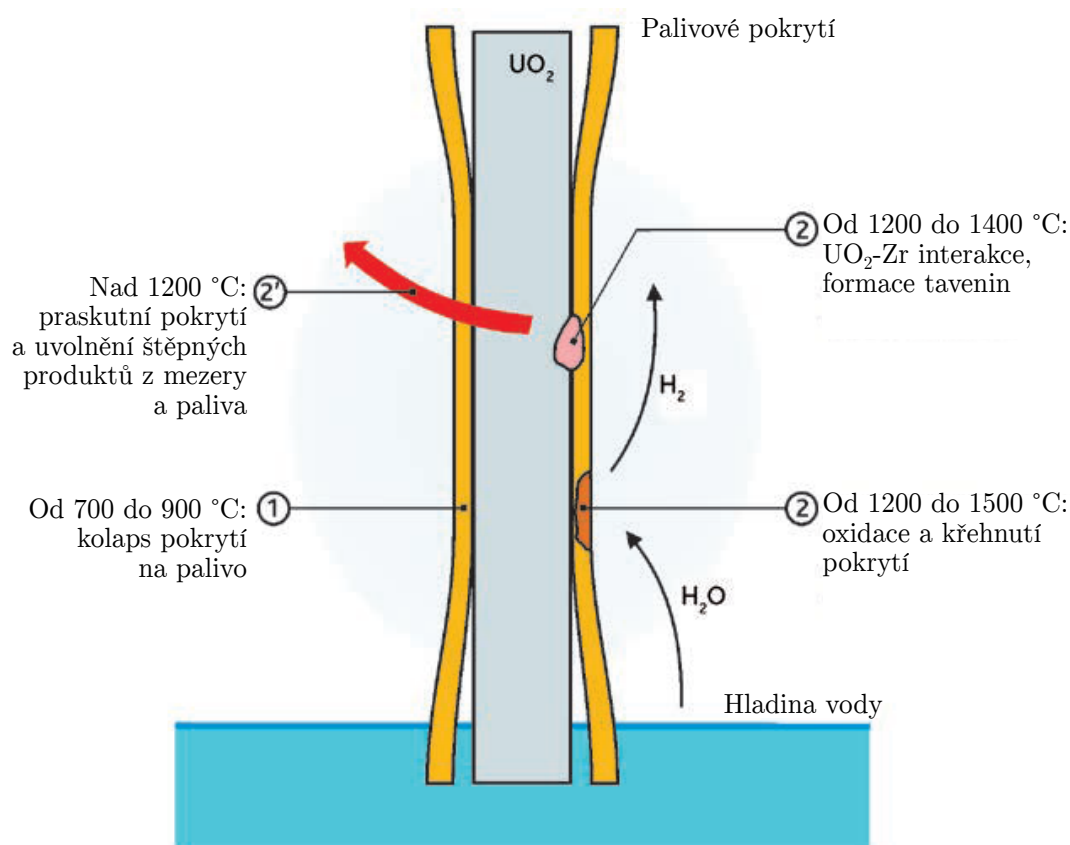
V případě NT scénáře (LOCA), dochází k nafukování, jelikož je na pokrytí vyvíjen vyšší tlak zevnitř, v rozmezí teplot 700 °C až 900 °C. Během VT scénáře (SBO) za nižších teplot zkolabuje palivové pokrytí na palivo. Takto PP setrvává do vyšších teplot, kdy při teplotě nad 1200 °C začíná docházet k lokálním selhání pokrytí, jelikož se vytváří eutektické slitiny s nižší teplotou tavení. 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. [19]

Vlivem pokřivení dochází při NT scénáři TH k nafukování (tzv. *ballooning*), které lze vidět na Obr. 1.3, a praskání PP. Při VT scénářích TH za vyšších teplot dochází k selhání kvůli tvorbě eutektických slitin, jak lze vidět na Obr. 1.4.



Obr. 1.3: Mechanismus poškození palivového pokrytí při nízkotlakém scénáři nafukování (*ballooning*), upraveno z [16].

PP, které zoxidují a neselžou mechanicky, mohou ztratit svoji integritu jako výsledek procesů za vysokých teplot v rozmezí 2000 °C až 2200 °C. Způsob popraskání není dosud přesně znám a pro jeho modelování je třeba využít poznatků z experimentálních programů jako Phébus [2] nebo CORA [24]. Takovéto experimenty jsou nákladné a složité na provedení z důvodu zajištění náležité bezpečnosti. V současnosti je malá motivace vytvářet podobné projekty, jelikož uživatelé a vývojáři výpočetních kódů pro TH považují model jevu, získaný z již provedených experimentů, za dostatečný pro reprezentaci mechanismu selhání. [16, 26]



Obr. 1.4: Mechanismus poškození palivového pokrytí při vysokotlakém scénáři TH praskáním a formováním slitin s nižší teplotou tavení, upraveno z [16].

Bod tání Zr pokrytí se obvykle pohybuje v rozmezí 1750 °C až 2000 °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. Míra tohoto pokrytí závisí na tepelném průběhu v předchozích fázích havárie. Pokud dojde k rychlému ohřevu AZ, Zr pokrytí se odtaví a steče do dolní části TNR. V případě pomalejšího vypařování vody z AZ vznikne silnější oxidická vrstva ZrO_2 , která se začíná tavit nad 2700 °C. Roztavené Zr zůstává „uvězněné“ mezi palivem UO_2 a oxidickou vrstvou ZrO_2 . Takto „uvězněná“ tavenina Zr částečně rozkládá palivo UO_2 . Tyto chemické reakce mohou způsobit tavení UO_2 a ZrO_2 až 1000 °C pod jejich teplotou tavení. Vzniklá slitina U-O-Zr zůstává uvnitř oxidické obálky pokrytí až do jejího selhání na creep při teplotách nad 2000 °C, kdy se pak tavenina začne přemísťovat ke dnu TNR. 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. [19]

Když teplota AZ překročí teplotu tavení ZrO_2 2700 °C a pro UO_2 teplotu 2850 °C začne se tvořit bazén taveniny v AZ. Teplota tání eutektické slitiny UO_2 a ZrO_2 je ale pouze 2520 °C, takže tavení nastává již za teplot mnohem nižších. V závislosti na přesném složení a poměru fází dochází díky chemickým reakcím rozkládání UO_2 roztaveným Zr k rychlé formaci tekuté taveniny již za teplot 2200 °C až 2300 °C. Pokud se bazén taveniny obklopený krustou, která vzniká tuhnutím taveniny na povrchu díky odvodu tepla, stane dostatečně velkým, ustanoví se v něm přirozená cirkulace, která bude přenášet teplo do vnější krusty. Důsledkem toho se budou zahřívat boční části a vršek krusty, což může vést k jejímu zeslabení a selhání, zatímco krusta na dně bazénu taveniny zůstane relativně silná. [19]

Postupným tavením se bazén taveniny rychle rozšiřuje axiálním i radiálním směrem, dokud nedosáhne opěrné desky AZ. Následně *korium* (tj. slitina roztavených komponent AZ, pevných trosek, paliva a případně později po vypuzení taveniny z TNR i betonu) po jejím selhání stéká do dolní směšovací komory na dno TNR. V případě, že je v TNR minimální množství vody, korium přímo napadá dno šachty AZ a pak stěny nádoby. To může vést k rychlému selhání TNR. Ve většině scénářů je však dno TNR zaplněno vodou v momentě, kdy do něj začne stékat korium. Interakce vody s korigem o teplotě přes 2200 °C vede k fragmentaci korie na trosky a k intenzivní tvorbě páry, která zvýší tlak v I.O. [16]

Interakce mezi žhavým korigem a vodou může vést k parní explozi, což je obecně prozkoumaný jev. V případě TH však nelze s jistotou předpovědět, za jakých podmínek by k němu mohlo dojít. Přes relativně nízkou pravděpodobnost, která byla pozorována v rámci testů zaměřených na studium interakce mezi korigem a vodou, nelze parní explozi vyloučit, a tak je tento jev studován, jelikož by mohl mít vážný dopad na integritu KTMT, pokud by k němu došlo vně TNR. [16]

Jak již bylo vícekrát zmíněno, případné znovuzaplavení AZ s sebou nese celou řadu rizik. Nelze se mu ovšem vyhnout, má-li být případná havárie stabilizována již v in-vessel fázi. V případě zaplavení při nižších teplotách pokrytí než 1200 °C dochází k fragmentaci a popraskání PP. Tento jev je dobře prozkoumán, jelikož spadá do podmínek DBA. V případě teplot nad 1200 °C je v momentě znovuzaplavení změna geometrie silně závislá na stavu AZ. Metalické či keramické komponenty AZ, které již podléhaly tavení, znovu ztuhnou a může dojít k popraskání materiálu, změna geometrie je však minimální. V oblastech, kde PP zůstaly relativně netknuté pod teplotou tavení zirkoniových slitin, se může palivové pokrytí fragmentovat. V oblastech, kde zůstaly PP netknuté, ale teploty překročily tavení Zr pokrytí, zůstanou palivové tablety relativně nezměněné, třebaže část pokrytí se odtavila. Nastane však prudký nárůst teploty, uvolnění ŠP a produkce vodíku a páry z důvodu oxidace zbylého pokrytí, což může vést k růstu tlaku v I.O [19].

Pokud je však AZ zaplavována s dostatečným průtokem, může to vést ke stabilizaci AZ a poklesu teplot. Potřebný průtok závisí na stavu AZ. Minimální potřebný průtok na každý PP se dle experimentálního programu QUENCH-11 uvádí 0,6 g/s na PP pro 1,2 m dlouhý palivový soubor. Tento průtok ale není dostačující pro ochlazení celé AZ poté, co se vypařila veškerá voda. Dále experiment QUENCH podporuje teorii, že minimální hodnota průtoku na každý PP pro úspěšné znovuzaplavení AZ je přibližně 1 g/s na PP. [27, 28]

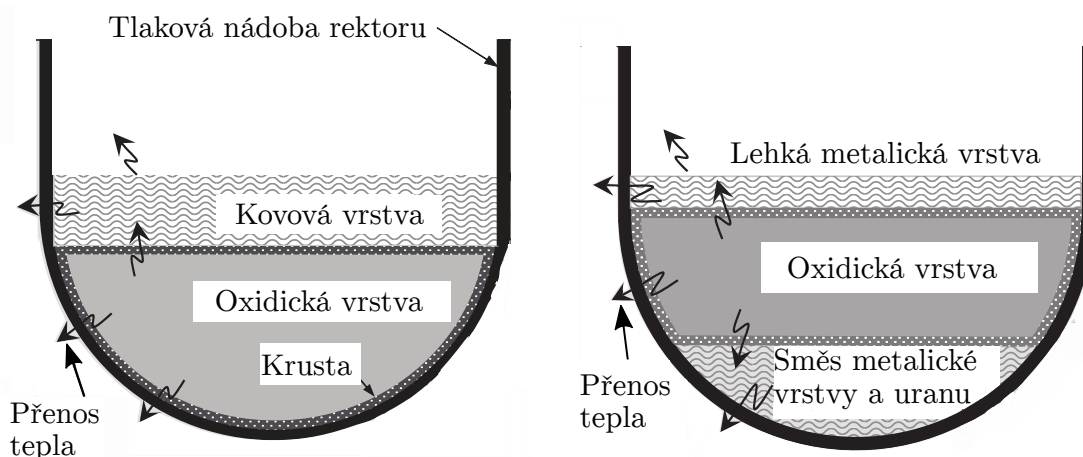
Dalším problémem, který může vzniknout v případě znovuzaplavení AZ, je především lokální opětovné dosažení kritičnosti, hlavně v momentě, kdy regulační tyče již byly odtaveny, ale části palivových elementů jsou stále netknuté, důsledkem užití vody bez dostatečné příměsi absorbátoru (kyseliny borité). [19]

1.6 Selhání dna tlakové nádoby reaktoru

V této části TH již s největší pravděpodobností došlo k úniku radioaktivních látek do KTMT, jelikož TH byla iniciována únikem v I.O, nebo došlo k poškození navazujícího potrubí k KO a nebo v rámci opatření pro zvládnutí TH došlo k odtlakování I.O (při havárii SBO). Tlaková hranice primárního okruhu a tedy 3. fyzická bariéra tudíž může být již narušena před selháním dna TNR. Motivací pro udržení bazénu taveniny v TNR je zabránění přímého kontaktu s betonem v šachtě reaktoru. Hlavním problémem při snaze udržení bazénu taveniny v TNR je odvádění tepelného výkonu z taveniny, který je neustále produkován rozpadem ŠP. [19]

Padaající rozžhavené trosky komponent společně se stékající taveninou způsobují odpařování zbylé vody na dně TNR. Na tomto procesu se rovněž podílí zbytkový tepelný výkon paliva z rozpadu ŠP. Po vypaření zbylé vody se tavenina rozloží ve vrstvách podle hustoty jednotlivých látek (stratifikace). [3]

Důvodem vytváření vrstev je fakt, že oxidy (UO_2 a ZrO_2) a kovy (kovový uran, Zr, Fe) jsou při teplotách vyskytující se v korii vzájemně nemísitelné. Tvoří tedy dvě separované vrstvy: těžší – oxidická vrstva nacházející se vespod, v níž je koncentrována naprostá většina zbytkového výkonu, respektive lehká – metalická vrstva nacházející se nahoře. Rychlost a způsob relokace degradovaných komponent AZ má velký vliv na stratifikaci bazénu taveniny na dně TNR. Na Obr. 1.5a je tavenina rozdělena na lehkou kovovou vrstvu a těžkou oxidickou obklopenou ztuhlou krustou. Jiný stratifikační model ukazuje experiment MASCA [29] na Obr. 1.5b, kde těžký, kovový uran (vzniklý redukcí z UO_2 díky reakci s roztaveným Zr) migroval skrz oxidickou vrstvu a vytvořil tak třetí, nejtěžší vrstvu těžkých kovů. V horní části zůstala lehká metalická vrstva tvořená železem. [30]



(a) Rozložení koria na lehkou metalickou vrstvu a těžkou oxidickou vrstvu tzv. *klasické uspořádání*. (b) Rozložení metalických a oxidických vrstev koria v pozorování experimentálního programu MASCA [29].

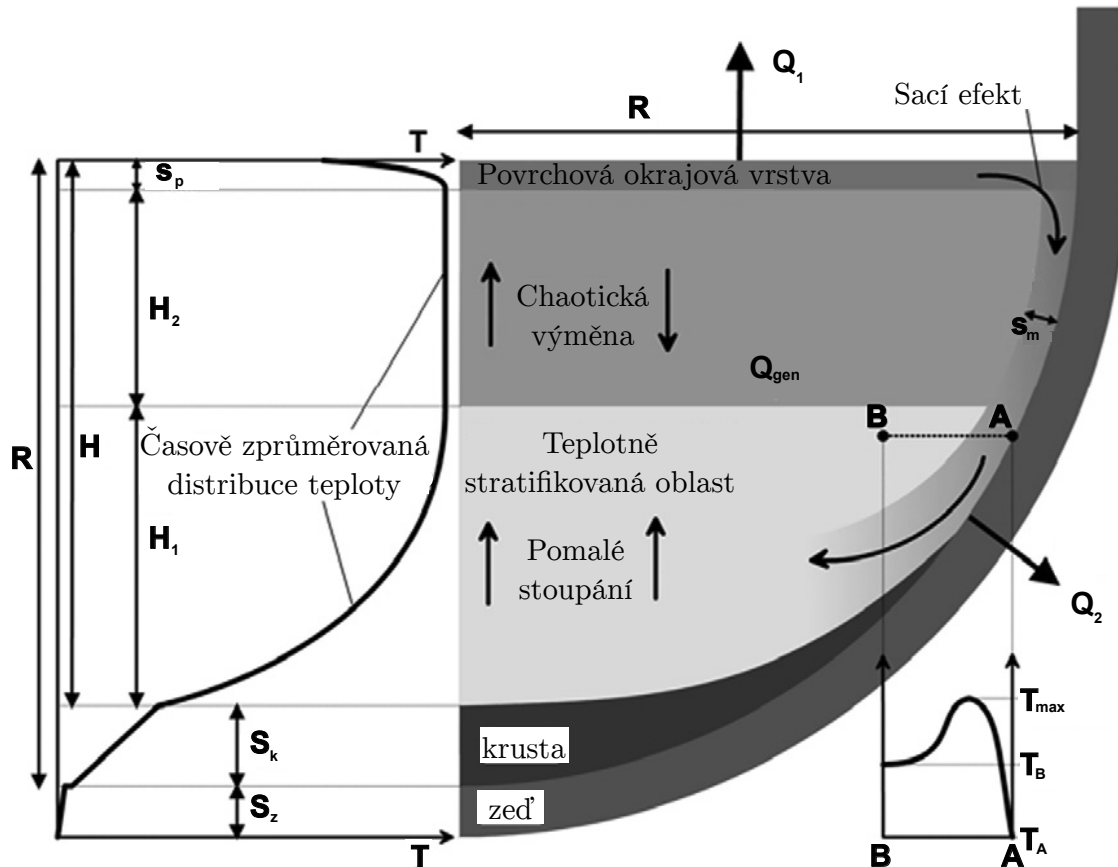
Obr. 1.5: Potenciální stratifikace vrstev koria, upraveno z [31].

Přesné chování a uspořádání taveniny na dně TNR není tedy dostatečně prozkoumáno a popsáno. Jednou z dalších metod zvládnutí TH je odvod tepla přes stěnu TNR a zadržení taveniny v nádobě reaktoru (in-vessel melt retention, IVMR). Toho lze dosáhnout externím chlazením dna TNR pomocí zaplavení šachty reaktoru. Motivací je zabránění dosažení kritického tepelného toku na vnějším povrchu TNR do vody v zaplavené šachtě reaktoru, které by vedlo k zhoršenému odvodu tepla a prudkému růstu teploty stěny TNR z důvodu krize varu 1. druhu.

Experiment COPO [32] ukázal, že bez použití strategie IVMR přibližně 50 % tepelného výkonu taveniny směřuje vzhůru bez ohledu na vnitřní rozdělení taveniny, zatímco tepelný tok horizontálním a dolním směrem je silně proměnlivý a tepelný tok na dně TNR je téměř nulový. Z tohoto rozložení lze dojít k závěru, že k selhání nádoby dojde v horní části dolní směšovací komory TNR a nikoliv na jejím samotném dně, jak bylo v dřívějších studiích uvažováno. Nerovnoměrné rozložení tepelného toku je způsobeno přirozenou cirkulací uvnitř taveniny, která je způsobena rozdílem teplot mezi středem taveniny a krajními vrstvami, kde je utvořena krusta. [19]

Tepelný tok generovaný v tavenině Q_{gen} je minimálně odváděn na dně TNR a maximálně na bocích nádoby tokem Q_2 . Jak je zobrazeno na Obr. 1.6, kde je znázorněna homogenní tavenina, povrchová vrstva o tloušťce s_p , kudy je velký odvod tepla Q_1 , chladne více oproti zbytku taveniny. Dojde tedy k částečnému zchladnutí a zvětšení hustoty na povrchu, která přesáhne hodnotu hustoty ve zbytku taveniny. Tato nerovnováha vede k Rayleigh–Bénardově konvekci, kdy rozehrátá tavenina s menší hustotou stoupá k povrchu. V oblastech laminárního proudění je tepelný tok menší a v oblastech turbulentního proudění vyšší. Velikost a rozložení tepelného toku ve-

lice záleží na případné existenci ztuhlé krusty na dně. Tepelný tok mezi metalickou vrstvou a stěnou je řízen prouděním v okrajích této vrstvy o tloušťce s_m směrem dolů. [19]



Obr. 1.6: Rozložení teplot a tepelného toku v homogenní tavenině a ustálení přirozené cirkulace na dně TNR, přeloženo z [19].

Mezi nejvýznamnější jevy, které mohou způsobit protavení TNR je tzv. *fokusační efekt*. Za předpokladu rozdělení vrstvy lehkých kovů a oxidické vrstvy, jak šlo dříve vidět na Obr. 1.5b, je tepelný tok koncentrován v metalické vrstvě. Jelikož má metalická vrstva podstatně větší tepelnou vodivost než oxidická vrstva, dosahují tepelné toky do TNR v těchto místech velmi vysokých hodnot. To vede k lokálnímu přehřátí stěny reaktorové nádoby, které se projevuje zvýšeným odtavováním a v krajním případě i jejím selháním. Na rozhraní metalické vrstvy je tepelný tok v aproximaci nepřímo úměrný tloušťce vrstvy. Pro tloušťku vrstvy větší než 50 cm, což odpovídá přibližně 50 tunám oceli, je tepelný tok menší než $1,5 \text{ MW/m}^2$. Velikost tohoto tepelného toku je pak základním parametrem pro úspěšnost strategie IVMR, jelikož se musí zajistit, aby tento tok byl menší než tepelný tok kritický pro médium, kterým chceme externě ochlazovat dno TNR. [3, 16]

Jak již bylo zmíněno dříve v případě, kdy dno TNR okamžitě neselhává po přímém napadání taveninou a ani nedojde k parní explozi, tak je integrita TNR ohro-

žena vytvořeným bazénem taveniny. Moment selhání nejvíce závisí na tlaku v I.O a teplotě uvnitř TNR. Místo prvotního selhání je nejvíce pravděpodobné v oblastech, které byly vystaveny největším teplotám. [16]

Dno TNR je zatíženo vnitřním přetlakem, teplotním polem, svojí tíhou a tíhou taveniny v něm. Vnitřní přetlak a vlastní tíha dna TNR s taveninou jsou hlavní složky napětí, které nejsou zmírněny deformací, ale naopak umocněny, jelikož zúžením stěny TNR roste obvodové napětí. Hlavními deformačními mechanismy jsou creep a plastická deformace. Creep je proces závislý na čase a projevuje se v případě ocelí od teplot odpovídající přibližně 40 % teploty tání dané slitiny (cca 450-600 °C), zatímco plastická deformace se děje náhle při překročení meze kluzu. Ta se však s vysokými teplotami významně zmenšuje. [19]

Jakmile se objeví trhлина v TNR, tak se okamžitě šíří a její konečná velikost je velmi závislá na způsobu jejího šíření, které se odvíjí od metalurgických charakteristik použité oceli. Rozdíly chemického složení oceli včetně přítomnosti stopových prvků může změnit chování stěny TNR za vysokých teplot. [16]

1.7 Jevy v kontejnmentu

Po selhání TNR hovoříme o *ex-vessel* fázi. Poslední fyzickou bariérou proti šíření radionuklidů a záření do životního prostředí zůstává KTMT, který může selhat časně, nebo pozdně. Časné selhání KTMT může nastat několika mechanismy. Jmenovitě to jsou: vodíková exploze, přímý ohřev KTMT (direct containment heating, DCH) a parní exploze. Všechny tyto mechanismy jsou charakteristické rychlým uvolněním energie, které ohrožuje integritu KTMT. Vyhláška SÚJB č. 329/2017 [4] stanovuje, že časné selhání musí být prakticky vyloučeno, aby byl zajištěn dostatečný čas pro zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo. Pozdní selhání KTMT může nastat erozí dna KTMT taveninou nebo dlouhodobým přetlakováním. Tyto mechanismy mají naopak relativně pomalý vývoj. [17]

Další možností úniku ŠP je ještě tzv. *by-pass* neboli obtok KTMT, který může vést k časnému i pozdnímu úniku radioaktivních látek do okolního prostředí. *By-pass* může být samotný důsledek havarijní situace, nebo být i její iniciační událostí (netěsnost PG). Nová doporučení a bezpečnostní návody IAEA [33] deklarují, že obtok KTMT při TH musí být prakticky vyloučenou skutečností. Dle současně platného bezpečnostního návodu SÚJB [14] musí být pro splnění kritérií přijatelnosti vyloučena možnost, že obtok ochranné obálky způsobí časné nebo velké radiační havárie. Následuje zevrubný popis mechanismů, kterými může selhat KTMT s výjimkou parní exploze, která byla již popsána dříve.

Nebezpečí vznícení vodíku je už v *in-vessel* fázi, jelikož vodík je tvořen při oxidaci pokrytí a může docházet k jeho úniku do KTMT. Zdrojem vodíku je i interakce taveniny s betonem v *ex-vessel* fázi. Vodík je hořlavý plyn, který reaguje s kyslíkem za uvolnění 120 MJ/kg_{H₂} tepla. Následkem jeho vznícení vznikají velké tlakové rázy a vysoké teploty, které způsobují mechanické i tepelné namáhání KTMT. Dle bezpečnostních návodů IAEA [33] musí být exploze vodíku prakticky vyloučenou skutečností. Tomu se v praxi využívají pasivní autokatalytické rekombinátory nebo řízené spalování směsi vodíku před dosažením vyšší koncentrace pomocí tzv. *zapařovačů*.

V momentě selhání dna TNR dojde k vypuzení taveniny, páry a v některých případech i vodíku do šachty reaktoru. V závislosti na vnitřním tlaku TNR toto vede k fragmentaci koria a větší rozptyl fragmentů mimo reaktorovou nádobu. To může mít za následek DCH. Disperze koria vede k velmi efektivní tepelné výměně s plyny přítomnými v KTMT a k oxidaci metalických komponent přítomných v něm, což vede i k produkci vodíku. Vysoká teplota plynů a koria pak může mít za následek vznícení vodíku. [16]

Pokud nedojde k časnému selhání KTMT, začnou hrát roli jiné procesy. Kontakt mezi korem a betonem (molten core-concrete interaction, MCCI) vede k postupné erozi betonu stěn a dna reaktorové šachty, což může vést k protavení základů KTMT a úniku radioaktivních látek. Dále kontakt taveniny a jakékoliv přítomné vody vede k tvorbě páry a zvyšování tlaku v KTMT. Kromě páry vznikají při MCCI další, nekondenzovatelné plyny, jakými jsou hořlavý H₂ a CO a nehořlavý CO₂. Neoxidované kovy v korigu mohou při MCCI dodatečně oxidovat. [16]

Pro zabránění protavení dna KTMT je třeba z vypuzené taveniny odvádět teplo, které se stále generuje rozpadem ŠP. Existuje mnoho postupů pro chlazení taveniny. Za prvé tavenina je rozlita do suché šachty reaktoru a následně zaplavena vodou. To vede k vytvoření izolační krusty na jejím povrchu. Dalším způsobem je zaplavení šachty vodou před pádem taveniny, která se pak fragmentuje a několikanásobně zvětšuje svůj teplosměnný povrch. To vede k prudké produkci páry. Nakonec dalším způsobem je koncept COMET [34], který kombinuje oba přístupy a je založen na přívodu vody na dno taveniny zespoda. Dochází následně k tvorbě páry, která probublává skrze taveninu a zanechává za sebou velké množství pórů, které tvoří cestu pro budoucí chladicí vodu. [19]

Kapitola 2

Blok JE s VVER-1000/320

AZ reaktoru VVER-1000/320, který je na JE Temelín, obsahuje palivové soubory (PS) obsahující palivové proutky (PP) a regulační orgány tzv. *klastry*. Užitým štěpným materiálem je směs uranových izotopů ^{238}U a ^{235}U s obohacením přibližně do 5 %. Palivo je ve formě keramické tj. UO_2 lisováno do formy palivové tablety. Některé PP v rámci vybraných PS obsahují v matici paliva i vyhořívající absorbátor Gd_2O_3 . Umístěním tabletek do pokrytí ze Zr slitiny vznikají PP, ze kterých je sestaven celý PS. Celkově je PS v reaktoru VVER-1000/320 umístěno 163. [35]

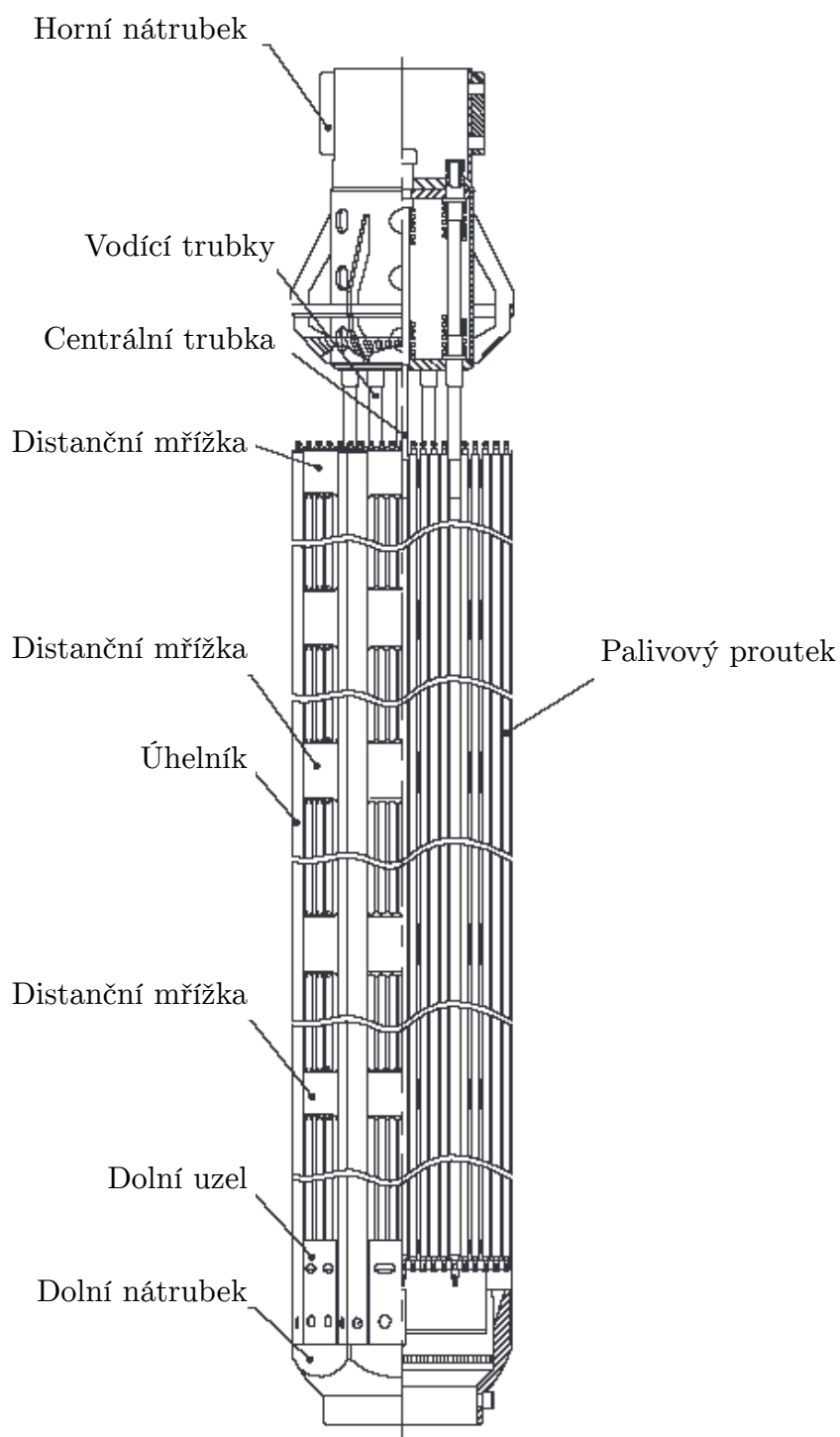
2.1 Konstrukce palivového souboru a vnitroreaktorových komponent¹

V současné době se na JE Temelín užívá PS typu TVSA-T od ruského výrobce TVEL, a to ve dvou modifikacích mod.1 a mod.2. Bezobálkový šestihranný palivový soubor TVSA-T se skládá z *nosného skeletu*; patice a hlavice neboli *dolního a horního nátrubku* a ze *svazku palivových proutků*. Schéma konstrukce PS typu TVSA-T mod.1, kterému se bude věnovat i následující popis a který je postupně nahrazován systémem TVSA-T mod.2, lze vidět na Obr. 2.1.

Nosný skelet slouží k zajištění geometrické stability PS a zajišťuje spolehlivý pohyb regulačních orgánů. V případě systému TVSA-T mod.1 ho tvoří:

- 18 vodících trubek,
- 1 centrální (instrumentační) trubka,
- distanční a směšovací mřížky,
- 6 úhelníků.

¹V rámci rešerše byly informace z této sekce výhradně čerpány z učebního textu pro přípravu personálu JE firmy ČEZ, a. s. [36] a z technické zprávy ÚJV Řež, a. s. [37].



Obr. 2.1: Konstrukce palivového souboru TVSA-T mod.1, upraveno z [36].

Centrální trubka je umístěna v centrální pozici PS a vytváří kanál pro zasunutí a vysunutí detektorů neutronového toku. Oproti tomu vodící trubky vytváří kanály pro tyče regulačních orgánů nebo pro proutky s neutronovými zdroji. Oba druhy trubek mají analogickou konstrukci a jsou vyrobeny ze Zr slitin pro minimalizování parazitního záchytu neutronů.

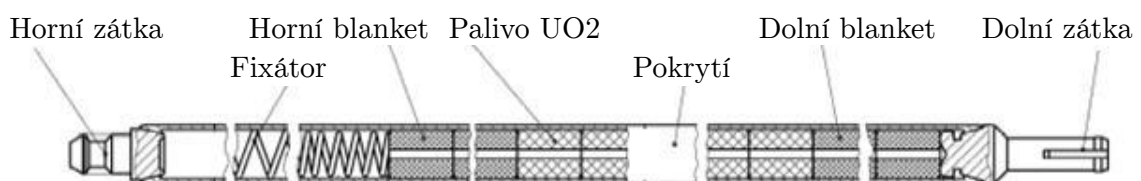
Konstantní rozteč PP udržují distanční mřížky, které slouží jako boční a vertikální opěra. Mřížky v nosném skeletu PS mají dle umístění, užitého materiálu a konstrukce několik funkcí. Mřížky mohou i zesilovat příčné míšení proudu chladiva v PS pro lepší odvod tepla (tzv. *směšovací mřížky*), nebo zabránit vibracím PP. Oproti centrální trubce procházejí vodící trubky skrze mřížky s určitou vůlí, aby nedocházelo k axiálnímu namáhání.

Dolní nátrubek slouží k fixaci PS ve spodní opěrné desce šachty reaktoru (neboli šachty AZ, jelikož se tento pojem někdy mylně zaměňuje za betonovou šachtu, ve které je reaktorová nádoba umístěna) a přivádí chladivo do PS. Má šestihranný tvar, který přechází přes kulovou plochu do válce. Na dolní vnější válcovou část tělesa je upevněn fixační kolík, který zajišťuje polohu a úhlovou orientaci PS. Pro zajištění tuhosti jsou v dolním nátrubku dvě paralelní žebra a jedno na ně kolmé. Všechny součásti dolního nátrubku jsou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli.

Horní nátrubek mimo jiné zajišťuje axiální fixaci PS a spojení PS s dolní deskou bloku ochranných trub pomocí pružin. Dále stabilizuje výtok chladiva z koncovek PP do prostoru ochranných trub, kompenzuje tepelnou dilataci vodících trubek a tlumí případný pád regulačních orgánů. Celý horní nátrubek je vyroben z korozi-vzdorné oceli.

Svazek palivových proutků je tvořen 312 PP rozmístěnými v pravidelné trojúhelníkové mříži. Pokrytí PP tvoří hermetickou fyzickou bariéru proti úniku ŠP. Každý PP lze charakterizovat: mírou obohacení izotopem ^{235}U v jednotlivých PP; množstvím vyhořívajícího absorbátoru Gd_2O_3 v PP; radiálním profilováním svazku palivem různého obohacení a počtem a rozmístěním PP s vyhořívajícím absorbátorem v rámci jednoho PS.

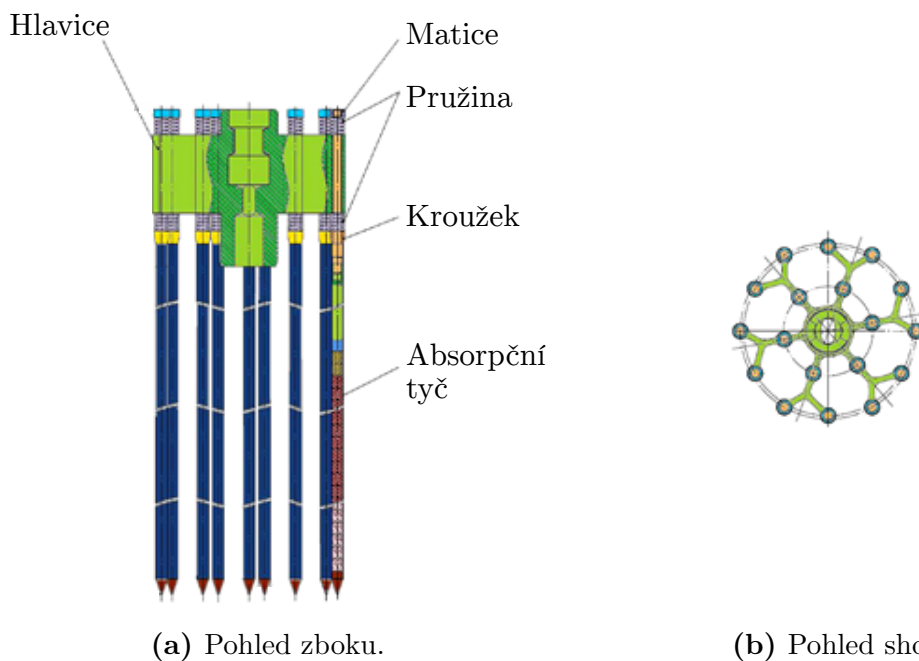
PP je základní komponentou PS. Jak je znázorněno na Obr. 2.2, skládá se z vnějšího pokrytí, palivových tabletek, vnitřní pružiny – fixátoru a plnicího plynu – He. PP je natlakován pro lepší odolávání vnějšímu tlaku v AZ. Pro kompenzaci tlakového nárůstu hromaděním plynných ŠP se za provozu nachází v horní části PP volný objem. Palivový sloupec tabletek obohaceného uranu uvnitř PP je z horní a dolní části ukončen tabletou s přírodním obohacením tzv. *blanket*.



Obr. 2.2: Schéma konstrukce palivového proutku TVEL, upraveno z [38].

Dalšími komponentami uvnitř AZ reaktoru jsou regulační orgány, které slouží k mechanické regulaci výkonu reaktoru. Systém regulačních orgánů slouží ke kompenzaci reaktivity vyvolané změnami tepelného výkonu, změnami teploty chladiva během provozu nebo izotopickými změnami složení tablet vlivem vyhořívání. Dále systém regulačních orgánů pomáhá zajišťovat podkritičnost reaktoru v odstaveném stavu společně s tzv. *odstavnou koncentrací* kyseliny borité v I.O. Systém je tvořen 61 fyzikálně i geometricky totožnými svazky absorpčních tyčí – klastry. Ty se dělí do 10 skupin, ve kterých se všechny regulační orgány dané skupiny klastrů pohybují současně a jednotně. Některé skupiny však plní bezpečnostní funkci a jsou vždy během provozu vytaženy mimo AZ. Nepohybuje se s nimi s výjimkou havarijního odstavení.

Klastr, který lze vidět na Obr. 2.3, se skládá z 18 absorpčních tyčí, hvězdicové sestavy – hlavice, 36 pružin a 18 matic. Hlavice je tvořena centrální objímkou s konzolovými žebry, ve kterých je celkem 18 otvorů pro umístění absorpčních tyčí připevněných na hlavici pomocí dvou pružin. Ty plní funkci utlumení rázu na horní nátrubek při případném pádu klastrů do AZ. Pro fixaci absorpční tyče je ve hvězdicové soustavě našroubována matice, která je proti nedovolenému povolání jistěna svarem. Samotné absorpční tyče jsou pokryty chromniklovou slitinou, uvnitř které jsou uloženy tablety karbidu bóru – B_4C . Samotný konec absorpčních tyčí, který i během vytažení za provozu zasahuje do AZ, je tvořen slitinou na bázi stříbra nebo kadmia. Důvodem je nežádoucí reakce (n,α) na boru.

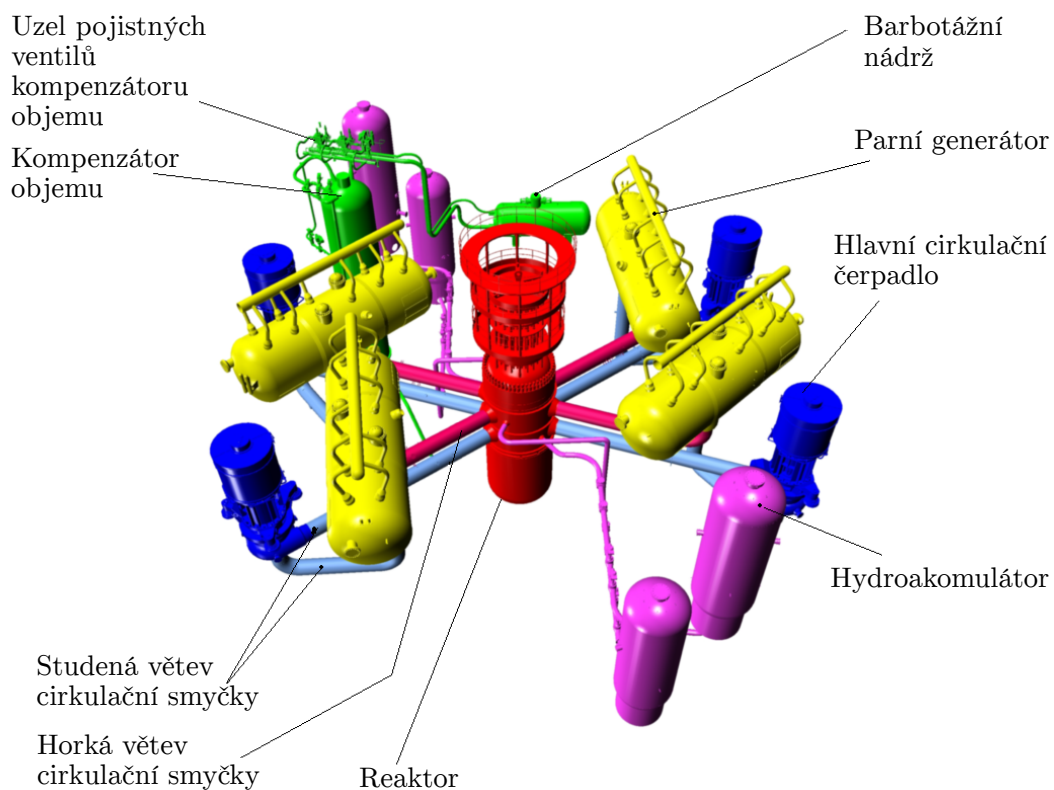


Obr. 2.3: Schéma svazku absorpčních tyčí – klastru, převzato z [36].

2.2 Základní zařízení primárního okruhu²

Teplu vzniklé štěpením v AZ je nutno odvádět pryč. K tomu slouží chladivo, které současně slouží jako moderátor I.O a které je tvořeno demineralizovanou vodou s koncentrací kyseliny borité a dalšími chemikáliemi (např. pro vyrovnání pH). Chladivo je přiváděno v hlavním cirkulačním potrubí při běžném pracovním tlaku 15,7 MPa a při teplotě 290 °C do reaktoru, kde se v AZ ohřívá o cca 30 °C. Následně je chladivo odváděno do PG, kde probíhá přes teplosměnnou plochu přenos tepla z I.O do II.O. Po předání tepla je chladivo pomocí HCČ opět vhnáno zpět do reaktoru. Tento okruh tvoří tzv. *cirkulační smyčku*, kde se potrubí přivádějící chladivo do reaktoru označuje jako *studená větev* a potrubí odvádějící chladivo z reaktoru do PG jako *horká větev*. Cirkulační smyčky, které tedy mají horké a studené větve, jsou k rektoru VVER-1000 připojeny celkem 4.

Primární okruh, jehož schéma lze vidět na Obr. 2.4, je tvořen sadou zařízení a potrubí, které dohromady tvoří hranici hermetického prostoru naplněného chladivem pod vysokým tlakem. Schéma je kromě základních zařízení I.O doplněno o KO, který je rozebrán později a o *barbotážní nádrž* a tzv. *hydroakumulátory* tvořící pasivní část *systému havarijního chlazení AZ*, který bude rozebrán dále v sekci 2.5.

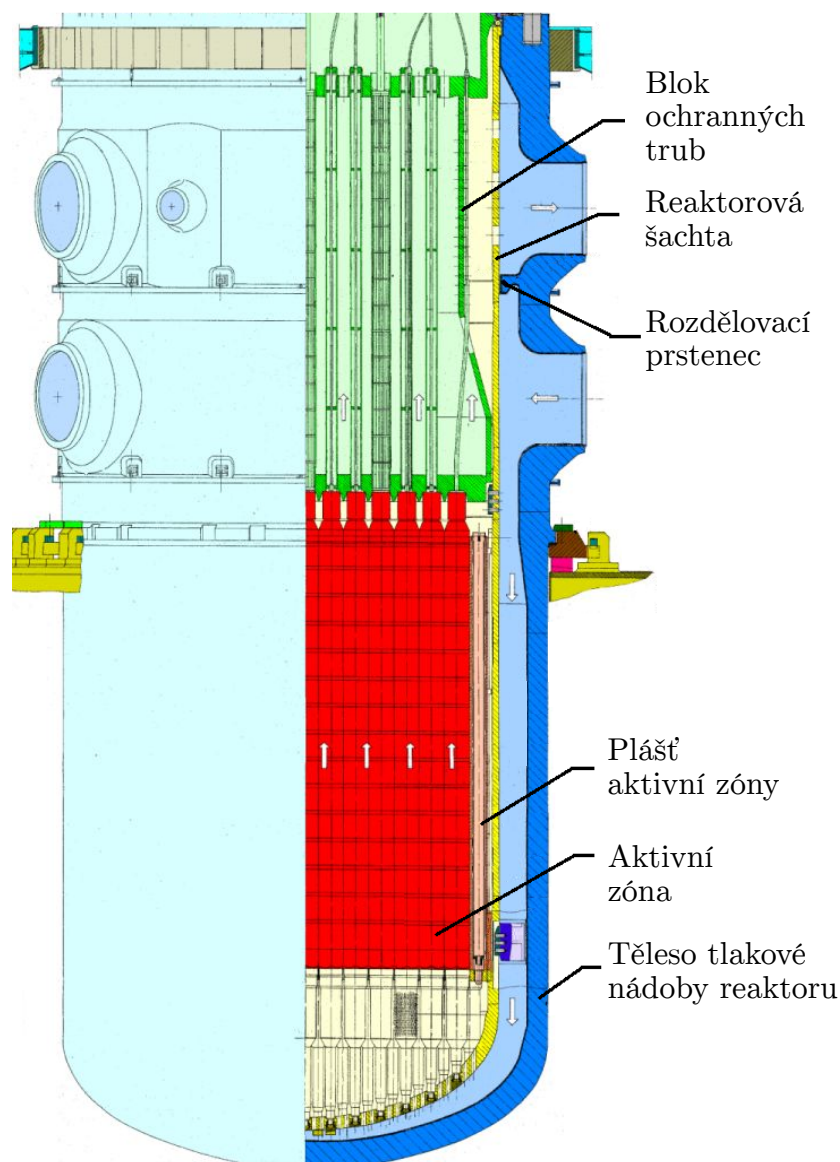


Obr. 2.4: Zařízení primárního okruhu JE Temelín, upraveno z [39].

²Tato sekce výhradně čerpá z učebního textu pro přípravu personálu JE ČEZ, a. s. [35, 39].

Reaktor VVER 1000/320

Základní částí reaktoru, který je zobrazen na Obr. 2.5, je těleso tlakové nádoby reaktoru (TNR), ve kterém jsou umístěny vnitřní vestavby reaktoru a je tvořené vysokojakostní uhlíkovou ocelí s nerezovým, 7-9 mm silným návarem na vnitřním povrchu.



Obr. 2.5: Jaderný reaktor VVER-1000/320, upraveno z [35].

Uvnitř TNR je usazena šachta reaktoru/AZ, která prochází téměř celou výškou TNR a svým děrovaným eliptickým dnem slouží k usměrnění a zrovnoměrnění toku chladiva do AZ. Na vnitřním osazení dna jsou uchyceny podpěry PS. Ve své horní části je mezi vstupními a výstupními hrdly TNR obepnuta rozdělovacím prstencem, který odděluje vstup a výstup chladiva proudícího reaktorem. Současně svým umístěním mezi AZ a TNR slouží šachta reaktoru jako tepelné a radiační stínění TNR.

Stejnou roli zastává také plášť AZ, který je uložen uvnitř reaktorové šachty a tvoří radiální ohraničení AZ. Plášť je pevně zafixován v reaktorové šachtě a není samostatně vyjímatelný. Poslední vnitřní vestavbou je blok ochranných trub, jenž je nad AZ a který vymezuje vzájemnou polohu PS, přitlačuje je do podpěr a vytváří ochranný prostor pro pohyb klastrů. Všechny vnitřní vestavby jsou vystaveny korozně agresivnímu prostředí v I.O, a proto se používá pro jejich výrobu korozivzdorná ocel.

Na vrchu TNR je usazen horní blok, který se skládá z víka a nosné ocelové konstrukce, kde jsou umístěny lineární krokové pohony sloužící k manipulaci s klastry a tím pádem ke změnám výkonu reaktoru. V nosné konstrukci jsou dále umístěny vývody vnitroreaktorových měření jako např. měření teploty chladiva na výstupu z AZ či hustoty neutronového toku.

Hlavní cirkulační čerpadlo

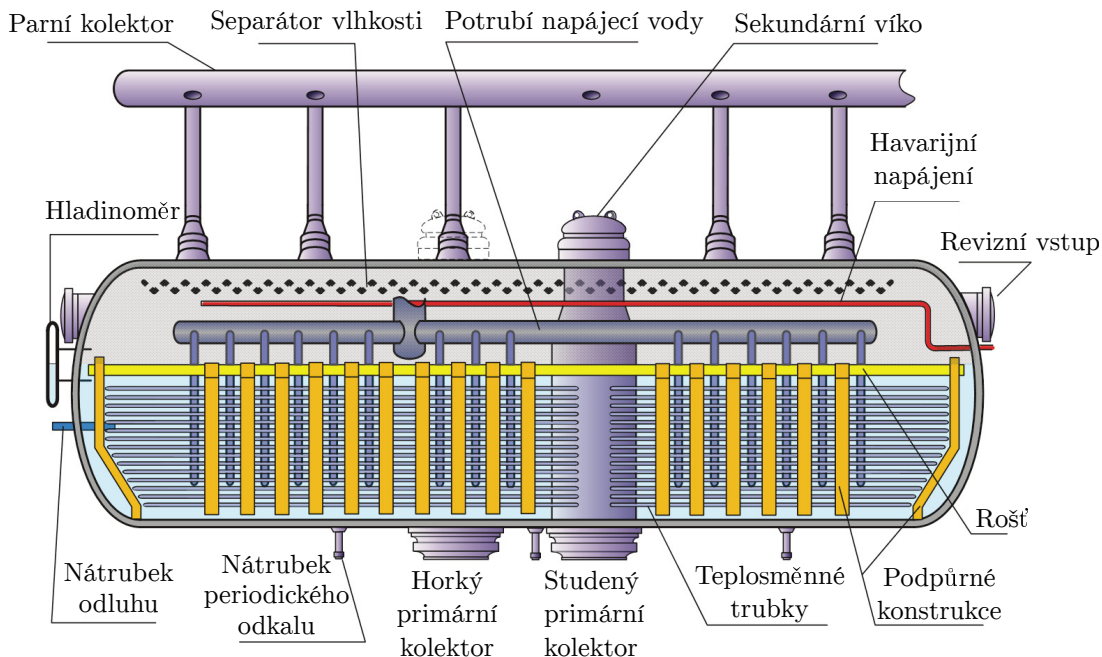
Nucenou cirkulaci chladiva v hlavním cirkulačním potrubí skrze AZ a PG zabezpečuje HCČ. Důvodem je malý teplotní rozdíl mezi horkou a studenou větví činící kolem 30 °C, který není dostatečně velký pro vznik přirozené cirkulace schopné odvádět generované teplo. Tyto celkem 4 HCČ jsou po jednom umístěna na jednotlivých cirkulačních smyčkách. Jedná se o jednostupňové, odstředivé, svislé čerpadlo s zahlcovanou mechanickou ucpávkou. Obsahuje tedy jedno oběžné kolo umístěné na svislé hřídeli, které svou rotací využívá odstředivé síly pro vhánění média do výtlačného potrubí. Zahlcovaná mechanická ucpávka je součástí, do které je přiváděna těsnící kapalina, díky čemuž se brání úniku chladiva z I.O.

K samotnému HCČ jsou připojeny další 4 pomocné systémy HCČ, které zabezpečují bezpečný a bezporuchový provoz HCČ ve všech provozních režimech. Jedná se o *autonomní okruh chlazení*, který se maže a chladí dolní ložisko; *okruh těsnící vody* pro mechanickou zahlcovanou ucpávku HCČ; *systém oplachu koncového stupně ucpávky*, který zamezuje krystalizaci kyseliny borité z chladiva a *olejový systém HCČ* neboli olejové hospodářství HCČ, který zajišťuje skladování, čištění, chlazení, a rozvod oleje k jednotlivým HCČ.

Parní generátor

Parní generátor neboli parogenerátor (PG), jehož schéma lze vidět na Obr. 2.6, se dělí na dvě základní části, primární a sekundární. Jedná se o tepelný výměník, který slouží k přenosu tepla z chladiva I.O do média v II.O. Primární část je tvořena dvěma primárními kolektory a teplosměnnou plochou tvořenou trubičkami. Sekundární část tvoří plášť nádoby PG se dvěma eliptickými dny. Do PG prostupují větve hlavního cirkulačního potrubí ve formě primárních kolektorů (teplý ukončující horkou větev, respektive studený započínající větev studenou). Do primárních kolektorů

je vetknuto 11 000 horizontálně uspořádaných *U-trubek* teplosměnné plochy, které oba kolektory uvnitř PG propojují. Pro zabránění únikům skrze trubkové spoje jsou *U-trubky* přivařeny k trubkovnici. PG je hraniční zařízení mezi potenciálně kontaminovaným chladivem I.O a média v II.O a je třeba zabránit jakémukoliv úniku chladiva z I.O do II.O. Z důvodu mechanického a tepelného namáhání trubiček však může docházet k netěsnostem po určité době provozu. Proto je počet trubiček naddimenzovaný a netěsné trubičky se zaslepují.



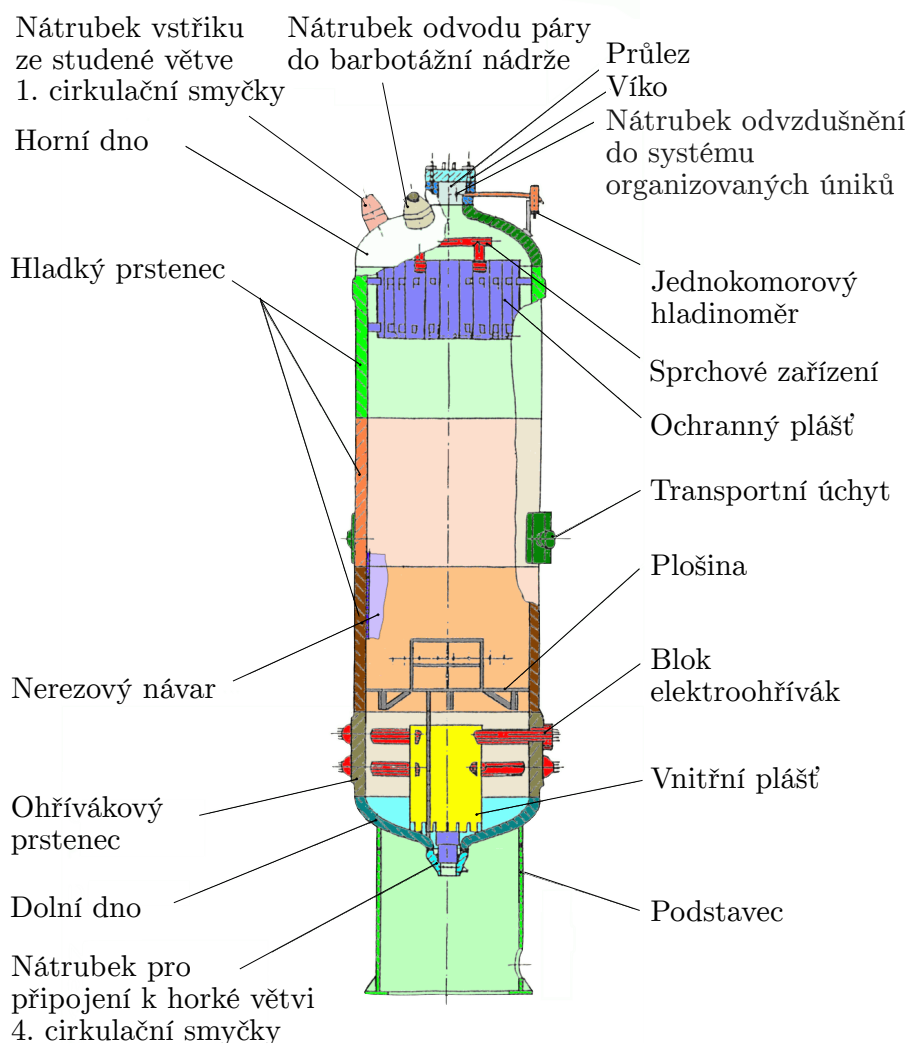
Obr. 2.6: Schéma parního generátoru na JE Temelín, upraveno z [40].

Teplo ze štěpné reakce probíhající v AZ je odváděno chladivem I.O skrze teplou větev do trubičkové teplosměnné plochy v PG. Ze II.O se přivádí do sekundární části PG napájecí voda, která skrze stěny trubiček teplosměnné plochy odebírá teplo z chladiva I.O, což ji uvádí do varu. Takto generovaná pára s sebou odnáší i kapky vody, a proto je odváděna na separátory vlhkosti. Po separaci je pak sytá pára odváděna parovodem na parní turbínu, která je na JE Temelín pouze jedna na blok. Var na sekundární straně PG, kde je teplota chladiva nižší než na straně I.O, je umožněn díky výrazně nižšímu tlaku udržovanému v II.O (cca 6,2 MPa při nominálním provozu). Napájecí vodu do PG po tepelné regeneraci na NT a VT ohřívácích dodávají turbonapáječky a sada čerpadel z napájecí nádrže.

Pomocným systémem PG, který na sekundární straně udržuje vhodné podmínky, je *systém odluhu a odkalu PG*. Tento systém za provozu odvádí vodu s nečistotami (vysrážené a rozpuštěné soli), které v PG zůstávají po vypaření vody, na čisticí stanici. Pročištěná voda se potom vrací do II.O.

Systém kompenzace objemu

Systém se skládá z KO, pojistného zařízení I.O a barbotážní nádrže (BN). Během provozu je potřeba vyrovnávat tlakově objemové změny vyvolané změnou teploty chladiva v uzavřeném I.O. Vyrovnání těchto změn je umožněno díky KO, který lze vidět na Obr. 2.7.



Obr. 2.7: Konstrukce kompenzátoru objemu na JE Temelín, upraveno z [39].

V KO je umístěno chladivo ohřáté na mez sytosti při pracovním tlaku I.O pomocí tzv. *elektroohříváků*. Hladina chladiva sahá pouze do cca 2/3 KO a zbytek je vyplněn parním polštářem, který lze sprchovým systémem kondenzovat nebo expandovat vyráběním další páry pomocí ohřevu elektroohříváky. Kondenzací se zmenšuje objem polštáře, což vede ke zpomalení nebo i zastavení nárůstu tlaku. Naopak expanzí může vznik nové páry vyrovnat případný pokles tlaku. Cílem je udržet stabilní podmínky v I.O, aby nedošlo k varu či porušení I.O přetlakováním. Jelikož celý I.O tvoří jeden propojený hermetický prostor, tak je postačující, aby byl KO připojen pouze k jedné studené a k jedné horké větvi cirkulační smyčky.

V případě, že samotný KO není schopen vyrovnat nárůst tlaku v I.O, přijde na řadu pojistné zařízení I.O s jedním odlehčovacím a dvěma pojistnými ventily. Ventily jsou odstupňovaně otevírány s narůstajícím tlakem. Odlehčovací ventil je aktivován řídicím ventilem, který ho otevře, oproti tomu pojistné ventily jsou nastaveny pružinou na otevření při dosažení určitého tlaku.

Lze předpokládat, že pára, která je odváděna z KO a pochází z chladiva I.O, je radioaktivní. Z tohoto důvodu je pára odváděna do BN, ve které je demineralizovaná voda. Pára je vyvedena přívodní trubicou pod hladinu, a tím je nucena tímto médiem probublat a kondenzovat. Tím zmenší svůj objem a nad hladinu projdou pouze plyny, které byly v chladivu I.O rozpuštěny, uvolnily se a nemohou zkondenzovat, pokud není voda v BN saturovaná.

Systém havarijního odvodu paroplynné směsi

V případě příliš velkého poklesu tlaku se může v částech I.O se zdroji tepla vytvořit paroplynná bublina, která může zabránit cirkulaci chladiva. Proto posledním zařízením I.O je systém havarijního odvodu paroplynné směsi, který je tvořen sérií potrubních tras (propojující reaktor, primární kolektory PG, KO a BN) a oddělovacích armatur, které dané trasy otevírají a zavírají.

2.3 Technologické systémy v sekundárním okruhu³

Přívodem chladiva I.O do PG a výměnou tepla se vyrábí na sekundární straně PG mokrá pára, která se na separátorech mění na sytou páru. Parovody, které jsou součástí rozvodu ostré páry (pára s nejvyššími parametry, jelikož ještě nekonala práci) vedou tuto páru na VT díl turbíny. Pára zde předá část své energie turbíně, kvůli čemuž část z ní zkondenzuje. Takto vzniklá vlhkost musí být separována před vstupem páry na NT díl turbíny, jinak by mohlo dojít ke zvýšené erozi lopatek turbíny. K tomu je využito *systému separace a přehřívání*, což je jeden z pomocných systémů turbíny. Využitím dvou separátorů – mezipřehříváčů dochází k separaci vlhkosti a přehřátí páry nad mez sytosti pomocí páry z odběru na VT dílu turbíny.

Ze separátorů – mezipřehříváčů se pára přivádí do jednotlivých těles NT dílu turbíny, kde dochází k dalšímu odebrání energie páry. Dále pak mokrá pára pokračuje do systému kondenzace. Každé ze tří těles NT dílu turbíny je napojeno na samostatný hlavní kondenzátor. Z kondenzátoru je tepelná energie odváděna okruhem cirkulační chladicí vody a dochází ke kondenzaci páry. Kondenzát stéká do dolní

³Tato sekce výhradně čerpá z učebního textu pro přípravu personálu JE ČEZ, a. s. [41, 42]. Oproti zařízením I.O, která se v integrálních LP kódech pro simulace TH modelují poměrně detailně, turbína a další systémy II.O se modelují pouze jako propady hmoty respektive entalpie.

částí kondenzátoru, kde je sáním sadou kondenzačních čerpadel odváděn přes NT regeneraci dále do systému tepelné úpravy vody.

V tepelné úpravě vody se kondenzát odplyňuje v *systému odplyňování kondenzátu* a stéká do napájecí nádrže. Systém napájení PG dopravuje vodu z napájecí nádrže přes VT regeneraci, kde se napájecí voda přehřívá pomocí páry z odběru parní turbíny, do sekundární strany PG. Využití regenerace zvyšuje termickou účinnost bloku za cenu rostoucí konstrukční složitosti.

Sekundární část elektrárny JE Temelín tak tvoří rozsáhlý soubor technologických systémů a zařízení. Ty lze rozdělit na technologické systémy strojovny a na vnější objekty – pomocné systémy II.O. Základní systémy strojovny jsou následující:

Rozvod páry

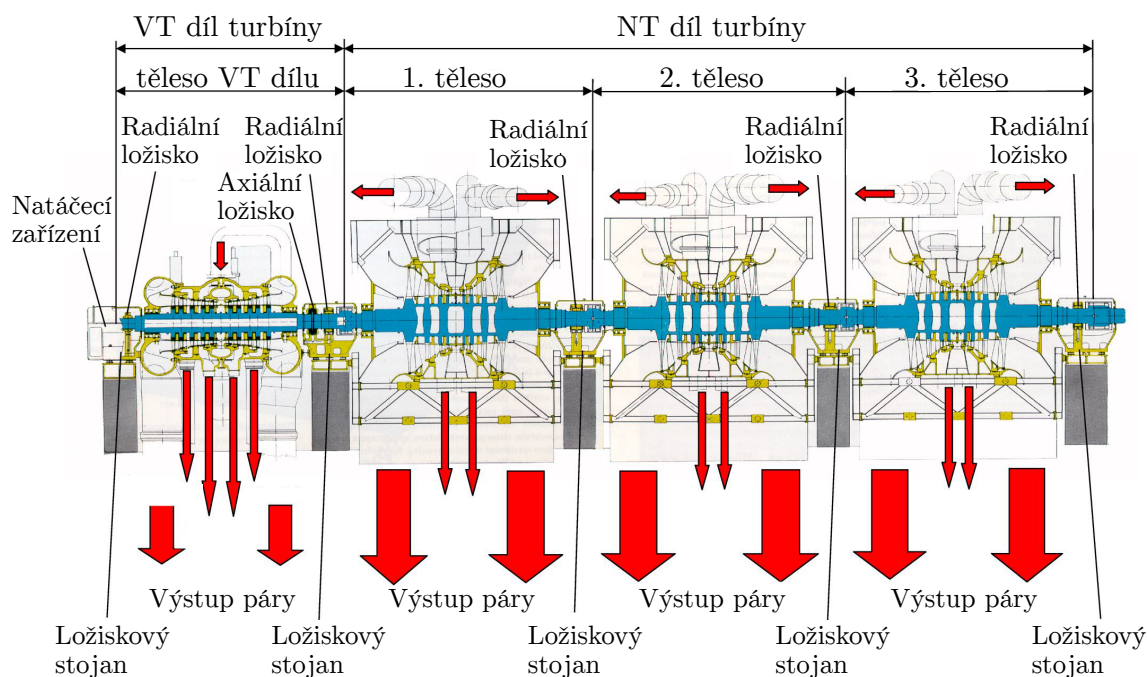
Jedná se o soustavu parovodů a parních kolektorů, které zajišťují dopravu ostré páry od PG k turbíně a rozvod páry pro vlastní spotřebu blokových a neblokových spotřebičů JE ve všech režimech jejího provozu.

Z každého parovodu ostré páry je vyvedena odbočka, která je zaústěna do společného *hlavního parního kolektoru* pro vyrovnání tlaků a množství páry mezi jednotlivými parovody. Pracovní ostrá pára dále proudí skrze VT odlučovače, za účelem odstranění části kondenzátu z páry, do pomocného kolektoru. Odtud se pára odvádí na VT díl turbíny, odkud se část páry pomocí dvojice potrubních tras odebírá do mezipřehříváčů pro přehřívání páry. Systém rozvodu ostré páry se může podílet i na dochlazování I.O. Parní výkon PG je v takovém případě odváděn přes přepouštěcí stanice do kondenzátoru (tzv. *bypass turbíny*), nebo také přes přepouštěcí stanice do atmosféry.

V případě nárůstu tlaku páry v PG může být ze systému pára odváděna do atmosféry pomocí přepouštěcích stanic, které jsou umístěny na každém ze čtyř parovodů. Celý systém dále chrání čtyři skupiny impulsních pojistných ventilů. V případě porušení parovodu ostré páry je nezbytné zamezit poklesu tlaku ve zbytku systému, jinak by mohlo dojít k vysušení PG a podchlazení I.O. Z tohoto důvodu je na každém parovodu ostré páry umístěna rychločinná armatura pro přerušování proudění média a zpětná armatura pro zabránění zpětného proudění páry k porušenému místu.

Parní turbína

K přeměně využitelné tepelné energie na mechanickou slouží turbosoustrojím, jehož hlavní částí je parní turbína, kterou lze vidět na Obr. 2.8, společně s generátorem. Parní turbína je svým provozem úzce svázána s ostatními systémy II.O, se kterými se vzájemně ovlivňuje.



Obr. 2.8: Konstrukce parní turbíny na JE Temelín, upraveno z [41].⁴

Ostrá pracovní pára přiváděná do parní turbíny prochází po VT odlučovači blokem rychlozávěrných ventilů, které jsou součástí zabezpečovacího systému, a blokem regulačních ventilů, kterými se reguluje množství páry hnané na turbínu, a tím pádem i její výkon. Průchodem přes VT díl se z páry odebere cca 40 % celkové využitelné energie, která se přemění na mechanickou. Tento díl je dvouproudý (tj. pracovní pára vstupuje do střední části a vystupuje na jeho konci dvěma hrdly tzv. *diabolo*) a obsahuje 5 turbínových stupňů. Část pracovní páry je odváděna z výstupu VT dílu do NT regeneračních ohříváků. Po průchodu separátory – mezipřehříváči vstupuje zbylá přehřátá pára blokem rychlozávěrných a záchytných klapek paralelně na 3 tělesa NT dílu, kdy každé jednotlivé těleso NT dílu přispívá cca 20% podílem na přeměnu využitelné energie páry na energii mechanickou. Každé těleso NT dílu je opět dvouproudé s 5 turbínovými stupni a výstupní hrdlo je připojeno přímo na kondenzátor.

Spolehlivý a bezpečný provoz parní turbíny pomáhají zajišťovat její pomocné systémy. Mezi ně patří: *systém mazacího oleje*, jehož hlavním úkolem je dopravení mazacího oleje do ložisek celého soustrojí; *elektrohydraulický regulační a zabezpečovací systém*, který slouží mj. k regulaci otáček a bezpečnostnímu odstavení soustrojí parní turbíny a generátoru; *systém ucpávkové páry*, jenž slouží k oddělení pracovního prostoru turbíny od vnějšího prostředí; dále pak *systém separace a přehřívání*, *systém neregulovaných odběrů* a *systém odvodnění parní turbíny*.

⁴Na Obr. 2.8 není na tělesech NT dílu znázorněn přívod páry, který je do středu tělesa. Dále neoznačené šipky v dolní části turbíny a v horních částech těles NT dílu znázorňují odběr páry do dalších částí a systémů II.O.

Systém kondenzace

Během nominálního provozu bloku vstupuje pára po odevzdání využitelné energie v tělesech NT dílu turbíny do tří kondenzátorů. Pára předává přes teplosměnné plochy teplo do cirkulační chladicí vody a kondenzuje. Cirkulační chladicí voda dále do každého kondenzátoru vstupuje dvěma potrubími. V přední části se ohřívá z předpokládané vstupní teploty 18,5 °C na teplotu 25 °C a následně pokračuje do druhé části kondenzátoru. Na výstupu je teplota cirkulační chladicí vody cca 33 °C a pomocí dvou potrubí je odváděna do vratného kolektoru, odkud dále proudí do chladících věží, kde se ochlazuje.

Vzniklý kondenzát je dopravován potrubím do *systému odplyňování kondenzátu* pomocí čtyř agregátů sdružujících vždy dvě kondenzátní čerpadla poháněná jedním elektromotorem. Při nominálním výkonu pracují tři agregáty a jeden je záložní. Při najíždění bloku nebo dochlazování I.O je využita i dvojice pomocných kondenzátních čerpadel.

Nízkotlaká regenerace

Jedná se o soubor zařízení, který zajišťuje postupný ohřev kondenzátu před jeho vstupem do *systému odplyňování kondenzátu* pomocí páry, která je přiváděna odběrem z parní turbíny. NT regenerace se skládá ze tří větví, kdy každá větev je tvořena čtyřmi horizontálními NT ohříváči, kde je kondenzát ohříván odběrovou párou. Každá větev je samostatně dimenzována na 50 % nominálního výkonu bloku, proto se normálně provozuje každá na 66 % svého výkonu. Za NT regenerací se trasy kondenzátu spojují a kondenzát je veden do *systému odplyňování kondenzátu*.

Systém odplyňování kondenzátu

Tento systém spadá společně se systémem sběru technologických kondenzátů a vloženým okruhem chlazení strojovny do systému tepelné úpravy vod. *Systém odplyňování kondenzátu* má za úkol odstranění všech plynů (zvláště O₂ a CO₂) z kondenzátu určeného pro napájení PG a je složen ze čtyř termických odplyňovačů, na které navazuje napájecí nádrž. Z té je voda pomocí napájecích čerpadel odváděna třemi hrdly s ochranou proti nečistotám a parnímu průniku páry do sacího potrubí.

Napájení parního generátoru

Jedná se o komplex systémů a subsystémů umožňující napájení PG ve všech režimech provozu, včetně havarijních, a z hlediska zajištění funkce II.O patří společně se systémem kondenzace k nejdůležitějším. Systém v první řadě napájí PG termicky odplyněnou vodou, kterou dopravují čerpadla z napájecí nádrže. Zvyšováním tepelného výkonu bloku dochází také ke zvyšování parního výkonu PG, a tím i k nutnosti

doplňovat do nich více napájecí vody, a proto počet a druh zapojených čerpadel závisí na výkonu bloku.

Při nižších výkonech bloku proudí napájecí voda pomocí napájecích čerpadel do potrubní trasy za VT regeneraci a přes hlavní napájecí kolektory a napájecí hlavy přímo do PG. Při vyšších výkonech proudí napájecí voda do hlavních napájecích kolektorů přes VT regeneraci nebo její obtoky. Napájecí hlavy regulují množství průtoku do PG. Regulace je prováděna na základě měření hladiny nebo parního výkonu. Při nominálním výkonu pracují dvě turbonapájecí soustrojí a třetí je v rezervě.

V případě situace, kdy není možné zajistit napájení PG normálním způsobem napájecí vodou, je blok odstaven pomocí havarijních ochran, které jsou aktivovány zaznamenáním nízkých hladin napájecí vody v PG. Pro zajištění odvodu tepla z I.O je uveden do provozu systém havarijního napájení PG. Tento systém je složen ze zásobní nádrže demineralizované vody, kudy je voda samospádem hnána do sání havarijních napájecích čerpadel a dále do havarijních napájecích kolektorů a hlavy.

Vysokotlaká regenerace

Pro zvýšení účinnosti termodynamického cyklu II.O se využívá VT regenerace pro ohřev napájecí vody před vstupem do PG pomocí ohřívací páry přiváděné z odběru parní turbíny a využití tzv. *stabilizační páry* a zbytkového tepla kondenzátu přiváděného ze separátorů-mezipřihříváčů. Ohřev napájecí vody se provádí ve dvou větvích, v nichž v každé je VT ohříváč a paralelně s ním dvojice podchlazovačů kondenzátu topné páry.

2.4 Kontejnment

Dle vyhlášky SÚJB [4] musí u JZ obsahujícího jaderný reaktor v principu DiD úlohu fyzické bariéry zajišťovat i systém ochranné obálky. Tím se dle stejné vyhlášky rozumí: *systemy, konstrukce a komponenty určené projektem JZ k zabránění šíření ionizujícího záření a úniku radioaktivní látky z jaderného reaktoru a k ochraně jaderného reaktoru proti působení vlastností území a vnější hrozbě.*

Ochranná obálka – kontejnment (KTMT) tak tvoří poslední fyzickou bariéru zabraňující úniku ŠP do životního prostředí a okolí JE. Kromě toho plní funkci ochrany reaktoru a I.O před okolními vlivy jako je tlaková vlna od výbuchu nebo pád letadla. Pro návrh a uspořádání KTMT je určující maximální projektová nehoda⁵ (MPN).

⁵V případě JE Temelín je maximální projektovou nehodou „velká LOCA“, tj. prasknutí hlavního cirkulačního potrubí tzv. *gilotinovým* způsobem s oboustranným výtokem v místě výtlaku z HCC, kde je nejvyšší tlak a chladivo tedy bude unikat nejrychleji.

Na JE Temelín je využito plnotlaké jednoduché ochranné obálky, kterou tvoří jediný plášť z betonu předpjatého pomocí předpínacích lan a vrstva nerezové oceli, která hermeticky uzavírá vnitřní prostor. Plnotlaké obálky jsou dimenzovány na zvládnutí přetlaku, který by vznikl v případě MPN. Pro eliminování případných malých úniků je v KTMT udržován trvale mírný podtlak. [43]

KTMT na JE Temelín je vysoký 56 metrů a skládá se z válce a eliptického vrchlíku. Stěny válce jsou silné 1,2 metru a v případě konstrukce kopule je tloušťka stěn 1,1 metru. Vnitřní poloměr válcové části KTMT činí 45 metrů. Ocelová výstelka uzavírající hermeticky vnitřní prostor je tlustá 8 milimetrů. KTMT je projektován, vzhledem k výsledkům analýzy MPN, na maximální přetlak 0,4 MPa při teplotě atmosféry KTMT 150 °C. [44]

Ve spojitosti s KTMT je v rámci *systému havarijního chlazení AZ*, který je více rozebrán v sekci 2.5, možno NT havarijní chlazení přepojit na sání z jímky ochranné obálky, kde se uvolněná voda v KTMT shromažďuje.

2.5 Systém havarijního chlazení AZ⁶

Z hlediska požadavků na dodávání energie lze *systém havarijního chlazení AZ* rozdělit na *pasivní* a *aktivní*. Aktivní část lze dále rozdělit na NT a VT, která se ještě dělí na *systém havarijního VT doplňování* a *systém havarijního VT vstřikování*.

Součástí *systému havarijního chlazení AZ* je i *sprchový systém ochranné obálky*, který zajišťuje snížení tlaku v hermetických prostorech po havárii LOCA a zabraňuje úniku ŠP do životního prostředí. Je složen ze tří nezávislých divizí z hlediska zdrojů media, elektrického napájení a ovládní, kdy každý podsystém obsahuje sprchové čerpadlo, armatury, sprchové trysky a nádrž havarijní zásoby roztoku kyseliny borité. Každý podsystém je schopen sám zajistit požadované funkce.

Aktivní NT systém havarijního dochlazování I.O je tvořen třemi podsystémy, které jsou opět nezávislé. Každý je schopen zajistit plnění požadované funkce samostatně (tj. zálohování 3x 100%). Podsystém se skládá z čerpadla, havarijního výměníku, armatur a spojovacího potrubí. VT systémy jak havarijního doplňování tak vstřikování jsou též tvořeny třemi podsystémy (obsahující čerpadlo, nádrž zásoby roztoku kyseliny borité a spojovací potrubí) a zálohovány 3x 100%. Systém VT doplňování slouží především ke kompenzaci úniků chladiva I.O během případné malé LOCA havárie. Oproti tomu systém VT vstřikování je určen pro doplňování do I.O při uvolňování kladné reaktivity v AZ a při zachování vysokého tlaku v I.O. V případě ztráty napájení jsou aktivní systémy napájeny z dieselgenerátorů.

⁶Tato sekce, pokud není řečeno jinak, výhradně čerpá z učebního textu pro přípravu personálu JE firmy ČEZ, a. s. [45].

Pasivní část je tvořena čtyřmi tlakovými zásobníky tzv. *hydroakumulátory*. Ty obsahují roztok kyseliny borité a natlakovaný plynový polštář tvořený dusíkem. Jedna dvojice hydroakumulátorů přivádí roztok nad AZ a druhá pod AZ. Každý hydroakumulátor je vybaven elektroohříváky pro ohřátí roztoku, aby se předešlo teplotnímu šoku materiálů v I.O, zpětnými klapkami, rychločinnými armaturami a pojistnými ventily, které brání překročení tlaku v zásobníku nad přípustnou mez. Zpětné klapky jsou uzavřeny a utěsněny tlakem ze strany I.O, a tím pádem se v případě poklesu tlaku v I.O automaticky otevírají. Pro zabránění vniku dusíku do AZ, což by zhoršilo její ochlazování, slouží rychločinné armatury, které se uzavřou při poklesu hladiny v hydroakumulátoru pod stanovenou úroveň.

Součástí scénáře iniciovaný událostí LOCA zvoleného pro citlivostní studii v kapitole 4 je i *diversní systém doplňování odtlakovaného I.O*. Systém se skládá ze dvou čerpadel a potrubních rozvodů s armaturami sloužící k přívodu roztoku kyseliny borité do reaktoru. Koncentraci kyseliny přiváděné v roztoku lze měnit užitím sání dalších čerpadel z jiných nádrží, které mohou obsahovat různé koncentrace kyseliny borité, nebo i čistý kondenzát. Systém slouží pro znovuzaplavení (i částečně degradované) AZ po odtlakování I.O a je navržen v souladu s požadavkem zajištění podkritičnosti AZ. [46]

Kapitola 3

Výpočetní kód MELCOR

Vývoj výpočetních kódů pro numerické simulace degradace AZ započal v USA v návaznosti na studie pravděpodobnostního hodnocení rizik v rámci reportu WASH-1400 [47] US NRC v roce 1974. Tento vývoj byl urychlen havárií na 2. bloku americké elektrárny Three Mile Island v roce 1979. V 80. letech 20. století započaly vyvíjet své vlastní kódy a pravděpodobnostní hodnocení i Japonsko a země v Evropě. Postupně se tyto kódy začaly využívat k vývoji metod prevence tavení AZ, snížení následků TH a tréninku operátorů. [16]

Výpočetní kódy TH lze rozdělit v závislosti na jejich zaměření na kódy dedikované, mechanistické a integrální. Dedikované kódy jsou zaměřené na jeden konkrétní fenomén, jako příklad lze uvést skupinu kódů CFD (computational fluid dynamics, numerická dynamika tekutin), které řeší Navier-Stokesovy termohydraulické rovnice. Mechanistické kódy používají modely nejlepšího odhadu (best-estimate) daného fenoménu s numerickým řešením integro-diferenciálních rovnic pro co nejvíce přesnou simulaci chování vybrané části JE. Integrální kódy oproti tomu využívají i různých korelací a zpravidla simulují kompletní fungování všech částí JE, které mají vliv na průběh TH (s výjimkou některých příliš složitých/komplexních, a tudíž těmito kódy nepostihnutelných jevů). Je možné simulovat celý scénář TH od IU, přes degradaci AZ, únik ŠP, kontaminaci I.O a II.O až po případné selhání KTMT, včetně zásahů operátorů a činnosti inženýrských bezpečnostních systémů. Jejich použití je nejčastěji za účelem získání dostatečně přesného odhadu sledu a časování jednotlivých událostí během TH a získání představy o následcích pro elektrárnu a její okolí. Dále je užíváno těchto simulací pro získání zdrojového členu pro PSA 2. a 3. úrovně. To, co obecně integrální kódy nemodelují, jsou parní exploze, detonace vodíku a strukturní mechanika KTMT. [16, 19]

MELCOR (Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases) je integrální kód používající sdružené parametry (lumped parameters, LP) vyvíjený v Sandia National Laboratories (SNL) ve spolupráci s US NRC od roku 1982. V roce 1986 byl vydán v USA a brzy nahradil všechny ostatní kódy používané US NRC v té době, následně byl roku 1989 vydán mezinárodně. Na vývoji kódu se podílí mnoho mezinárodních týmů v rámci Kooperativního programu výzkumu těžkých havárií (Cooperative Severe Accident Research Program, CSARP). MELCOR je používán více jak 900 licencovanými uživateli z přibližně 100 institucí až v 25 různých zemích převážně z Ameriky, Evropy a Asie. Kód byl primárně vyvinut pro reaktory typu PWR a BWR, ale novější verze kódu byly uplatněny i na reaktory typu CANDU [48] či GFR [49]. Využití kódu se našlo i při jiných než reaktorových havarijních scénářích (bazén vyhořelého paliva, bezpečnostní analýzy úniku ŠP z budov). Od počátku vývoje vyšlo mnoho verzí kódu, přičemž současná verze 2.2, kterou byly provedeny výpočty pro tuto práci, je psána v jazyce FORTRAN 95. [19, 50]

3.1 Struktura a vlastnosti kódu

Důležitou součástí vývoje kódu je validace na experimentálních datech. Přehled významných programů pro validační testy je uveden v Tab. 3.1. Experimenty lze rozdělit na 3 kategorie: testy separátních efektů zaměřených na konkrétní jev, testy spojených efektů zaměřených na interakce dvou a více jevů a integrální experimenty reprezentující části nebo celý scénář TH. Probíhá mnoho mezinárodních programů validujících jednotlivé fyzikální modely kódu, avšak některé procesy, jako například rozsáhlá degradace AZ spojená s její relokací až po napadání stěny TNR, jsou natolik málo prozkoumané, že chybí dostatek experimentálních dat. V takových případech je třeba užít získaných informací z dat reálných již proběhlých TH jako je havárie v elektrárně Three Mile Island nebo Fukushima [51] či srovnat výsledky vůči lépe specializovanému kódu. [19, 52]

Integrální kód ASTEC [53] a stejně tak i MELCOR simulují velké množství jevů v oddělených nódech prostorové diskretizace úlohy, jež se nazývají v případě kódu MELCOR kontrolní objemy (control volume, CV). Použitím sdružených parametrů se všechny počítané veličiny (např. teplota, tlak, hmotnost ŠP) průměrují v jednotlivých nódech, které, v případě kódu MELCOR, odpovídají právě CV a spojkám (*flow path*) mezi nimi doplněné o tepelné struktury (*heat structure*). Rovnice zachování hmoty a energie doplněné o rovnici zachování hybnosti se počítají v každém nódu zvlášť. Jde tedy o systém nazývaný „5+1“, kdy rovnice kontinuity je řešena pro kapalnou a plynnou fázi (pára + nekondenzovatelné plyny), rovnice energetická opět pro obě fáze tekutiny (tj. je simulována termodynamická nerovnováha mezi ka-

palinou a plyny) a rovnice zachování hybnosti je společná pro obě fáze s doplněním o míru „strhávání“ mezi oběma fázemi (tzv. *phase slip correlation*). Prostory KTMT a systém chlazení reaktoru mohou být reprezentované libovolným počtem CV, většinou však v rozmezí 10 až 50 CV. V případě AZ se používá podrobnější nodalizace rozdělení na 4 až 6 radiálních prstenců a 10 až 20 axiálních úrovní kontrolních objemů CV; pro diskretizaci pevných struktur AZ se používá ještě jiná axisymetrická (v r-z geometrii) síť, tzv. „buňky“ modulu COR (podrobněji popsáno dále). [19]

Tab. 3.1: Přehled hlavních experimentů/událostí použitých pro validaci kódu MELCOR autorskou organizací SNL. [52, 54]

Fyzikální proces	Název programu	Organizace (stát)
Integrální	Phebus FPT1 & FTP3	IRSN (Francie)
	havárie TMI-2 a Fukushima	–
Degradace AZ	CORA-13	KIT (Německo)
	QUENCH 11	KIT (Německo)
	LOFT-FP2	INEL (USA)
Termohydraulika I.O	BETHSY	CEA (Francie)
Produkce ŠP	VERCORS	CEA (Francie)
	ORNL VI	ORNL (Kanada)
Transport ŠP v I.O a KTMT	FALCON 1&2	AEAT (UK)
	LACE LA1&LA3	INEL (USA)
Selhání TNR	LHF OLHF	SNL (USA)
Interakce koria s betonem	OECD-MCCI	ANL (USA)
Termohydraulika KTMT	NUPEC M-7-1	NUPEC (Japonsko)
Vznícení vodíku v KTMT	HDR E-11, V44	Battelle (Německo)

V případě kódu používající přístup LP je přesnost výsledků závislá na jemnosti nodalizace a jejím zvolení. S příliš jemnou nodalizací se však prodlužuje výpočetní čas, jehož relativní krátkost je výhodou právě těchto kódů. Většina modelů je v LP kódech parametrických a potřeba nodalizace se u každé úlohy liší, je tedy na zkušenostech daného uživatele zvolit vhodné nodalizační schéma a hodnoty parametrů při přípravě modelu. [55]

3.2 Rozbor a popis výpočetních modulů

Kód MELCOR je složen z tzv. modulů, které jsou při výpočtu určitého scénáře TH zodpovědné za různé fyzikální procesy v rámci rozvoje simulované TH. Tedy téměř každý modul počítá úzkou část fyzikálního chování určité části JE. Těchto modulů je v MELCORu více jak 20 a v případě výskytu několika různých fyzikálních jevů najednou, jsou tyto moduly vzájemně úzce propojeny. Naopak, pokud je nějaký děj izolovaný nebo nastává až v určité fázi výpočtu, dochází k jeho aktivaci až v čase, kdy kód vyhodnotí, že by k danému jevu došlo. [23]

Všechny moduly jsou popsány z hlediska syntaxe vstupních dat, fungování a výčtu proměnných v uživatelském manuálu [23] vydaném SNL. Fyzikální pozadí zvolených modelů pro jednotlivé děje je popsáno v referenčním manuálu [56]. Každý modul obsahuje své vlastní vstupní parametry a citlivostní koeficienty⁷. Některé vstupy jsou povinné vždy, jiné pouze pro aktivaci modelu, který je vyžaduje. Pomocí citlivostních koeficientů lze upravit fyzikální modely a upravovat a přecházet mezi použitými modely a korelacemi pro zohlednění nových poznatků. Následuje výčet a popis určitých modulů obsažených v integrálním kódu MELCOR [55, 23, 56]:

EXEC Modul EXEC (Executive) je zodpovědný za celkovou kontrolu a chod ostatních modulů. V modulu EXEC se upravují parametry výpočtu, jako jsou časy začátku a konce výpočtu, minima a maxima časového kroku nebo interval zapisování do restartovacího souboru a další parametry, které nesouvisí s fyzikálním problémem, ale výpočtem jako celkem. Kromě řízení výpočtu volá a provazuje jednotlivé moduly tak, aby si předaly mezivýsledky a informace na konci každého časového kroku.

ACC Modul ACC (Accumulator) reprezentuje pro uživatele zjednodušenou formu vstupu pro vytvoření inženýrského bezpečnostního systému optimalizovaného pro numerické výpočty. Uživatel může alternativně namodelovat hydroakumulátory pomocí modulů CVH, FL a případně HS.

BUR Modul BUR (Burn) modeluje vznícení a hoření plynů např. vodíku v kontrolních objemech. Modul počítá zjednodušený model v globálním měřítku se zanedbáním kinetiky oxidace.

CAV Modul CAV (Cavity) během výpočtu simuluje ablaci betonu vypuzenou taveninou z TNR. Výpočet je prováděn v 2D geometrii r - z (ze symetrie počítané

⁷Tzv. „citlivostní koeficienty“ slouží k parametrické úpravě implementovaných fyzikálních modelů či k jemnému přizpůsobení některých nastavení kódu. Obecně lze říci, že citlivostní koeficienty umožňují větší flexibilitu při modelování určitých jevů, ovšem za předpokladu, že uživatel dobře zná fyzikální pozadí daného simulovaného jevu.

úlohy brány jako souřadnice pozice na úrovni svislé osy a vzdálenost od středové osy; odtavená „kavita“ tak může mít libovolný tvar). Vrstvení taveniny se uvažuje až do 5 možných vrstev: HOX – těžká oxidická, LOX – lehká oxidická, HMX – těžká smíšená, LMX – lehká smíšená, MET – metalická. CAV počítá i tepelné ztráty z povrchu taveniny a produkci plynů (H_2 , H_2O , CO a CO_2), nepočítá však vedení tepla do betonu (veškeré teplo je spotřebováno na ablaci betonu). Tím dochází k nadhodnocování ablace a ke zkreslení výsledků.

CND Modul CND (Condenser) modeluje pasivní systémy potlačení tlaku v KTMT, který se vyskytuje převážně u varných reaktorů BWR. Jedná se o systémy ICS (isolation condenser system) a PCCS (passive containment cooling system), které využívají tepelné výměníky ponořené do bazénu s vodou.

CF Modul CF (Control Function) umožňuje uživateli definovat tzv. *kontrolní funkci* složenou i z více jednoduchých matematických a logických operací dostupných v jazyku FORTRAN. Výsledky těchto funkcí jsou během výpočtu dostupné a umožňují řídit běh výpočtu nebo vytvářet uživatelské modely. Argumenty mohou být jak konstanty, tak některé kódem počítané veličiny.

COR Modul COR (Core) je jeden z nejobsáhlejších a nejdůležitějších modulů kódu. Je zodpovědný za procesy v degradující AZ – nikoliv však termohydraulické, ale za procesy termo-mechanické degradace, jako je porušení integrity komponent, tvorba trosek a bazénů taveniny, relokace části AZ do dolní směšovací komory, selhání dna TNR a vypuzení taveniny do prostoru KTMT. Dále modul přepočítává transporty energie mezi kontrolními objemy modelujícími termohydraulické procesy v AZ a mezi pevnými strukturami AZ vnitroreaktorovými vestavbami, včetně stěny TNR. Degradace AZ je považována v kódu MELCOR za osově symetrickou v r - z geometrii (2D). Probíhající jevy jsou počítány a výsledné hodnoty průměrovány dle nodalizace v jednotlivých buňkách modulu COR. Tyto buňky tvoří ortogonální síť s osou TNR/AZ nacházející se na okraji vytvořené sítě buněk. Buňky v jedné výšce se nazývají axiální úrovně a buňky v jedné vzdálenosti od osy TNR se nazývají radiální prstence. Potřebná jemnost nodalizační sítě TNR závisí na modelované úloze, ale v případě reaktoru VVER-1000 je uvažováno rozdělení na 4–7 radiálních prstenců a 20–30 axiálních úrovní, což dohromady tvoří síť přibližně 150 buněk COR.

V každé buňce jsou modelovány tzv. *komponenty*, kterými lze reprezentovat části či prvky PS a dalších vnitřních vestaveb reaktoru. Modul používá princip sdružených parametrů, kdy každá komponenta v každé buňce má jednu určitou teplotu, jednu plochu, jednu hmotnost, jeden stav (nepoškozená, zhroutilá,

roztavená) apod. Těchto komponent je v současné verzi kódu 14 a jejich výčet je následující:

FU (fuel) Palivo.

CL (cladding) Pokrytí.

CN (canister not adjacent to control blades) Obálka palivových kazet reaktoru typu BWR nesousedící s regulační tyčí.

CB (canister adjacent to control blades) Obálka palivových kazet reaktoru typu BWR sousedící s regulační tyčí.

SH (shroud) Plášť AZ.

FM (former) Výztuha mezi pláštěm AZ a šachtou reaktoru.

PD (particulate debris) Trosky v kanále AZ.

PB (particulate debris in bypass) Trosky v obtoku kanálu AZ.

SS (supporting structure) Podpůrná struktura.

NS (non-supporting structure) Nepodpůrná struktura.

MB2 (metallic molten pool in bypass) Kovový bazén taveniny v obtoku kanálu AZ.⁸

MP1 (oxidic molten pool in channel) Oxidický bazén taveniny v kanále AZ.⁹

MP2 (metallic molten pool in channel) Kovový bazén taveniny v kanále AZ.

Komponenta CL modeluje pokrytí palivových proutků (do komponenty CL mohou být případně zahrnuty i jiné konstrukční prvky PS zejména distanční mřížky či úhelníky); komponenty PD a PB modelují trosky (tzn. určitou „zhroucenou“ komponentu, jež ztratila svoji původní geometrii; kód MELCOR jí automaticky přiřadí určitou porozitu a hydraulický průměr, definující její fragmentaci) v kanálu pro případ PD a v obtoku pro PB; komponenty SS a NS modelují všechny struktury, které mají schopnost podpírat ostatní struktury (např. opěrná deska AZ, či distanční mřížky), respektive nemají (např. regulační tyče), ale nepatří do jedné z předdefinovaných komponent. Na rozdíl od komponent modelujících části neporušené AZ, které musí být podrobně popsány ve vstupu na začátku výpočtu, komponenty modelující trosky a taveniny vznikají během výpočtu automaticky v průběhu degradace AZ. Pro každou komponentu je třeba definovat určitý set parametrů, které kód využívá ve svých fyzikálních modelech. Mezi tyto parametry patří hmotnost, plocha

⁸Průtok v AZ, který neprochází skrze PS a neodvádí efektivně teplo od PP.

⁹Průtok v AZ, který obtéká PP a efektivně z nich odebírá štěpným či zbytkovým výkonem produkované teplo.

nezhroucené komponenty, hydraulický průměr, materiálové složení a další případné parametry závislé na typu dané komponenty. Tyto parametry se zpravidla zadávají pro každou buňku modulu COR, kde se komponenta vyskytuje. Kritériem pro zhroucení dané komponenty a její převedení na PD může být dosažení určité teploty, minimální tloušťky, ztráta podpory nebo selhání, pokud je daná komponenta vystavena vysoké teplotě (která je menší než teplota tavení materiálu dané komponenty) po dostatečně dlouhou dobu určenou pomocí Larson-Millerova parametru (tj. je modelováno selhání na tepelný creep). Komponenty mohou být složeny z různých materiálů. Mezi předdefinované materiály v kódu MELCOR patří:

UO/UO2/UO2-INT (uranium dioxide) Oxid uraničitý

ZR (zircaloy) Slitina zirkonia.

SS (stainless steel) Nerezová ocel.

ZX/ZRO2 (zircaloy dioxide) Oxid zirkonia.

SX/SOX (steel oxide) Oxid oceli.

CP/CRP (control rod poison) Absorbátor

B4C (karbid bóru) Materiál absorbátoru.

Každá komponenta může být tvořena jedním nebo i více materiály, u některých komponent je však výběr omezený.

CVH Modul CVH (Control Volume Hydrodynamics) je zodpovědný za výpočet termohydraulického stavu tekutin (voda, vodní pára a nekondenzovatelné plyny) v jednotlivých kontrolních objemech spojených případně spojek. Velikost a geometrie jednotlivých CV je určena na základě nodalizace TNR, I.O, II.O a KTMT, přičemž nodalizace TNR a především AZ do CV je hrubší, než rozdělení AZ do buněk COR. V místech překryvu buněk modulu COR a CV dochází k provázání obou modulů, hlavně v rámci přestupů směny tepla.

DCH Modul DCH (Decay Heat) počítá uvolňované zbytkové teplo ze štěpných produktů v AZ a v ostatních částech elektrárny, pokud jsou jejich nositeli aerosoly nebo páry ŠP (MELCOR svazuje transport zbytkového výkonu s transportem aerosolů a par ŠP v I.O, II.O a KTMT; samotnému transportu aerosolů a par ŠP se věnuje popis modulu RN).

EDF Modul EDF (External Data File) je společně s modulem EXEC část kódu, která neřeší fyzikální modely, ale má pomocnou funkci. Umožňuje načítat či ukládat data z externích souborů, která mohou být použita při výpočtu nebo dále zpracována při vyhodnocování kontrolních a tabulkových funkcí.

- FDI** Modul FDI (Fuel Dispersal Interactions) během výpočtu modeluje jak nízkotlaké, tak vysokotlaké vypuzení taveniny z TNR, při kterém může dojít k přímému ohřevu KTMT (fragmenty koría – tuhé či tekuté – vzniklé díky jeho vypuzení z porušené TNR směňují teplo s atmosférou v KTMT), možnost parní exploze z interakce taveniny a chladiva uvažována není.
- FL** Modul FL (Flow Path) modeluje pomocí tzv. spojek jednorozměrné proudění hmoty a energie mezi jednotlivými kontrolními objemy (CV). Spojky nemusí představovat pouze potrubí či geometricky nedefinované spojení mezi CV (např. sousedící masy vzdušiny ve volném objemu KTMT), ale i ventily, zpětné ventily, čerpadla, dmychadla, filtry, apod. Každou spojkou může protékat termodynamický materiál pouze jedním směrem. Výjimkou je proudění vody a atmosféry¹⁰, které je umožněno i protisměrně.
- HS** Modul HS (Heat Structure) modeluje jednorozměrné vedení tepla v rámci určité modelované pevné struktury a mezi termohydraulickým materiálem v určitém kontrolním objemu (voda, vodní pára, nekondenzovatelné plyny) a pevnou strukturou, jako jsou stěny TNR či I.O, teplosměnné trubky II.O nebo betonové stěny KTMT či kterékoli jiné pevné objekty. Tyto tepelné struktury mohou být tvaru cylindrického či tvaru kvádru.
- LHC** Modul LHC (Lower Head Containment) modeluje přenos energie mezi troskami a taveninou vypuzenou z TNR a případným lapačem taveniny společně s interagujícími materiály ze sousedících kontrolních objemů. Na rozdíl od modulu CAV tento modul umožňuje vést teplo mezi koríem a strukturálním materiálem modelovaného lapače taveniny.
- MP** Modul MP (Material Properties) umožňuje zadání fyzikálních parametrů materiálů, již existujících či uživatelem definovaných. U oceli je navíc možno měnit chemické složení.
- RN** Modul RN (RadioNuclide) počítá uvolňování, transport, usazování štěpných produktů a také jejich případné odstranění pomocí inženýrských bezpečnostních systémů. Modelována je fáze od jejich uvolnění z paliva, trosek či taveniny až po jejich transport v KTMT a případný únik do okolí. Okrajové podmínky pro různé modely jsou získány z ostatních modulů kódu MELCOR. Jednotlivé ŠP jsou v kódu z důvodu výpočtové náročnosti slučovány do tzv. *tříd ŠP* podle chemické podobnosti. V základní verzi kódu je těchto tříd 17 a jsou uvedeny v Tab. 3.2 (třídy č. 13 až 15 reprezentující bor, vodu a beton v tabulce uvedeny nejsou; nejedná se o ŠP, ale o neradioaktivní konstrukční materiály). Základní

¹⁰V kódu MELCOR je jako atmosféra brána vodní pára a nekondenzovatelné plyny.

třídy jsou označeny čísly 1 až 12, kombinované třídy vznikající sloučením radionuklidů ze základních tříd jsou označeny čísly 16 a 17.

Tab. 3.2: Rozdělení radionuklidů do jednotlivých tříd ŠP, upraveno z [23].

Č.	Název skupiny	Reprezentant	Výčet prvků
1	Vzácné plyny	Xe	He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn, H, N
2	Alkalické kovy	Cs	Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Cu
3	Kovy alkalických zemin	Ba	Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Es, Fm
4	Halogeny	I ₂	F, Cl, Br, I, At
5	Chalkogeny	Te	O, S, Se, Te, Po
6	Platinoidy	Ru	Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ni
7	Prvky časného rozpadu	Mo	V, Cr, Fe, Co, Mn, Nb, Mo, Tc, Ta, W
8	Čtyřmocné	Ce	Ti, Zr, Hf, Ce, Th, Pa, Np, Pu, C
9	Třímocné	La	Al, Sc, Y, La, Ac, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Am, Cm, Bk, Cf
10	Uran	U	–
11	Více těkavé	Cd	Cd, Hg, Zn, As, Sb, Pb, Tl, Bi
12	Méně těkavé	Sn	Ga, Ge, In, Sn, Ag
16	Jodid cesný	CsI	–
17	Molybdenan cesný	Cs ₂ MoO ₄	–

NCG Modul NCG (Noncondensable Gas) počítá chování tzv. nekondenzovatelných plynů v kontrolních objemech, které jsou modelovány jako ideální plyny s objemovou a tepelnou kapacitou stanovenou pomocí tabulkových funkcí. Jednotlivé materiály vyskytující se v kontrolních objemech jsou indexovány následovně: číslo 1 má voda, číslo 2 mlha a číslo 3 vodní pára. Vyšší čísla jsou přiřazena nekondenzovatelným plynům jakými jsou zejména: vodík – H₂ (vzniká především při oxidaci kovových materiálů nacházejících se v AZ, ale také při oxidaci B₄C či při procesu MCCI), kyslík – O₂, hořlavý oxid uhelnatý – CO (vznikající při oxidaci B₄C obsaženého v absorpčních tyčích) dále oxid uhlíčitý – CO₂, dusík – N₂, metan – CH₄, helium – He, argon – Ar a deuterium – D₂.

SPR Modul SPR (Containment Sprays) modeluje přenos hmoty a tepla mezi kapičkami sprchového systému KTMT a atmosférou.

TP Modul TP (Transfer Process) je zodpovědný za přenos hmoty a entalpie mezi určitými moduly. V každém z nich může docházet ke změně označení, a proto

je třeba užití TP modulu, jenž zajistí správnou interpretaci při přenosu hmot a entalpií na rozhraní určitých modulů (zejména COR a FDI či COR a CAV příp. FDI a CAV).

TF Modul TF (Tabular Function) obdobně jako modul CF umožňuje brát za argumenty konstanty nebo některé proměnné během výpočtu a vracet hodnotu způsobem definovaným uživatelem. Nepoužívá se však funkčního přepisu ale hodnoty přiřazené dle tabulky zadané uživatelem.

3.3 Architektura vstupních a výstupních dat

Výpočty v kódu MELCOR jsou rozděleny na dvě fáze: MELGEN a MELCOR. V první fázi pomocí programu MELGEN proběhne preprocessing dat ze vstupního textového souboru, během něhož proběhne kontrola syntaxe, matematické logiky a shody (korespondující indexování, výškové úrovně, propojenost komponent atd.). V tomto souboru uživatel zadává nodalizaci kontrolních objemů, buněk modulu COR, definuje komponenty AZ nebo zadává nastavení fyzikálních modelů; de facto tento vstupní soubor obsahuje kompletní zadání úlohy pro následný výpočet – postup v čase na základě definované IU. Příklad definice vlastností uživatelem ve vstupním souboru již dříve definovaných komponent typu NS (z modulu COR) je uveden na Obr. 3.1. Argument po úvodním příkazu sděluje kódu délku definiční tabulky. Řádky začínající znakem ! jsou tzv. *komentáře* a kód tyto řádky nenačítá. V definiční tabulce se nejprve udává index řádku, následuje interval axiálních úrovní a posléze radiálních prstenců, kde bude daná komponenta zadefinována. Klíčové slovo 'FIXED', resp. 'ZIRC', určuje podmínku pro selhání v případě zhroucení jiné komponenty, která jí byla oporou, resp. materiál, ze kterého je komponenta složena. Hodnoty ve sloupcích *TNSMAX*, resp. *DRNSMN*, udávají maximální dovolenou teplotu komponenty, resp. minimální tloušťku nezoxidovaného materiálu použitého pro tuto komponentu. Pokud je těchto hodnot dosaženo, nebo pokud komponenta ztratí podporu, dojde k přeměně komponenty NS na trosky (PD). [23, 56]

```
COR_NS          2
! NSTR  IA  IR  INSSUP  METAL  TNSMAX  DRNSMN
  1    20-35  1-5  'FIXED'  'ZIRC'  1500.0  0.0
  2    20-35   6  'FIXED'  'ZIRC'  2030.0  0.0001
```

Obr. 3.1: Příklad vstupních dat pro modul COR v kódu MELCOR.

Na Obr. 3.2 je zobrazeno zadefinování kontrolního objemu (CV) v modulu CVH reprezentující horní směšovací komoru reaktoru. Na prvním řádku, který není komentář, je určen název a identifikační číslo pro pozdější referenci v kódu. Následuje zařazení do určitého typu CV, což je důležité pro pozdější vyhodnocení radionuklidových výsledků. Definice pokračuje nastavením termohydraulických modelů a počátečních podmínek pomocí klíčových slov s parametry.

NONEQUIL Pomocí tohoto parametru je zajištěn výpočet termodynamické nerovnováhy mezi kapalinou a plynem.

FOG Umožňuje přítomnost kapiček vody (mlhy) v atmosféře.

ACTIVE Tento výraz nastavuje způsob výpočtu parametrů uvnitř určitého CV. Užitím výrazu *ACTIVE* se použije obvyklý způsob výpočtu z rovnic zachování. Další možností je časová nezávislost parametrů nebo užití tabulkové funkce pro popis parametrů daného CV v čase.

PVOL Za tímto klíčovým slovem následuje hodnota počátečního tlaku v daném CV.

ZPOL Klíčové slovo, po kterém je zadána počáteční výška hladiny kapaliny v definovaném CV.

Na řádku počínající výrazem *CV PAD* zadává uživatel počáteční teplotu vody. Posledním příkazem se zadává popis tvaru pomocí objemu a výškové souřadnice *z*.

```

CV_ID          'CVH_040'      40
!             icvtyp
CV_TYP        'RPV'
CV_THR        NONEQUIL      FOG          ACTIVE
!             ptdit          pvol
CV_PTD        PVOL          1.555361E7
!             tpol
CV_PAD        596.2627
!             bndid          zpol
CV_BND        ZPOL          10.107
CV_VAT        4 !n          cvz          cvvol
              1            6.275          0.0
              2            6.545          1.532023
              3            8.427          17.837642
              4            10.107         37.942091

```

Obr. 3.2: Příklad vstupních dat pro modul CVH v kódu MELCOR.

Pokud kontrola vstupu proběhne v pořádku, je vytvořen binární restartovací soubor obsahující počáteční podmínky výpočtu. V druhé fázi MELCOR vyžaduje jen tento restartovací soubor a vstup s minimem vstupních parametrů. Tento soubor však musí obsahovat zejména délky časových kroků, intervaly zápisu do restartovacího souboru, čas pro začátek a konec simulace a parametry pro prováděcí modul EXEC (executive). V tomto druhém vstupním souboru je možná náhrada některých parametrů vstupních dat zadaných uživatelem v prvním, kompletním vstupním souboru s celkovou definicí úlohy (tj. pro část MELGEN). Spuštěním souboru se vytvoří několik výstupních souborů, do kterých program během výpočtu zapisuje: soubor zpráv a oznámení z jednotlivých modulů (.MES); výstupní textový soubor (.OUT), který obsahuje veškeré textové zprávy ode všech modulů, jako např. informace o změnách časových kroků a hlášení o chybách; diagnostický soubor (.DIA) zobrazující chyby vstupu a výstrahy při výpočtu; binární soubor uložených proměnných (.PTF), který se používá k grafickému zpracování výstupních dat. [23, 56]

Během výpočtu je uživateli umožněno přejít do interaktivního módu, kdy je schopen měnit délky časových kroků, přikázat zápis restartu nebo pozdržet či ukončit simulaci. V případě restartu se program MELCOR opět spustí vstupním souborem definovaným pro část programu MELCOR, ve kterém mohou být upraveny některé parametry a zvolen čas v simulaci pro restart. Od určitého bodu je tedy možno ve výpočtu provádět citlivostní studii se změnou některých parametrů (MELCOR umožňuje při restartu výpočtu měnit všechny citlivostní koeficienty, ovšem jen vybrané ostatní parametry definující nastavení jednotlivých fyzikálních modelů a geometrického uspořádání vstupního modelu). [23]

Kapitola 4

Citlivostní studie výpočtu scénáře těžké havárie

4.1 Popis zvolených scénářů SBO a LOCA¹¹

Pro účely citlivostní studie byl zvolen scénář iniciovaný úplnou ztrátou vnějších i vnitřních zdrojů střídavého elektrického napájení (scénář SBO) a scénář s tzv. *gilotinovým* prasknutím potrubí I.O (scénář LOCA), při kterém dochází k maximálnímu úniku chladiva z I.O. Konzervativně se z hlediska rychlosti ztráty chladiva uvažuje prasknutí potrubí s výtokem z obou konců potrubí, ke kterému dochází mezi HCČ a reaktorem na studené větvi 4. cirkulační smyčky, na kterou je připojen i KO.

Pro oba dva scénáře jsou považovány za nefunkční následující aktivní systémy:

- všechny tři divize *sprchového systému ochranné obálky*,
- všechny tři divize *NT systému havarijního dochlazování I.O*,
- všechny tři divize *systému havarijního VT doplňování*,
- všechny tři divize *systému havarijního VT vstřikování*
- a provozní a havarijní napájení PG.

Funkční však zůstávají následující pasivní systémy:

- všechny 4 hydroakumulátory pro scénář SBO a pouze 2/4 pro scénář LOCA,¹²
- odlehčovací a pojistné ventily KO včetně systému odtlakování I.O,
- přepouštěcí stanice do atmosféry
- a pojistné ventily PG.

¹¹Pro vhodné zvolení okrajových podmínek scénářů bylo využito technické zprávy ÚJV Řež, a. s. [57].

¹²Ve scénáři LOCA se uvažuje poškození I.O z důvodu IU, a tím pádem i přírodních tras z hydroakumulátorů do I.O.

V rámci provedení opatření dle návodů na zvládnání TH (severe accident management guidelines, SAMG) dochází při scénáři LOCA k využití *diverzního systému doplňování odtlakovaného I.O*, který zaplavuje AZ roztokem kyseliny borité po postulované době 12 hodin. Účelem je mj. odvádět generované teplo mimo AZ a zabránit nebo oddálit poškození TNR. Obdobně na základě SAMG při scénáři SBO dochází k odtlakování I.O přes odlehčovací ventil KO za účelem zabránění VT vypuzení taveniny – DCH, zabránění creepovému poškození trubiček v PG a umožnění případného doplňování I.O pomocí NT zdrojů. Signálem pro přechod z havarijních předpisů pro zvládnání DBA k SAMG je zaznamenání limitní teploty na výstupu z AZ 650 °C. Prodleva (iniciace systémů, zaplavení tras apod.) na přechod k SAMG je v scénářích brána jako 180 vteřin. Oba scénáře byly počítány od hodiny před IU až do okamžiku selhání dna TNR.

4.2 Specifikace studovaných parametrů

Výpočetní kód MELCOR nabízí širokou škálu parametrů, kterými lze upravit fyzikální modely výpočtu nebo charakteristiky JE, mezi které lze řadit i užitá opatření a zásahy operátorů během rozvoje TH. Nastavení fyzikálních modelů v kódu MELCOR lze ve většině případů provádět změnou výchozích citlivostních koeficientů (SC). Motivací studie bylo variovat pouze potenciálně významné parametry, které jsou známé s nějakou neurčitostí nebo které lze ovlivnit či nějakým způsobem volit (např. limitní hodnota vybraných parametrů pro iniciaci havarijních systémů).

Jako první byla zvolena limitní hodnota na výstupu z AZ pro přechod z předpisů pro zvládnání projektových havárií do SAMG – T_{AZ} , která je dle předpisů stanovena na 650 °C. Variováním této hodnoty lze studovat vliv dřívějšího zavedení opatření dle SAMG (*systém diverzního doplňování odtlakovaného I.O* pro scénář LOCA a odtlakování I.O pro scénář SBO). Provozní teplota I.O se pohybuje okolo 300 °C a nebezpečí creepu oceli začíná přibližně od 450 °C, tudíž byla dolní hranice intervalu, ve kterém bude parametr zkoumán, stanovena na 500 °C a horní na 650 °C dle přechodu do SAMG. Dalším parametrem byla zvolena teplota, při které v kódu MELCOR selhává opěrná deska AZ – T_{SS} . Ta je modelována pomocí uživatelem zadefinované komponenty SS z oceli, pro kterou není počítáno v kódu tlakové zatížení. Komponenta může v kódu selhat ztrátou podpory (tj. selháním komponenty pod ní), nebo dosažením limitní teploty. Pro studii vlivu tohoto zatížení a možného dřívějšího selhání byla tato limitní teplota variována v intervalu 1400-1600 K.

Ve výchozích nastavení SC je v kódu MELCOR uvažováno maximální zoxidování B₄C ze 2 %, avšak dle závěrečné zprávy z experimentu Phébus FPT3 [22], zaměře-

ného na lepší porozumění jevů během degradace AZ, může zoxidování být až ze 70 až 80 %. Pro zkoumání vlivu větší dovolené míry oxidace B_4C na výslednou celkovou oxidaci byl tento parametr – SC_{B_4C} variován od výchozích 2 % až do 50 %. Posledním zvoleným parametrem byl součinitel místních ztrát – ξ na zastaveném HCČ, tudíž v režimu přirozené cirkulace, který reprezentuje charakteristiku samotné JE. Tento součinitel odpovídá místní tlakové ztrátě proudícího média během průchodu potrubím nebo komponentou a nebylo ho možné v případě JE Temelín dohledat. Výchozí hodnota v kódu MELCOR pro spojku mezi CV je $\xi_0 = 1,0$. Pro zjištění, jestli má tento parametr nějaký významný vliv na rozvoj a průběh TH, byl parametr variován mezi hodnotami 0,1-3,6.

Z tohoto důvodu byly pro variování v studii zvoleny následující parametry:

- teplota na výstupu z AZ, při které je zahájen přechod do SAMG – t_{AZ} , v intervalu 500-650 °C,
- teplota, při které selže opěrná deska AZ – T_{SS} , v intervalu 1400-1600 K,
- maximální dovolená míra zoxidování B_4C – SC_{B_4C} v intervalu 2-50 %
- a součinitel místních ztrát na HCČ – ξ v intervalu 0,1-3,6.

Při analýze výsledků sekvence TH lze sledovat a porovnávat velké množství veličin. Stěžejními parametry, na které by mohly mít variované parametry vliv a které byly sledovány v rámci studie, jsou následující:¹³

- celková hmotnost vyprodukovaného vodíku – m_{H_2} ,
- celková hmotnost taveniny na dně TNR – m_{tav} ,
- celková hmotnost ŠP uniklých z paliva – $m_{\xi P}$
- a čas selhání dna TNR – τ_{fail} .

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.4, oxidace materiálů v AZ je důležitým jevem při rozvoji TH, který má za následek generování tepla a produkci vodíku. Generované teplo z oxidace může v určitých fázích TH přesáhnout i zbytkový výkon z rozpadu ŠP a produkce vodíku vede k nebezpečí jeho exploze, což ohrožuje integritu KTMT. Hmotnost vyprodukovaného vodíku – m_{H_2} je přímo ovlivněna maximální dovolenou mírou oxidace B_4C , Zr a dalších kovů. Kromě možné větší celkové vyprodukované hmotnosti m_{H_2} má větší maximální dovolená míra zoxidování vliv i na průběh oxidace a generování tepla. Při postupné degradaci AZ může oxidovat

¹³Analyzovány jsou celkové hmotnosti H_2 , taveniny a ŠP v momentě selhání dna TNR.

více komponent současně a jejich počet může vzrůst, pokud bude dovoleno komponentám oxidovat déle, což povede k akumulaci generovaného tepla v daný okamžik.

S rostoucí hmotností na dně usazeného koria, složeného z pohledu kódu MELCOR z pevných trosk a taveniny, roste zatížení na spodní část TNR. Větší hmotnost taveniny m_{tav} vede k většímu přenosu tepelného výkonu pomocí konvekce a přispívá k odtavování stěny, a tím pádem k selhání dna TNR. V momentě selhání TNR dochází k vypuzení taveniny, což může vést k DCH, které ohrožuje integritu KTMT.

Hmotnost uniklých ŠP z paliva – $m_{\xi P}$ je důležitá v pozdější fázi TH pro určení zdrojového členu v případě analýz PSA 2. úrovně pro únik do okolí JZ a je ovlivněna rychlostí a průběhem degradace AZ. Nakonec čas selhání dna TNR – τ_{fail} určuje konec in-vessel fáze a jeho oddálení je důležité pro možnost zavedení příslušných havarijních a ochranných opatření.

4.3 Koncepce metodiky

Pro variování zvolených parametrů bylo využito programu DAKOTA. Jedná se o volně přístupný program napsaný v C++, vyvíjený v SNL stejně jako kód MELCOR. Program obsahuje sadu nástrojů pro citlivostní analýzu, optimalizaci nebo analýzu neurčitosti. DAKOTA poskytuje celou řadu metod pro vzorkování veličin a následné statistické zpracování. S užitím uživatelského manuálu [58], ze kterého bylo čerpáno i při popisu užitých metod, byla pro citlivostní studii této práce zvolena metoda ortogonálního pole (orthogonal array, OA) s kombinací vzorkování dle latinské hyperkrychle (latin hypercube sampling, LHS) z řad metod designu a analýzy počítačových simulací, které se často používají pro prozkoumání trendů v parametrickém prostoru experimentu nebo modelu s limitním počtem dat.

OA je často užívaná metoda pro spouštění výpočtů a systematické testování parametrů a jejich efektů. OA může být popsána uspořádanou čtveřicí (m,n,s,r) , kde m je počet bodů neboli spočtených experimentů; n je počet variovaných parametrů; s je počet symbolů (např. A, B a C) neboli různých úrovní – hodnot jednotlivých variovaných parametrů a r je tzv. síla pole, která odpovídá počtu garantovaných sloupců, kde budou přítomny všechny možné kombinace uspořádaných r -tic symbolů. Při nejčastěji používané hodnotě $r = 2$, čemuž tak je i v programu DAKOTA, jsou ve dvou sloupcích přítomny všechny možné uspořádané dvojice.¹⁴ Těchto uspořádaných dvojic úrovní v předpokladu nezávislých parametrů je mnohem méně než všech kombinací různých úrovní a variovaných parametrů. To bylo i motivací pro zvolení této metody při přípravě citlivostní studie, protože výpočty v integrálních

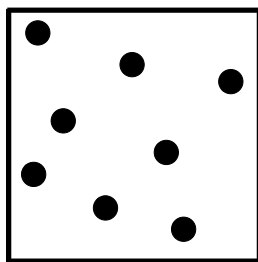
¹⁴např. (A,B), (B,A) a (C,C)

kódech mohou trvat v řádu dní až týdnů v závislosti na časovém kroku, délce simulace a nodalizaci. Jelikož byly pro citlivostní studii vybrány 4 parametry pro variování, byla zvolena OA (9,4,3,2), jejíž schéma lze vidět v Tab. 4.1.

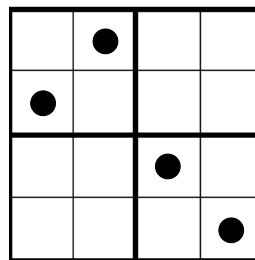
Tab. 4.1: Schéma použitého ortogonálního pole (9,4,3,2) o 4 parametrech s 3 různými úrovněmi (A, B a C) vyžadující 9 výpočtů.

ID výpočtu	Variovaný parametr			
	t_{AZ}	T_{SS}	SC_{B_4C}	ξ
1	A	A	A	A
2	A	B	B	B
3	A	C	C	C
4	B	A	B	C
5	B	B	C	A
6	B	C	A	B
7	C	A	C	B
8	C	B	A	C
9	C	C	B	A

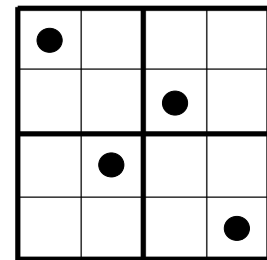
LHS je metoda pro kvazi-náhodné vzorkování z vícerozměrné distribuce pravděpodobnosti. Metoda provádí vzorkování umístěním bodu se znalostí umístění ostatních bodů tak, aby spolu nesdíleli žádné souřadnice. To zaručuje náhodnost výběru, ale současně i jisté rovnoměrné rozdělení v prostoru, čímž se dá předejít generaci více náhodných bodů poblíž sebe. Ve spojitosti LHS s OA je parametrický prostor rozdělen na stejně velké podprostory, v rámci nichž se provede LHS vzorkování se stejnou hustotou bodů v každém podprostoru. Tento princip ve 2-parametrickém prostoru (obdobný i pro užitý 4-parametrický prostor) je ukázán na Obr. 4.1.



(a) Náhodné rozdělení.



(b) LHS rozdělení.

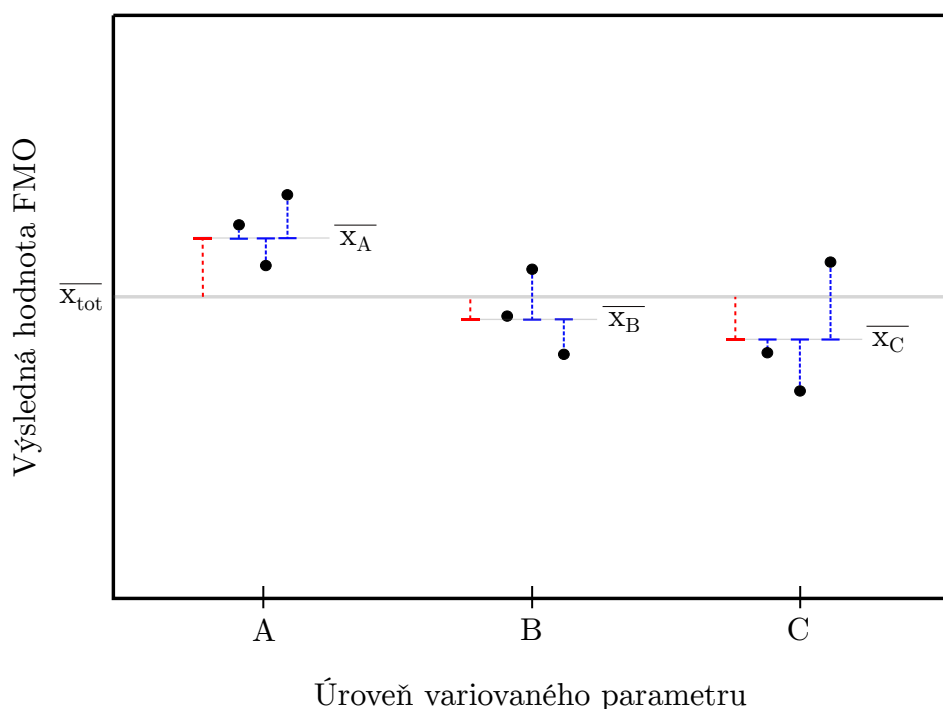


(c) Ortogonální LHS.

Obr. 4.1: Vizualizace náhodného (a), LHS (b), a ortogonálního LHS (c) rozdělení ve 2-parametrickém prostoru, upraveno z [59].

Použití metody OA umožňuje zjištění parametrů, které mají největší efekt na sledovaný parametr (figure of merit, FOM), na základě analýzy rozptylu (analysis of variance, ANOVA). V metodě ANOVA se studuje rozptyl sledovaného parametru uvnitř každé jednotlivé i vzájemně mezi skupinami výpočtů, kde byl variovaný parametr na dané úrovni (v případě užití OA (9,4,3,2) to jsou 3 úrovně – A, B a C odpovídající třem podintervalům a 3 výpočty v každém z podintervalů/úrovni). Pokud se průměry výsledků jednoho z FOM statisticky významně liší na různých úrovních variovaného parametru, tak to indikuje, že variovaný parametr má významný efekt na FOM. Ortogonálnost sloupců v OA zaručuje vyrušení vlivu ostatních proměnných pokud pozorujeme celkový vliv variovaného parametru v jednotlivých úrovních.

V případě statistického souboru hodnot FOM rozděleného do skupin dle úrovně variovaného parametru lze celkový rozptyl hodnot rozdělit na dvě složky. Variabilitu, která je vysvětlená vlastností dané skupiny (úroveň variovaného parametru), a variabilitu v jednotlivých skupinách, která tím vysvětlena není. Variabilita mezi skupinami se někdy označuje jako *signal* a variabilita v rámci skupiny tzv. *reziduální variabilita* se označuje jako *noise* (šum). Pro lepší přehled je na Obr. 4.2 ukázána vizualizace rozdělení variabilit na dvě dříve zmíněné složky v případě 3 skupin obsahujících 3 data, což je shodné s výsledky daného FOM po provedení výpočtů dle OA (9,4,3,2).



Obr. 4.2: Vizualizace složek variability v metodě ANOVA, kde vzdálenosti červeně reprezentují variabilitu meziskupinovou a modře reziduální variabilitu v rámci dané skupiny. Umístění průměrů skupin \bar{x}_i , kde $i = A, B, C$, celkového průměru \bar{x}_{tot} a pozic bodů je pouze orientační.

Hodnoty variabilit dostaneme podíly S_A/f_A a S_e/f_e , kde S je tzv. *součet čtverců* a f stupeň volnosti. Hodnota S_e se získá součtem rozptylů jednotlivých skupin a hodnota S_A se získá spočtením rozptylu mezi průměry skupin.

$$S_A = \sum_i \sum_j (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2, \text{ kde } i = A, B, C \text{ a } j = 1, 2, 3.$$

$$S_e = \sum_i (\bar{x}_i - \bar{x}_{tot})^2, \text{ kde } i = A, B, C.$$

Na základě tzv. *F-hodnoty*, vypočtené pomocí poměru složek variabilit, lze provést statistický *F-test* za předpokladu platnosti tzv. *nulové hypotézy*. V tomto případě je *nulovou hypotézou* rovnost středních hodnot daného FOM v jednotlivých skupinách, která bude testována oproti alternativní hypotéze, že aspoň některé střední hodnoty si rovny nejsou. Pokud je možno *nulovou hypotézou* zamítnout, tak to indikuje, že variabilita z výběru úrovně parametru je statisticky významně větší než *reziduální variabilita*, a tím pádem má variovaný parametr významný efekt na FOM.

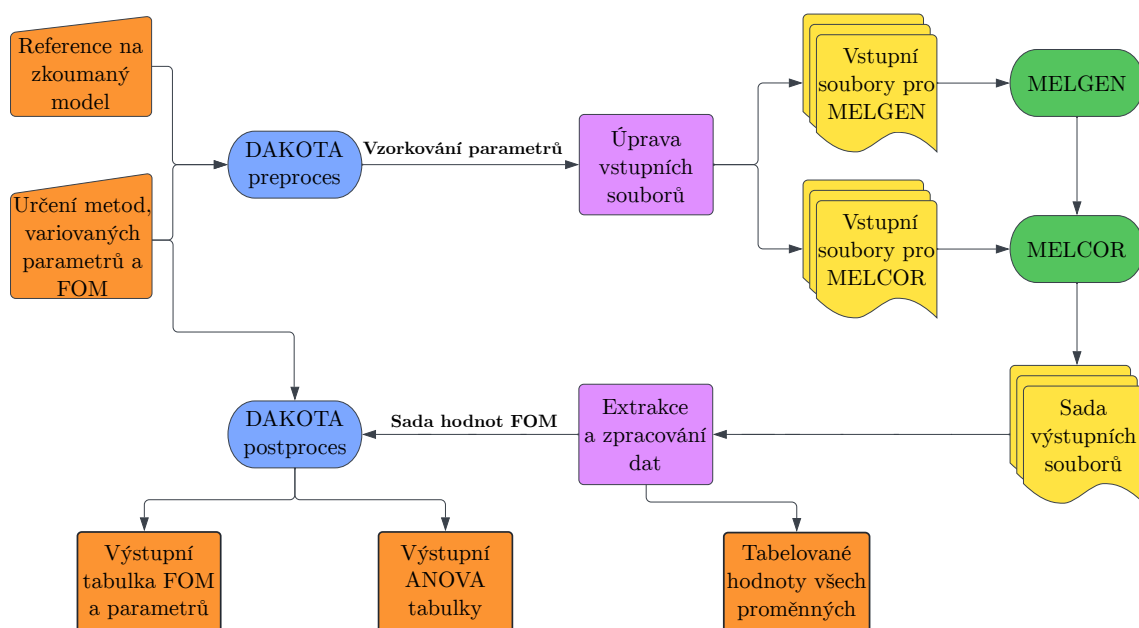
Pro možnost zamítnutí *nulové hypotézy* je třeba si nejdříve určit hladinu významnosti testu α , která se stejně jako ve většině citlivostních studií postulovala 0,05 a odpovídá ve statistice chybě I. druhu tj. pravděpodobnosti, že je *nulová hypotéza* pravdivá, ale byla zamítnuta. Vypočtené F-hodnotě odpovídá tzv. *p-hodnota*, která vychází z testovací kumulované F-distribuce a odpovídá pravděpodobnosti obdržení F-hodnoty stejné nebo větší v případě, že by byla *nulová hypotéza* pravdivá. Při znalosti poměru stupňů volnosti lze v tabulkách pro F-test dohledat buď F_{krit} pro danou hladinu α , nebo p-hodnotu pro vypočtenou F-hodnotu. Nulovou hypotézu tedy lze zamítnout pouze v případě, kdy $p \leq \alpha = 0,05$, nebo $F \geq F_{krit}(\alpha)$. Pokud tyto podmínky splněny nejsou, nelze potvrdit, že má daný variovaný parametr statisticky významný efekt na FOM, jelikož převládá reziduální variabilita. Toto vše lze v metodě ANOVA shrnout to výsledné tabulky, jejíž příklad lze vidět v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Ilustrativní příklad ANOVA tabulky, kde l je počet vzorků ve skupině o stejné úrovni parametru a n je celkový počet provedených výpočtů.

Zdroj variability	Součet čtverců		Počet stupňů		F-hodnota	p-hodnota
	S	volnosti f	S/f			
Skupiny	S_A	$f_A = l - 1$	S_A/f_A	$F = \frac{S_A/f_A}{S_e/f_e}$	$p(F) \stackrel{?}{\leq} \alpha$	
Reziduální	S_e	$f_e = n - l$	S_e/f_e	-	-	
Celkem	$S_T = S_A + S_e$	$f_T = n - 1$	-	-	-	

Nejprve je tedy pro provedení citlivostní studie, kdy na každý scénář bude pohlíženo separátně, třeba provést v kódu MELCOR zvlášť 9 výpočtů se scénářem SBO a zvlášť 9 výpočtů se scénářem LOCA. Tento relativně malý počet 9 výpočtů (oproti všem možným kombinacím 3 úrovní a 4 variovaných parametrů požadující 81 výpočtů) je možný díky užití metody OA pro provedení ANOVA. V případě studie daného scénáře DAKOTA na základě zvolené metody, parametrů a jejich intervalů vygeneruje pomocí OA a LHS 9 hodnot pro každý variovaný parametr, kdy celkový interval je rozdělen na 3 stejně velké podintervaly, které reprezentují úrovně A, B a C. V těchto úrovních jsou pak pomocí LHS vybrány vždy 3 hodnoty. Pomocí tzv. *couplingu* [60], jehož diagram je ukázán na Obr. 4.3 a který musel být pro tuto práci speciálně vytvořen, programu DAKOTA a kódu MELCOR je třeba změnit vstupní soubory a spustit výpočty.

Po dokončení všech výpočtů daného scénáře je potřeba opět pomocí částečného *couplingu* (tvořeného zvlášť napsanými skripty) z výstupních binárních souborů extrahovat a zpracovat výsledné hodnoty FOM v jednotlivých výpočtech a vrátit je programu DAKOTA. Program pak samostatně vygeneruje přehledové tabulky vstupu variovaných parametrů a výstupních hodnot FOM. Dále program na základě těchto hodnot vygeneruje i ANOVA tabulky pro všechny variované parametry a FOM (tedy v případě této studie 16 pro každý scénář). Pro zjištění, jestli některý z variovaných parametrů má statisticky významný vliv na kterýkoliv z FOM, stačí prohlédnout všechny vygenerované ANOVA tabulky a kontrolovat zda p-hodnota je menší než stanovená $\alpha = 0,05$ hladina významnosti testu.



Obr. 4.3: Diagram couplingu programu DAKOTA a kódu MELCOR.

4.4 Diskuze výsledků

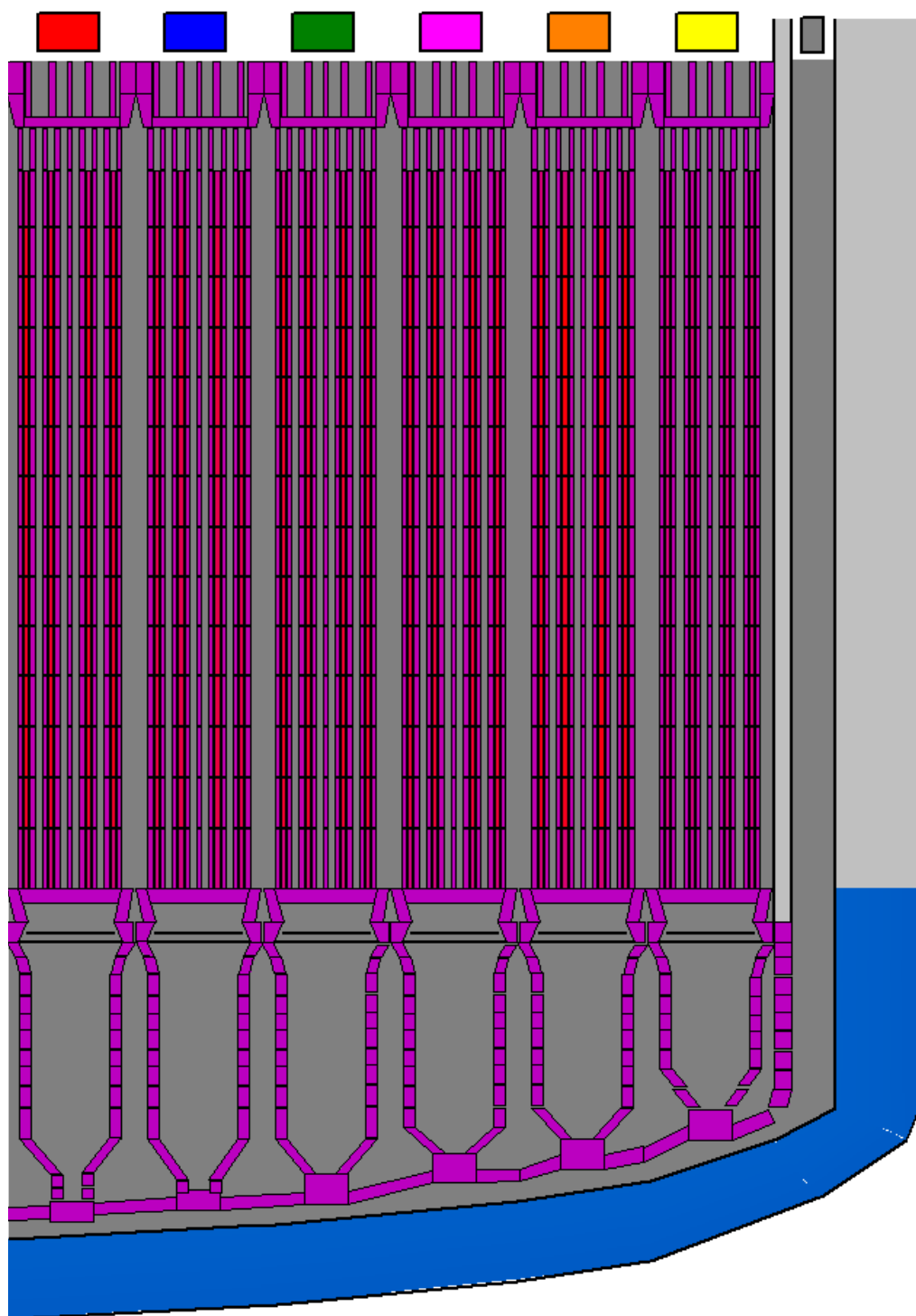
Pro vizuální post-procesing výsledků jednotlivých výpočtů byl mj. použit nástroj VINSAP [61]. Jedná se o nástroj umožňující z výstupního binárního souboru kódu MELCOR extrahovat hodnoty jednotlivých proměnných ve všech časových krocích. VINSAP umožňuje i spočtení a vykreslení doplňkových proměnných, které nejsou zdrojovými proměnnými vypočtenými samotným kódem MELCOR v průběhu výpočtu, ale lze je z nich vyjádřit. Následné hodnoty proměnných v čase lze spojit s grafickým objektem, který může změnou svého vzhledu reflektovat časový vývoj daného parametru. Příklad vizualizace AZ dle užití nodalizace (viz Obr. A.1) v kódu MELCOR lze vidět na Obr. 4.4. Ve skupině scénářů SBO, respektive LOCA, probíhají jednotlivé výpočty obdobně. Sled událostí je analogický, avšak výpočty se mezi sebou liší časováním jednotlivých charakteristických milníků v rozvoji havarijního scénáře a hodnotami některých veličin. Tento rozdíl je výraznější od počátku degradace dolní části AZ spjaté s pádem koria do zbytků vody na dně TNR.

4.4.1 Variace scénáře SBO

Po dokončení jednotlivých výpočtů tohoto scénáře byla po extrakci a následném zpracování vytvořena programem DAKOTA přehledová tabulka Tab. 4.3 shrnující hodnoty variovaných parametrů a výsledné hodnoty FOM. Na základě získaných hodnot FOM byly programem vygenerovány i ANOVA tabulky Tab. B.1–B.4.

Tab. 4.3: Výsledný přehled hodnot variovaných parametrů a FOM pro scénář SBO.

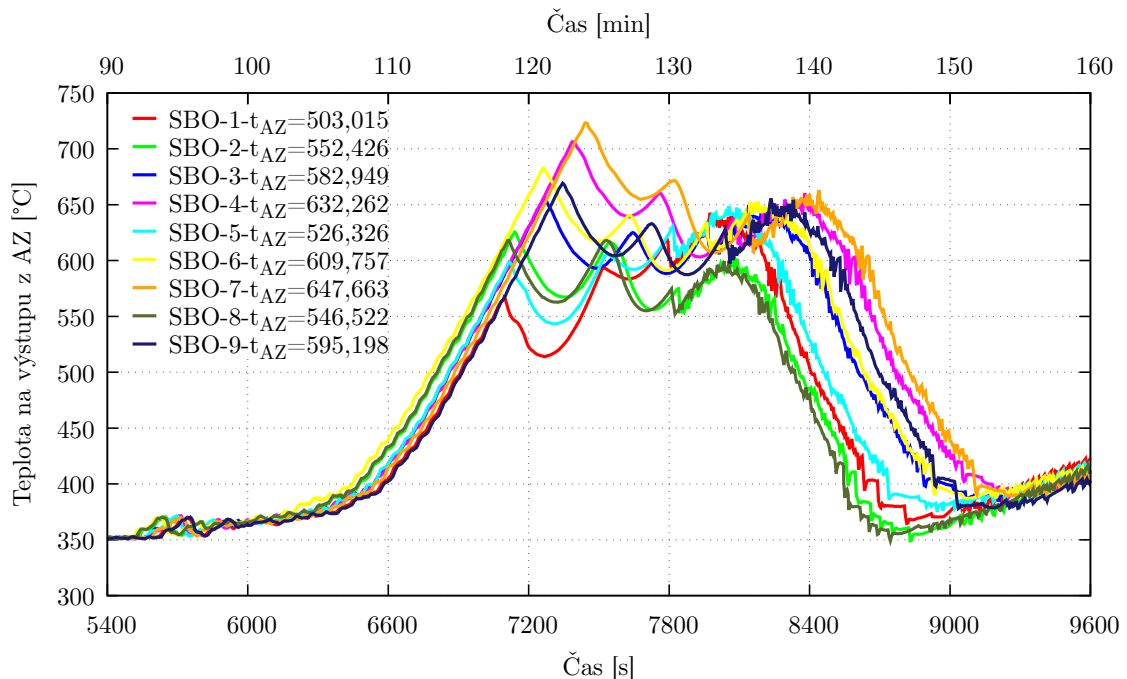
ID	t_{AZ} [°C]	T_{SS} [K]	SC_{B_4C} [-]	ξ [-]	m_{H_2} [kg]	m_{tav} [t]	$m_{\dot{S}P}$ [kg]	τ_{fail} [s]
1	503,015	1576,349	0,104	0,714	366,1	151,9	1216,9	31652,7
2	552,426	1435,101	0,169	3,545	478,2	171,5	1189,2	36089,1
3	582,949	1546,336	0,443	2,035	349,1	221,5	1318,3	33071,9
4	632,262	1596,884	0,285	2,661	408,5	178,5	1292,8	33063,8
5	526,326	1469,902	0,371	3,186	356,3	142,0	1209,3	34796,1
6	609,757	1462,029	0,493	1,186	397,3	141,2	1285,0	34488,2
7	647,663	1510,598	0,030	1,322	419,7	187,8	1302,6	37184,8
8	546,522	1404,020	0,187	2,321	369,8	161,5	1410,3	34774,1
9	595,198	1526,931	0,325	0,170	388,9	189,4	1235,1	32296,5



Obr. 4.4: Vizualizace AZ v nástroji VINSAP dle užití nodalizace. Šedá barva reprezentuje chladivo, modrá stěnu TNR – eliptické dno dolní směšovací komory (válcová část TNR nad úrovní opěrné desky AZ je modelována jinou entitou a zde má světle šedou barvu) a fialová jednotlivé vnitroreaktorové komponenty. Barevná označení v horní části jsou pro lepší orientaci v radiálních prstencích při sledování axiálního profilu teploty. Zde axiální profil teplot však není zobrazen, ale lze ho nalézt na dalších vizualizacích AZ v nástroji VINSAP.

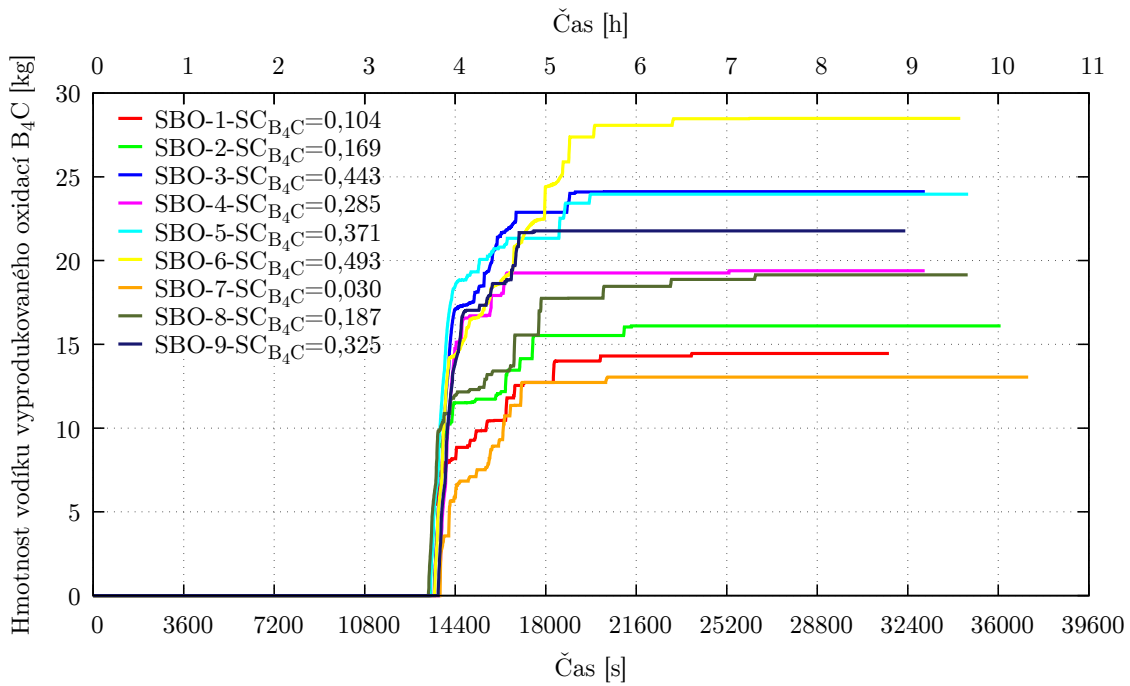
Analýzou ANOVA tabulek bylo zjištěno, že u žádného z parametrů na libovolný FOM při scénáři SBO nebylo dosaženo p-hodnoty menší, než je postulovaná hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Tím pádem nemůže být u žádného z parametrů vzhledem k jakémukoliv FOM zamítnuta nulová hypotéza. Závěrem tedy je, že o žádném z variovaných parametrů nelze tvrdit, že má statisticky významný vliv na některý z FOM. Ve snaze objasnit tento výsledek byly pro celou skupinu výpočtů scénáře SBO dále podrobněji zkoumány průběhy FOM.

Všechny ve studii užití výpočty scénáře SBO (stejně tak i LOCA) začínají hodi-
nou nominálního provozu pro vyrovnání případných nestabilit od počátku výpočtu
než nastane daná IU v modelovém čase „0 s“. Stav AZ před IU lze vidět na Obr. A.2.
Okamžitě od IU má na výpočet vliv pouze variovaný parametr ξ , který ovlivňuje
proudění chladiva v I.O, což má za následek odlišnost teplot na výstupu z AZ již
od IU. V případě SBO nejprve vlivem odstavení reaktoru tlak v I.O klesá, avšak
v důsledku postupného vyvaření vody na sekundární straně PG a odpouštění přes
pojistné ventily PG ustane odvod tepla z AZ a dochází k tlakování I.O. Jelikož došlo
ke ztrátě odvodu tepla z AZ, produkuje se vodní pára, která uniká přes KO, a tím
v I.O ubývá chladiva. Teploty na výstupu z AZ, které lze vidět na Obr. 4.5, rostou
prudce až do okamžiku odtlakování I.O dle SAMG pomocí odlehčovacích a pojist-
ných ventilů KO. Tento růst je tak prudký, že časový rozdíl přechodu do SAMG mezi
výpočty dle variované limitní teploty je menší než 10 minut. S určitou prodlevou
od odtlakování I.O se díky poklesu tlaku v I.O uvolní klapky na hydroakumuláto-
rech a chladivo započne během periodického poklesu tlaku proudit do I.O, což vede
ke snižování teploty a sjednocení průběhu výpočtů v této fázi (cca 160 minut po IU).

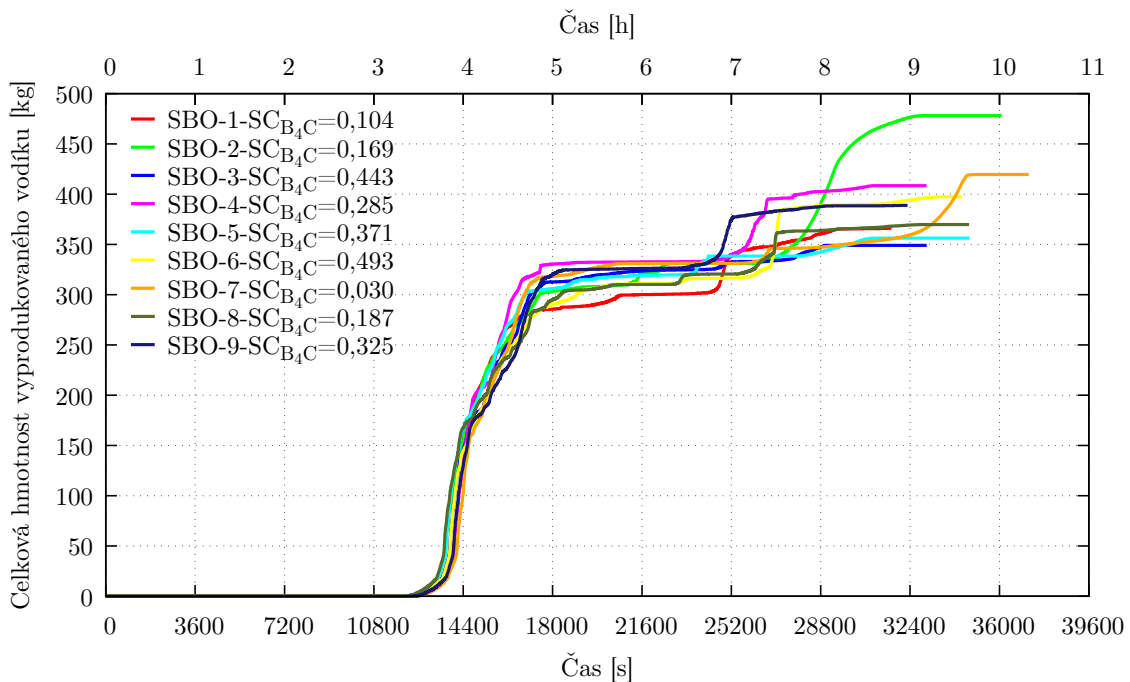


Obr. 4.5: Vývoj teploty chladiva na výstupu z AZ ve scénáři SBO.

S rostoucí teplotou roste i kinetika oxidace, která má ve scénáři SBO větší význam než v LOCA scénáři, protože dochází k postupnému vyvažování chladiva a k intenzivní produkci vodní páry nezbytné pro oxidaci. Změna maximální uvažované míry oxidace B_4C má vliv na velikost i prudkost produkce H_2 z B_4C , jak lze vidět na Obr. 4.6. Avšak příspěvek k produkci H_2 z B_4C je tak malý, jak lze vidět na Obr. A.5, že na celkovou produkci, kterou lze vidět na Obr. 4.7, má malý vliv.

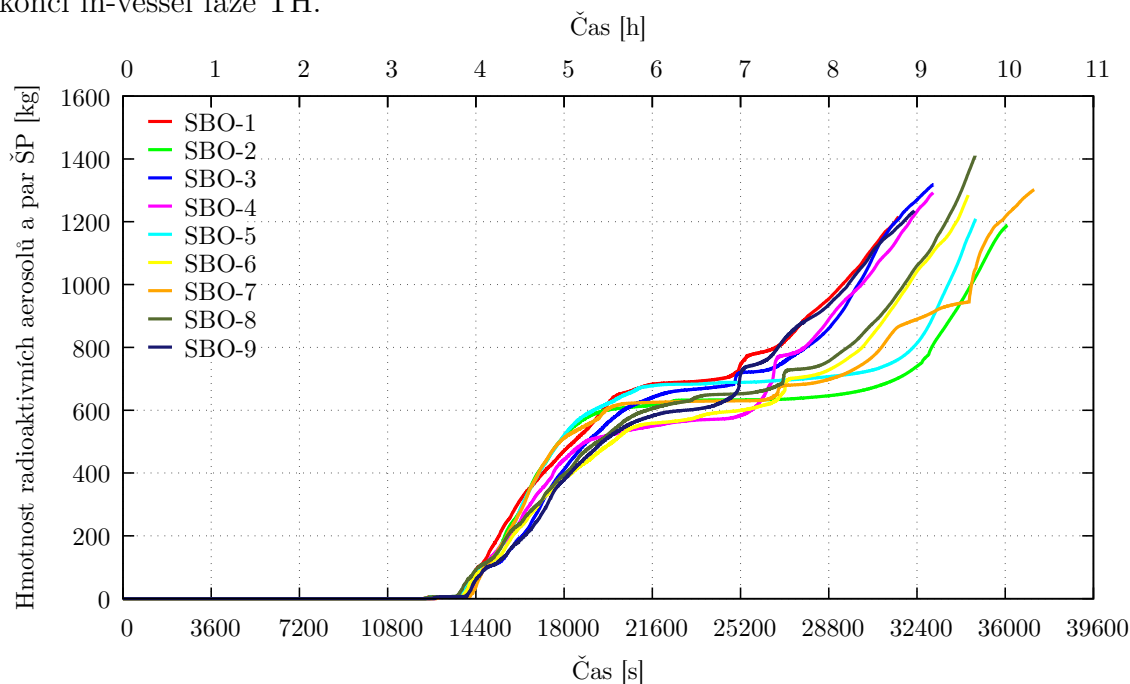


Obr. 4.6: Produkce vodíku z oxidace B_4C ve scénáři SBO.

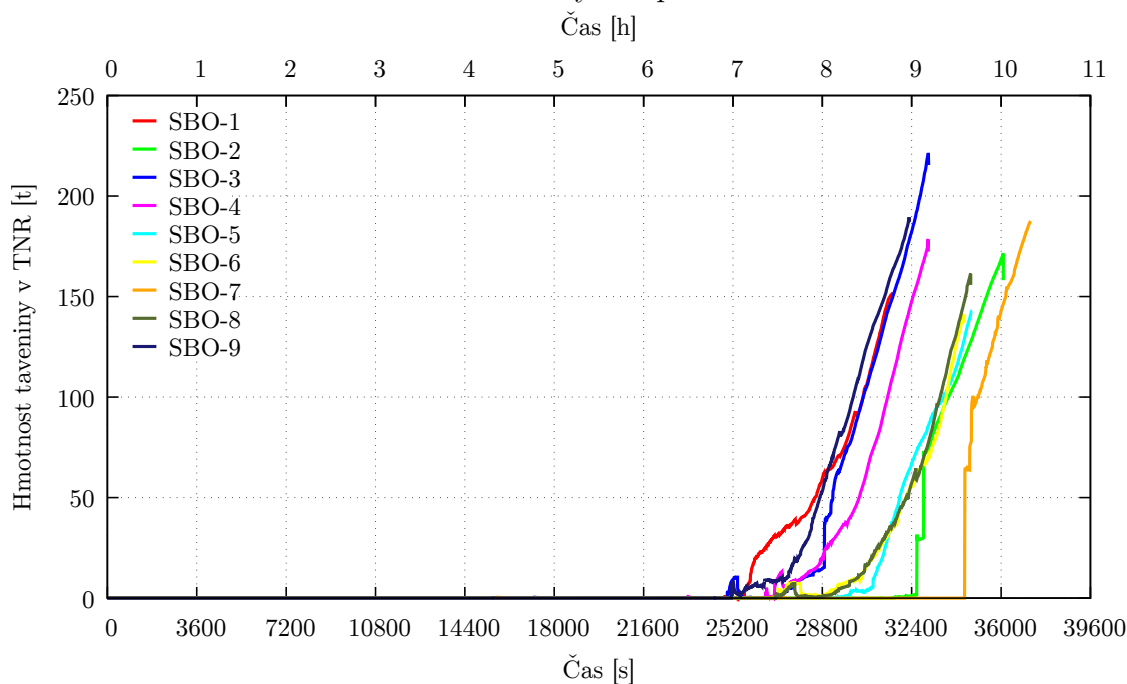


Obr. 4.7: Celková produkce H_2 ve scénáři SBO. Prudký nárůst v SBO-2 je spojen s oxidací Zr po selhání opěrné desky AZ kvůli novému přísunu vodní páry.

Společně s počátkem oxidace dochází k porušení pokrytí PP a prvotnímu uvolnění ŠP, které lze vidět na Obr. 4.8. K dalšímu prudkému uvolnění ŠP dochází v momentě selhání opěrné desky AZ, které je zachyceno na Obr. A.3, kdy se poprvé objevuje i tavenina na dně TNR, jak lze vidět na Obr. 4.9. Hmotnost uniklých ŠP, stejně jako celková hmotnost koría (viz Obr. A.6), je mezi výpočty obdobná. Degradace AZ pokračuje až do momentu selhání dna TNR. Okamžik těsně před protavením dna TNR je zobrazen na Obr. A.4, a to v čase cca 9-10 h od IU, čímž končí in-vessel fáze TH.



Obr. 4.8: Hmotnost ŠP uniklých z paliva ve scénáři SBO.



Obr. 4.9: Hmotnost taveniny na dně TNR ve scénáři SBO.

Rozdílnost počátku relokace taveniny na dno TNR je způsobena různorodostí průběhu a rychlosti degradace dolní části AZ a okamžiku selhání opěrné desky AZ. Lze vypořadovat, že pozdější relokace taveniny na dno TNR obecně vede k jeho pozdějšímu selhání. Selhání opěrné desky souvisí s limitní teplotou pro selhání, avšak zřejmě má mnohem větší vliv způsob a rychlost degradace AZ, jelikož nelze pozorovat trend menší limitní teploty skutečně vedoucí i k dřívějšímu selhání opěrné desky AZ.

Celková hmotnost koria (viz Obr. A.6) je mezi výpočty obdobná, jelikož je ve všech výpočtech v AZ stejně materiálu pro degradaci. Rozdílnost hmotností taveniny mezi výpočty tak odpovídá pouze jiným poměrům pevných trosk a taveniny. Tento poměr však MELCOR nemodeluje zcela správně, jelikož převádí trosky (o údajné teplotě až 3500 K) na taveninu skokově, což lze vidět na Obr. 4.9. Toto objevené nesprávné modelování pak vede k větší reziduální variabilitě při pozorování hmotnosti taveniny i úniku ŠP v pozdější fázi TH a bude nahlášeno vývojářům kódu v SNL.

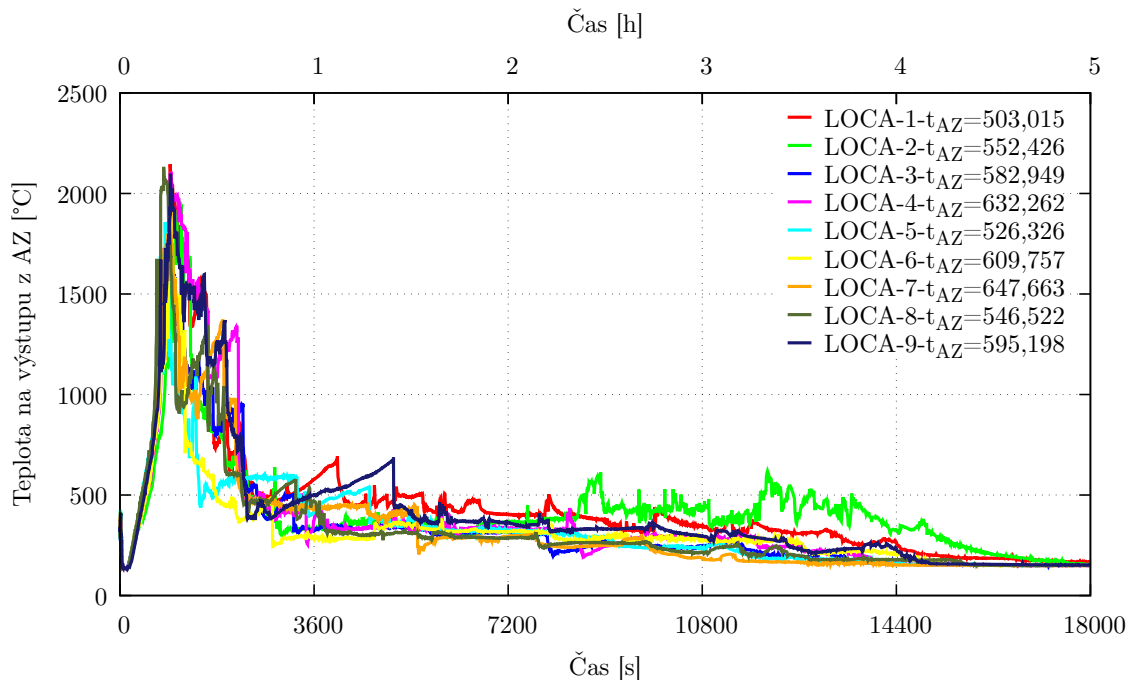
4.4.2 Variace scénáře LOCA

Tabulky ANOVA vygenerované programem DAKOTA ani v případě scénáře LOCA (Tab. B.5–B.8) neobsahovaly žádný případ, kdy by p-hodnota byla menší než $\alpha = 0,05$. Nebylo tedy možné v žádném z případů variovaného parametru a FOM zamítnout nulovou hypotézu. Dle výsledkové tabulky Tab. 4.4 má čas selhání dna TNR relativně malý rozptyl až na výpočet LOCA-7. Markantními jsou rozdíly celkové hmotnosti ŠP uniklých z paliva a hmotností taveniny na dně TNR. Následuje proto podrobnější rozebrání této skupiny výpočtů ve snaze tyto výsledky objasnit.

Tab. 4.4: Výsledná tabulka variovaných parametrů a FOM pro scénář LOCA.

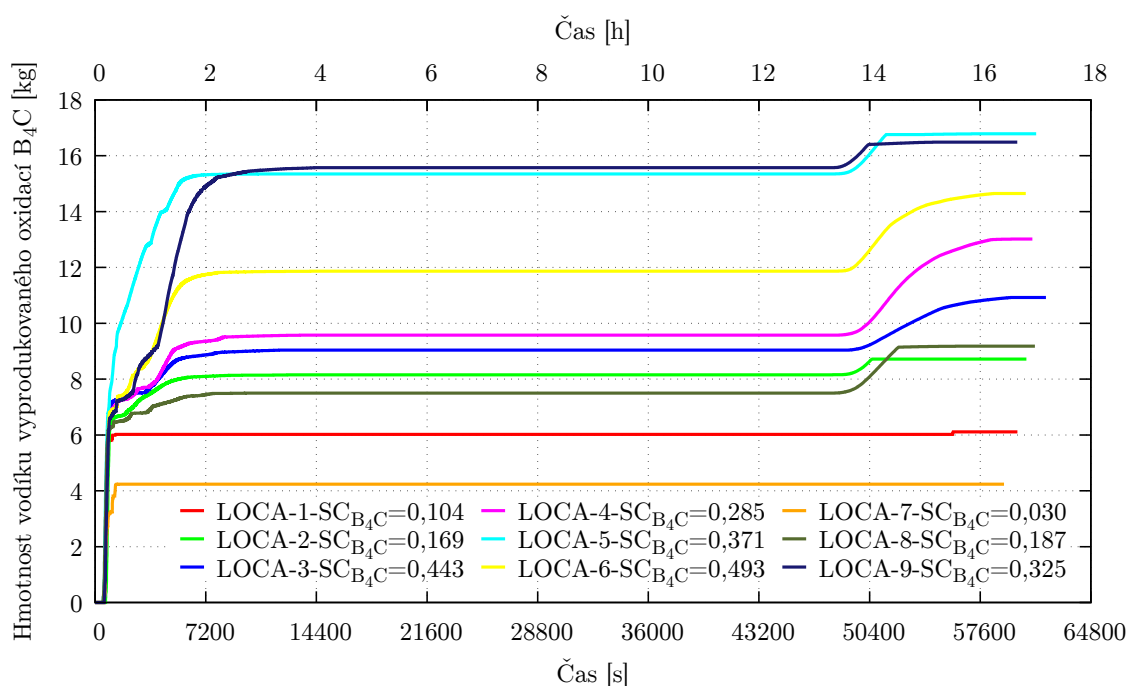
ID	t_{AZ} [°C]	T_{SS} [K]	SC_{B_4C} [-]	ξ [-]	m_{H_2} [kg]	m_{tav} [t]	$m_{\dot{S}P}$ [kg]	τ_{fail} [s]
1	503,015	1576,349	0,104	0,714	391,1	255,5	2017,7	60019,7
2	552,426	1435,101	0,169	3,545	329,8	258,6	2049,6	60605,8
3	582,949	1546,336	0,443	2,035	317,0	276,4	4700,4	61873,3
4	632,262	1596,884	0,285	2,661	320,5	255,8	2674,0	60982,8
5	526,326	1469,902	0,371	3,186	339,1	265,0	5582,5	61243,4
6	609,752	1462,029	0,493	1,186	293,3	264,0	2242,8	60561,2
7	647,663	1510,598	0,030	1,323	229,9	206,9	5978,7	59154,3
8	546,522	1404,020	0,188	2,321	303,8	276,3	4652,2	61150,9
9	595,198	1526,931	0,325	0,170	362,0	257,4	3136,5	60007,0

Scénář opět začíná hodinou nominálního provozu před IU, která v tomto případě ihned vede k odstavení reaktoru, výtoku významné části chladiva I.O do KTMT, prudkému a výraznému poklesu tlaku v I.O, a tím pádem nárůstu tlaku v KTMT. Pokles tlaku v I.O vede k okamžitému výtoku z hydroakumulátorů. Kontinuální únik chladiva z I.O do KTMT vede k poklesu hladiny v TNR a odhalení paliva v AZ, jak lze vidět na Obr. A.7. Teplota na výstupu z AZ prudce roste, jak lze vidět na Obr. 4.10, což má za následek po dosažení limitní teploty přechod do SAMG. Nárůst teploty je tak prudký, že rozdíly mezi vstupy do SAMG podle limitní teploty jsou menší než 3 minuty. Po prodlevě započne zaplavování AZ systémem *diverzního doplňování* podle SAMG, avšak tento systém nestíhá rozvoj havárie pozastavit předtím než AZ zdegraduje a korium se relokuje na dno TNR. Systém zásobuje AZ chladivem a postupně dochází k zaplavení a částečnému ochlazení AZ a stěny TNR, jak je k vidění na Obr. A.8. Hladina stoupá až do momentu, kdy systém *diverzního doplňování* přestane pracovat a voda se začne opět vyvažovat viz Obr. A.9.

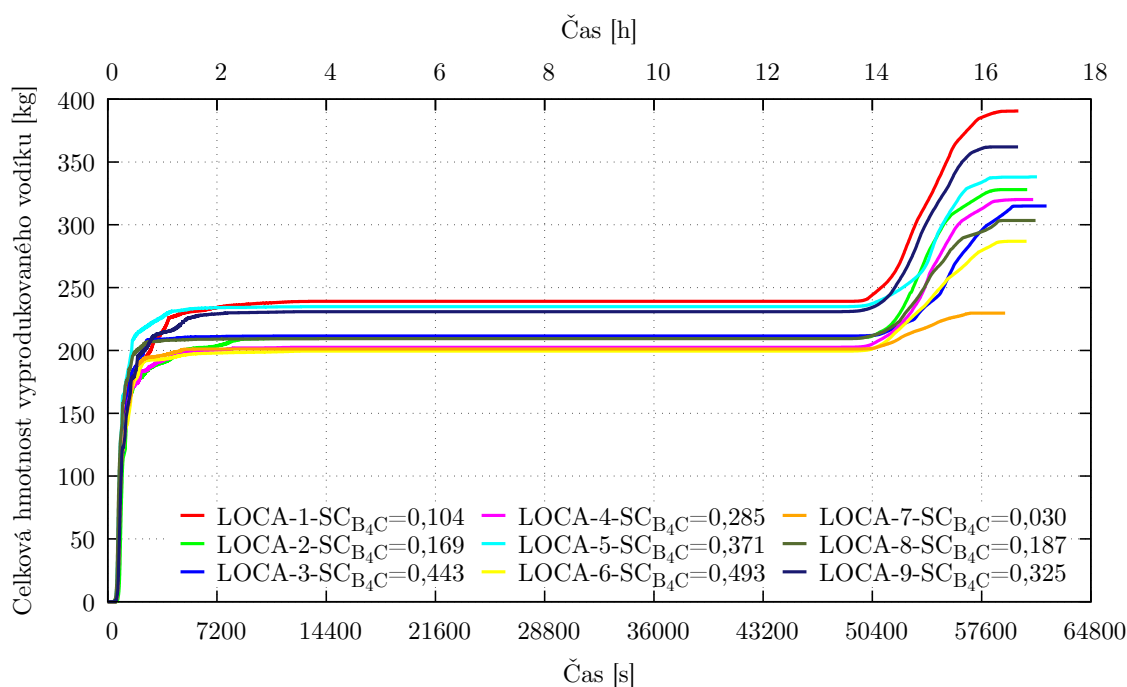


Obr. 4.10: Teplota chladiva na výstupu z AZ ve scénáři LOCA.

Oxidace proběhne nejvíce bouřlivě při prvotním odhalení paliva v AZ, avšak kvůli nedostatku oxidantu (vody) pro tvorbu páry (tzv. *steam starvation*) pak pokračuje oxidace až do okamžiku prolomení opěrné desky AZ minimálně. V dolní směšovací komoře reaktoru se po pádu trosek tvoří další vodní pára a k tvorbě vodíku následně přispívá i ocel z odtavující se stěny TNR. Vyšší uvažovaná maximální míra oxidace B_4C umožňuje větší a prudší produkci H_2 , jak lze vidět na Obr. 4.11. Příspěvek B_4C na produkci H_2 je však tak malý, jak lze vidět na Obr. A.10, že na celkovou produkci, kterou lze vidět na Obr. 4.12, to nemá významný vliv. Mnohem větší příspěvek má oxidace roztavené oceli během natavování stěny TNR.



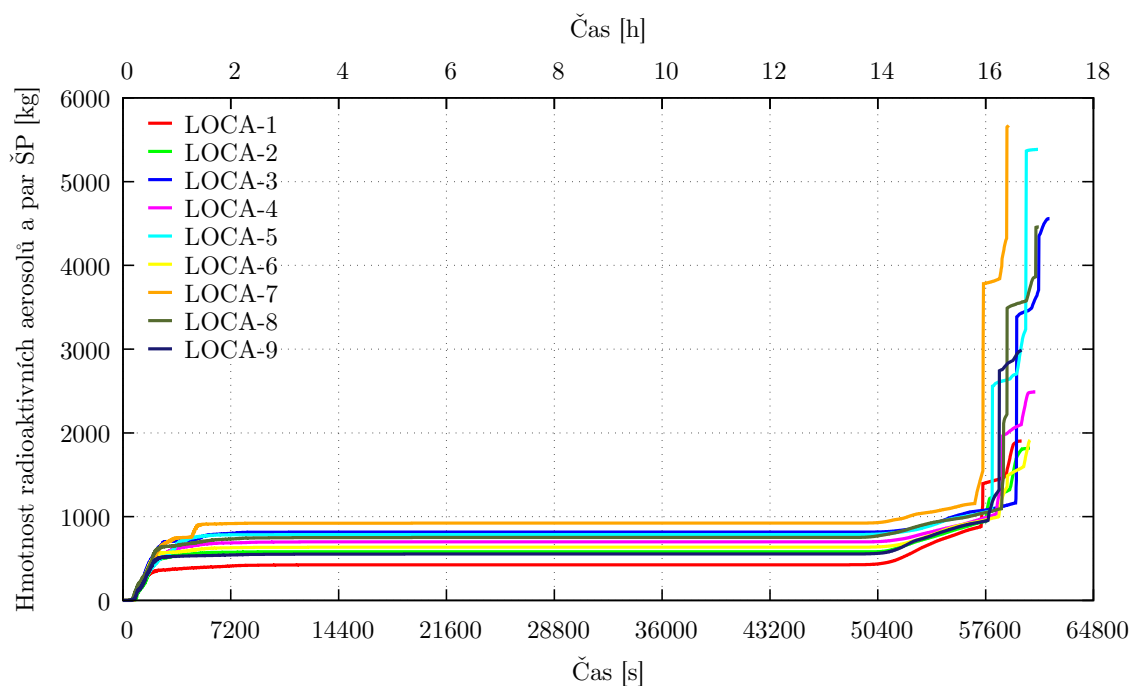
Obr. 4.11: Produkce vodíku z oxidace B_4C ve scénáři LOCA.



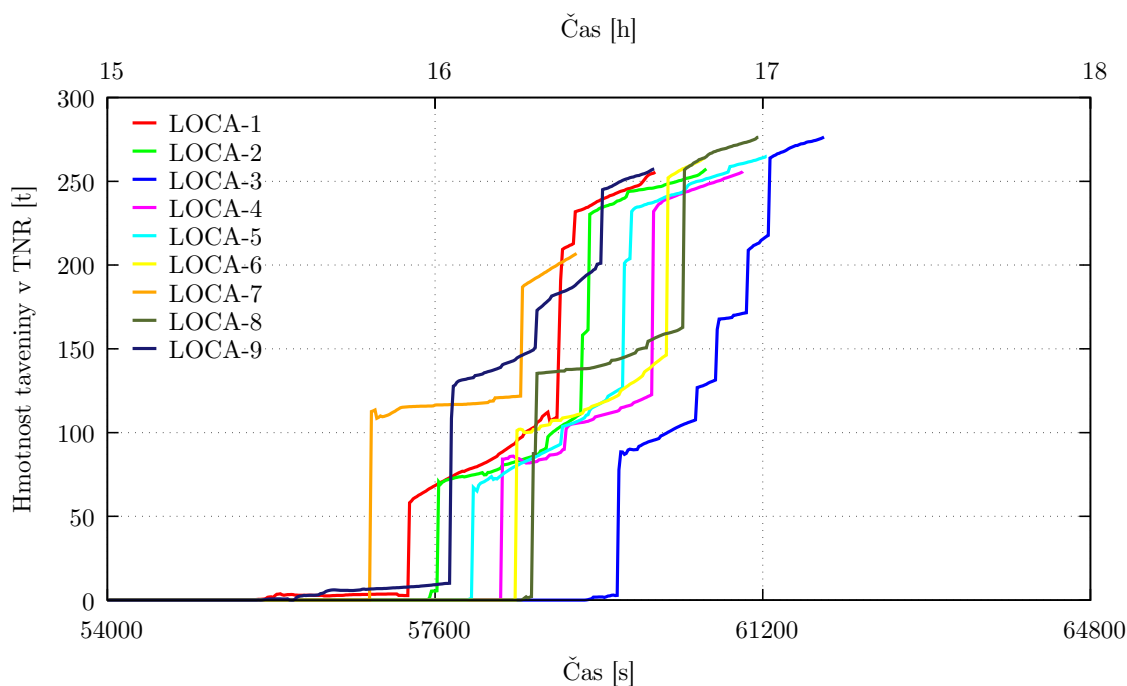
Obr. 4.12: Celková produkce vodíku ve scénáři LOCA.

Uvolnění ŠP, jehož průběh ukazuje Obr. 4.13, probíhá v menší míře během rychlé degradace AZ, avšak mnohem větší uvolnění nastává po vyvaření chladiva ze zno-vuzaplavené AZ, které doprovází dle výpočtu i vznik taveniny, jak je k vidění na Obr. 4.14. Do té doby kód uvažoval, že naprostou většinu koria tvoří jeho pevná složka – trosky a to i přes skutečnost, že teplota pevných trosek dosahovala teplot vyšších než 3500 K. V jeden okamžik pravděpodobně kód vyhodnotil, že nastaly podmínky pro převedení určité frakce koria, jehož celková hmotnost (viz Obr. A.11)

je mezi výpočty obdobná, na taveninu – a tento proces roztavení velkého množství pevných trosk kód MELCOR uskutečnil v rámci velmi krátkého časového intervalu. Kód tedy zřejmě nesprávně modeluje tento proces, a to má vliv i na uvolňování ŠP. Tavenina by následně měla konvekcí předávat stěně TNR větší tepelný výkon než trosky, avšak ani to pozorováno nebylo. Následkem nesprávného modelování vychází reziduální variabilita u těchto tří FOM příliš velká.



Obr. 4.13: Hmotnost ŠP uniklých z paliva ve scénáři LOCA.



Obr. 4.14: Hmotnost taveniny na dně TNR ve scénáři LOCA.

Závěr

Cílem této bakalářské práce byla identifikace parametrů s potenciálem významně ovlivnit průběh těžké havárie a sledování jejich vlivu na výsledky – formou citlivostní studie. Motivací provedení citlivostní studie vlivu těchto parametrů, z hlediska jaderné bezpečnosti a zvládání těžkých havárií, na výsledky analýz těžké havárie pro předpřipravený model JE Temelín byla jednak snaha o zjištění podmínek na zvolené stěžejní parametry a vytvoření podkladů pro navazující akademické práce týkající se této problematiky. Byla snaha identifikovat takové parametry, které buďto svou vlastní neurčitostí vnášejí do modelu variabilitu nebo které lze ovlivnit (např. odlišným časováním zásahů operátorů při zvládání těžké havárie).

Aby bylo možno identifikovat potenciálně významné parametry, byla nejdříve provedena obsáhlá rešerše fenomenologie těžkých havárií, konstrukce vnitroreaktorových komponent a zařízení primárního a sekundárního okruhu JE Temelín společně s nastudováním funkcí a parametrů ochranné obálky a havarijního chlazení AZ. Dále v rámci teoretické části proběhlo seznámení se se strukturou kódu MELCOR, který slouží k simulacím těžkých havárií, a architekturou vstupních a výstupních dat tohoto kódu. Takto získané znalosti pak byly využity pro určení potenciálně významných parametrů pro průběh těžké havárie. Byly jimi: limitní teplota na výstupu z AZ pro iniciaci opatření ke zvládání těžkých havárií, teplota, při které se uvažuje selhání opěrné desky AZ, hodnota maximální uvažované míry zoxidování karbidu boru – B_4C a součinitel místních ztrát na zastaveném hlavním cirkulačním čerpadle.

Dále byly vybrány stěžejní sledované parametry pro následné výpočtové analýzy zvládání těžkých havárií, na nichž byl vliv variovaných parametrů studován. Byly zvoleny následující parametry: celkové množství vyprodukovaného vodíku, celkové množství uniklých štěpných produktů z paliva a množství taveniny na dně tlakové nádoby reaktoru v momentě selhání dna. Čtvrtým parametrem byl samotný čas selhání dna tlakové nádoby reaktoru.

Prvním krokem v praktické části této práce bylo seznámení se s programem pro optimalizaci a citlivostní analýzy DAKOTA a možností jeho propojení se simulačním

kódem těžkých havárií MELCOR. Následně byla vybrána metoda analýzy rozptylu, pro zjištění zda dané parametry mají statisticky významný vliv. Pro zredukování počtu potřebných výpočtů byla zvolena metoda ortogonálního pole (pro volbu kombinací jednotlivých, celkem čtyř výše zmíněných parametrů) společně se vzorkováním metodou latinské hyperkrychle. Nakonec byla vypracována série skriptů pro úpravu vstupních souborů pro kód MELCOR a také pro extrakci dat ze souborů výstupních.

Po spuštění a dokončení sad výpočtů pro oba scénáře s iniciační událostí LOCA respektive *Station blackout* se v obou případech z analýzy rozptylu došlo k závěru, že žádný z variovaných parametrů nemá statisticky významný vliv na žádný ze sledovaných stěžejních parametrů. K objasnění této skutečnosti byly obě dvě sady výpočtů podrobeny pečlivé analýze.

V případě sady výpočtů s iniciační událostí *Station blackout* bylo vyzpozorováno, že teploty na výstupu z AZ po vyvaření chladiva rostou tak prudce, že časový rozdíl v zavedení opatření pro zvládnutí těžké havárie na základě dosažení definované limitní teploty pro iniciaci daného zásahu (odtlakování primárního okruhu) je menší než 10 minut. Stejně tak po zavedení opatření se teploty na výstupu z AZ napříč výpočty srovnají cca 160 minut po iniciační události. Obdobně tomu je i u sady výpočtů s iniciační událostí LOCA, kde je časový rozdíl zavedení opatření (diverzní doplňování chladiva do AZ) ještě menší, zpravidla méně než 3 minuty, a teploty na výstupu z AZ jsou pak po většinu času všech výpočtů stabilizovány na stejnou úroveň doplněním chladiva pomocí systému diverzního doplňování do AZ. Z výše uvedeného vyplývá, že variace limitní teploty chladiva na výstupu z AZ pro iniciaci opatření ke zvládnutí těžkých havárií nemá příliš velký vliv na další rozvoj/zvládnutí havárie.

Rozdíly teplot na výstupu z AZ, které lze na počátku v obou sadách zaznamenat, jsou způsobeny lehce odlišnými počátečními podmínkami simulace z důvodu rozdílnosti proudění uvnitř primárního okruhu následkem variace součinitele místních ztrát na hlavním cirkulačním čerpadle. Ty jsou však tak malé, že po srovnání teplot (v případě sady výpočtů LOCA po dočasné stabilizaci systémem doplňování chladiva do primárního okruhu a v případě sady výpočtů se *Station blackout* po odtlakování primárního okruhu) již hraje roli jen při přirozené konvekci; ta však po překonání přibližně 1200 °C na pokrytí s rozbíhající se oxidací přestává být účinným prostředkem pro odvod generovaného tepla z AZ a přestává tak být významná pro další rozvoj těžké havárie.

Variace maximální uvažované limitní míry zoxidování B₄C se sice projevila změnou výsledné produkce H₂ z tohoto zdroje, avšak při pohledu na celkovou tvorbu H₂ je v obou sadách výpočtů příspěvek B₄C tak malý, že se jeho změny na celkové

produkci H_2 ani na jiných stěžejních parametrech ke konci simulace nijak významně neprojeví. Produkce H_2 z oxidace B_4C je o více než řád nižší, než je produkce H_2 z kovových materiálů, zejména Zr.

Posledním variovaným parametrem byla změna limitní teploty pro uvažované selhání opěrné desky AZ. V případě sady výpočtů s iniciační událostí LOCA dochází ke kompletní degradaci AZ před dočasným pozastavením rozvoje těžké havárie pomocí diverzního systému doplňování chladiva, kdy jsou již tavenina a trosky relokovány na dno nádoby a čas selhání desky tak nemá na další vývoj vliv. Například sadou výpočtů se *Station blackout* byla zaznamenána korelace dřívějšího selhání dna tlakové nádoby společně s dřívějším selháním opěrné desky AZ. Důvodem je dřívější odtavování stěny nádoby při relokaci trosek/taveniny do prostoru dna tlakové nádoby reaktoru, což vede k jejímu časnějšímu selhání. Nebyla ale nalezena jasná spojitost mezi nižší limitní teplotou pro selhání opěrné desky AZ a časem jejího selhání. Zřejmě významnější roli hraje způsob degradace dolní části AZ, neboť se výpočty od tohoto okamžiku více liší. Mezi výpočty v dané sadě dochází k různým místům i časům selhání opěrné desky AZ.

Během vyhodnocování vývoje celkové hmotnosti štěpných produktů uniklých z paliva a taveniny na dně tlakové nádoby reaktoru v momentě jejího selhání bylo zjištěno, že kód nemodeluje správně převod trosek (pevných složek koria) na taveninu. Třebaže celková hmotnost koria, složeného právě z pevných trosek a oxidické a metalické taveniny, je v rámci obou skupin obdobná, liší se významně poměry mezi těmito složkami. Ukázalo se, že kód při specifických podmínkách, např. při dlouhodobém chlazení relokovaných trosek do dna TNR, přiřazuje pevným troskám nereálnou teplotu dosahující až 3500 K, což je vyšší než teplota tání UO_2 . Dále kód zvláštním způsobem skokově během jediného časového kroku ve výpočtu transformuje velké množství trosek na taveninu, což je doprovázeno náhlým skokovým únikem štěpných produktů. Tyto nereálné skokové materiálové změny a nesprávné modelování taveniny a trosek jsou důvodem obrovské variability mezi výpočty při pohlížení na celkovou hmotnost taveniny a štěpných produktů uniklých z paliva v momentě selhání dna a je nutné tyto zřejmě nesprávné modelové předpoklady vzít v úvahu při statistickém vyhodnocování. K výsledkům odvislým od poměru fází koria je proto nutno přistupovat obezřetně s rezervou.

Při vypracování této bakalářské práce se podařilo identifikovat některé potenciálně významné parametry ovlivňující viditelným způsobem průběh těžké havárie, ale během jejich variování bylo zjištěno, že je buď nesprávným modelováním v kódu nelze správně vyhodnotit, nebo že jejich variace má vliv pouze na část průběhu havárie, ale v rámci sledování celkového vlivu ke konci simulace se nijak statisticky významně neprojeví. Práce však vytvořila dobrý základ pro případné navazující

akademické práce vytvořením fungujícího propojení programu DAKOTA a kódu MELCOR, které může být dále modifikováno a užito i pro další statistické studie modelů JE během těžkých havárií. Tím by práce mohla přispět k zavedení pravidelného provádění analýzy neurčitostí v *best-estimate* kódech jako je MELCOR, což je v současné době velký trend v oboru simulací těžkých havárií. Práce také pomohla nalézt chyby kódu MELCOR v modelování trosek a taveniny, které budou ohlášeny vývojářům kódu v Sandia National Laboratories.

Seznam použitých zdrojů

- [1] 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.
- [2] IRSN. *The PHEBUS FP programme* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/PHEBUS-PF/Pages/Severe-accident-research-programme-PHEBUS-FP-3455.aspx>.
- [3] HEŘMANSKÝ, B. *Bezpečnost jaderných elektráren I, II, III, IV*. Učební texty k přednáškám na KJR FJFI ČVUT, 2009.
- [4] ČESKO. *Vyhláška č. 329 ze dne 26. září 2017 o požadavcích na projekt jaderných zařízení*. In: Sbíрка zákonů České republiky, dostupné také z: <https://www.zakony.cz/zakony/2017/301/zakon-329-2017-Sb-vyhlaska-o-pozadavcich-na-projekt-jaderneho-zarizeni-SB2017329>.
- [5] SÚJB. *Deterministické analýzy rozšířených projektových podmínek bez vážného poškození paliva (DEC A): Jaderná bezpečnost BN-JB-2.2 (Rev.0.0)*. 2019.
- [6] ČESKO. *Zákon č. 263 ze dne 14. července 2016 atomový zákon*. In: Sbíрка zákonů České republiky, dostupné také z: <https://www.zakony.cz/zakony/2016/251/zakon-263-2016-Sb-zakon-atomovy-zakon-SB2016263>.
- [7] *Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 Rev. 1*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1999. ISBN 92-0-102699-4.
- [8] SÚJB. *Ochrana do hloubky: Jaderná bezpečnost BN-JB-1.5 (Rev.0.0)*. 2021.
- [9] *INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013.
- [10] SÚJB. *INES Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných a radiálních událostí: Uživatelská příručka*. 2016.
- [11] NRC, US. *United States National Regulatory Commission: Severe Accident* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/severe-accident.html>.
- [12] IRSN. *Research and development with regard to severe accidents in pressurised water reactors: Summary and outlook*. 2007. Tech. zpr. IRSN.
- [13] *IAEA Safety Glossary: 2018 Edition*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2019. ISBN 978-92-0-104718-2.

- [14] SÚJB. *Deterministické analýzy rozšířených projektových podmínek postulovaných iniciačních událostí a scénářů DEC B: Jaderná bezpečnost BN-JB-2.3 (Rev.0.0)*. 2021.
- [15] SÚJB. *Deterministické bezpečnostní analýzy událostí abnormálního provozu a základních projektových nehod: Jaderná bezpečnost BN-JB-2.10 (Rev.0.0)*. 2020.
- [16] JACQUEMAIN, D. *Nuclear power reactor core melt accidents: Current State of Knowledge*. Francie: EDP Sciences, 2015. ISBN 978-2-7598-1835-8.
- [17] VEJBORNÝ, V. *Těžké havárie jaderných elektráren*. Brno: Centrum Přípravy Personálu, 2015.
- [18] HELF, H. et al. *Catalogue of Generic Plant States Leading to Core Melt in PWRs*. 1996. Tech. zpr. OECD NEA.
- [19] SEHGAL, B. *Nuclear safety in light water reactors: severe accident phenomenology*. Academic Press, 2012. ISBN 978-0-12-388446-6.
- [20] 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.
- [21] ADROGUER, B. et al. Core loss during a severe accident (COLOSS). *Nuclear Engineering and Design*. 2005, roč. 235, č. 2, s. 173–198. ISSN 0029-5493. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.08.050>.
- [22] PAYOT, F.; HASTE, T. et al. *FPT3 Final Report*. 2010. Tech. zpr. IRSN.
- [23] HUMPHRIES, L. et al. *Computer Code Manuals, Vol. 1: Primer and Users' Guide, Version 2.2*. 2021.
- [24] 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>.
- [25] STEINBRÜCK, M.; BÖTTCHER, M. Air oxidation of Zircaloy-4, M5® and ZIRLO™ cladding alloys at high temperatures. *Journal of Nuclear Materials*. 2011, roč. 414, č. 2, s. 276–285. ISSN 0022-3115. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2011.04.012>.
- [26] HOFMANN, P. et al. Chemical interactions of reactor core materials up to very high temperatures. *Nuclear Technology*. 1989, roč. 87.
- [27] CRONENBERG, A. W. Hydrogen generation behavior in the LOFT FP-2 and other experiments: comparative assessment for mitigated severe accident conditions. *Nuclear technology*. 1992, roč. 97, č. 1, s. 97–112. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.13182/NT92-A34629>.
- [28] HERING, W.; HOMANN, C. Degraded core reflood: Present understanding and impact on LWRs. *Nuclear Engineering and Design*. 2007, roč. 237, č. 24, s. 2315–2321. ISSN 0029-5493. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.04.017>.
- [29] ASMOLOV, V.; TSURIKOV, D. MASCA project: major activities and results. In: *CSNI Workshop, MASCA Seminar*. 2004.

- [30] KOTOUČ, M. et al. *Ověření aplikace strategie zadržetí coria uvnitř tlakové nádoby reaktoru VVER 1000, popis výpočtů*. 2022. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.
- [31] FUKASAWA, M.; TAMURA, S. Thermodynamic analysis for molten corium stratification test MASCA with ionic liquid U-Zr-Fe-OBC-FPs database. *Journal of nuclear science and technology*. 2007, roč. 44, č. 9, s. 1210–1219. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2007.9711364>.
- [32] KYMÄLÄINEN, O. et al. Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number. *Nuclear Engineering and Design*. 1994, roč. 149, č. 1, s. 401–408. ISSN 0029-5493. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90305-0](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90305-0).
- [33] *Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants*. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2010. Specific Safety Guides, č. SSG-2. ISBN 978-92-0-113309-0. Dostupné také z: <https://www.iaea.org/publications/8233/deterministic-safety-analysis-for-nuclear-power-plants>.
- [34] JOURNEAU, C.; ALSMEYER, H. Validation of the COMET Bottom-Flooding Core-Catcher with Prototypic Corium. *Proceedings of the 2006 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP'06*. 2006. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/biblio/21021013>.
- [35] *Primární část JE VVER 1000: Modul 1*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [36] *Primární část JE VVER 1000: Palivo a komponenty aktivní zóny reaktoru VVER 1000 JE Temelín – Modul 2*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2019.
- [37] KOTOUČ, M. *Výchozí parametry palivového systému JE Temelín se soubory TVSA-T pro účely analýz těžkých havárií: Technical Report ÚJV Z-3020-T*. 2010. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.
- [38] *Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 - revize 1: Díl 4 – interní dokument ČEZ, a. s. Temelín*, 2011.
- [39] *Primární část JE VVER 1000: Základní zařízení primárního okruhu*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2017.
- [40] DOLEŽAL, J. et al. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-0-104936-5.
- [41] *Sekundární část JE VVER 1000: I. Díl*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2021.
- [42] *Sekundární část JE VVER 1000: II. Díl*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2019.
- [43] HEŘMANSKÝ, B. *Jaderné reaktory I: Reaktory II. generace*. Podklady k přednáškám předmětu Jaderné reaktory na KJR FJFI ČVUT, 2017.
- [44] KLIMA, P. et al. *Zkoušky integrity kontejnmentu 1. a 2. blok*. 2012. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.

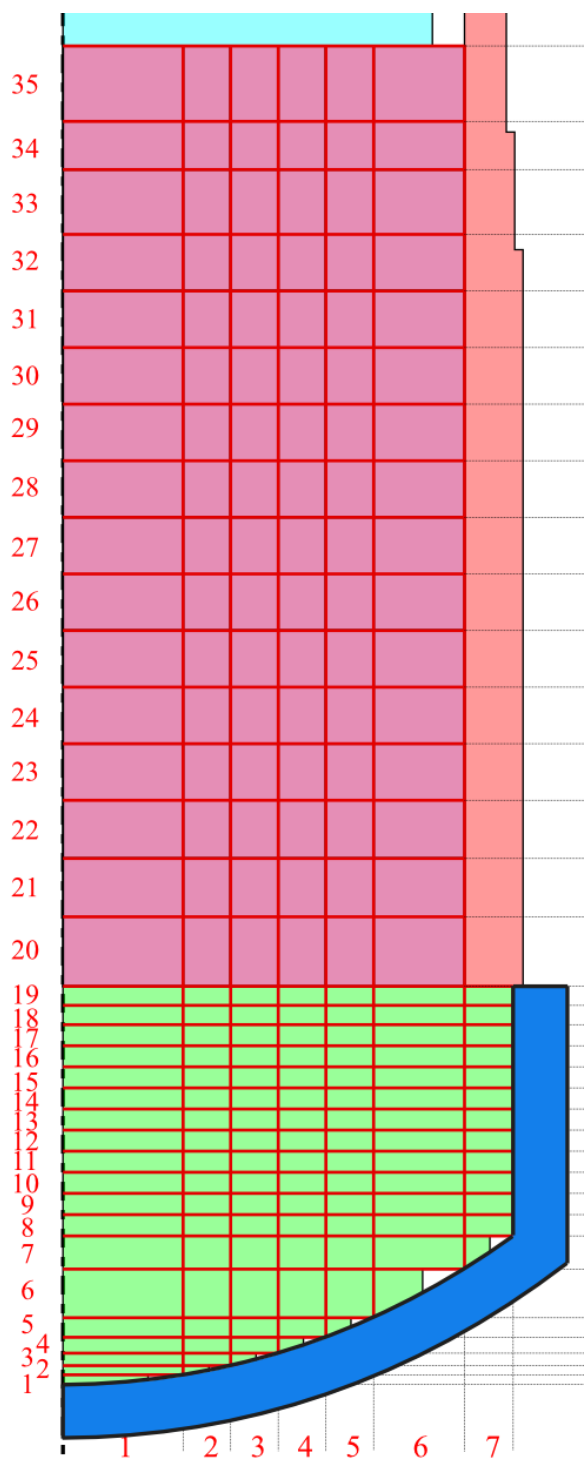
- [45] *Primární část JE VVER 1000: Pomocné systémy*. Brno: Učební texty pro přípravu personálu JE, 2017.
- [46] *Předprovozní bezpečnostní zpráva 1,2 - revize 1: Vstupní data pro bezpečnostní analýzy ETE*. Interní dokument ČEZ, a. s., 2017.
- [47] RASMUSSEN, N. et al. Reactor Safety Study, WASH-1400. *An assessment of accident risks in US Commercial Nuclear Power Plants*. 1975.
- [48] HAN-CHUL, K. et al. Validation of the MELCOR input model for a CANDU PHWR containment analysis by benchmarking against integrated leakage rate tests. *Nuclear Engineering and Design*. 2018, roč. 340, s. 201–218. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.09.022>.
- [49] KVIZDA, B.; MAYER, G.; VÁCHA, P. et al. ALLEGRO Gas-cooled Fast Reactor (GFR) demonstrator thermal hydraulic benchmark. *Nuclear Engineering and Design*. 2019, roč. 345, s. 47–61. ISSN 0029-5493. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.006>.
- [50] HUMPHRIES, L.; GAUNTT, R. *MELCOR 2.2 Severe Accident Analysis Code-Current Status and Plans for Future*. 2018. Tech. zpr. Sandia National Lab.
- [51] PELLEGRINI, M. et al. *Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Summary Report*. 2021. Tech. zpr. OECD NEA.
- [52] ROSS, K. *MELCOR Best Practices as Applied in the State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project*. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, 2014. Tech. zpr. Sandia National Laboratories.
- [53] VAN DORSSELAERE, J.P. et al. The ASTEC integral code for severe accident simulation. *Nuclear Technology*. 2009, roč. 165, č. 3, s. 293–307. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.13182/NT09-A4102>.
- [54] HUMPHRIES, L. et al. *Computer Code Manuals, Vol. 3: MELCOR Assessment Problems, Version 2.1.7374*. 2015.
- [55] KOTOUČ, M. *Výpočtové analýzy TH na ETE iniciované v otevřeném reaktoru při odstávce pro stanovení zdrojů hmot a energií do kontejnmentu: Technical Report ÚJV Z-4380-T*. 2015. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.
- [56] HUMPHRIES, L. et al. *Computer Code Manuals, Vol. 2: Reference Manuals, Version 2.2*. 2021.
- [57] KOTOUČ, M. *Aktualizovaná analýza scénáře SBO pro JE Temelín provedená kódem MELCOR 2.2: základní varianta: Technical Report ÚJV Z-5014-T*. 2018. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.
- [58] ADAMS, B.; BOHNHOFF, W. et al. *Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 6.13 User's Manual*. 2020. Tech. zpr. Sandia National Lab., Albuquerque, United States.
- [59] HOLDER, R. et al. Improving a Plan Library for Real-time Systems Using Nearly Orthogonal Latin Hypercube Sampling. In: *AAAI*. 2008, s. 1804–1805.

-
- [60] MASCARI, F.; BERSANO, A. et al. MELCOR/DAKOTA coupling in the SNAP environment/architecture. In: *Proceeding in CSARP meeting*. 2021.
- [61] SVATEK, J.; TSCHIESCHE, J. *Vizualizační aplikace pro MELCOR – Uživatelská příručka: Technical Report ÚJV Z-4913*. 2017. Tech. zpr. ÚJV Řež, a. s.

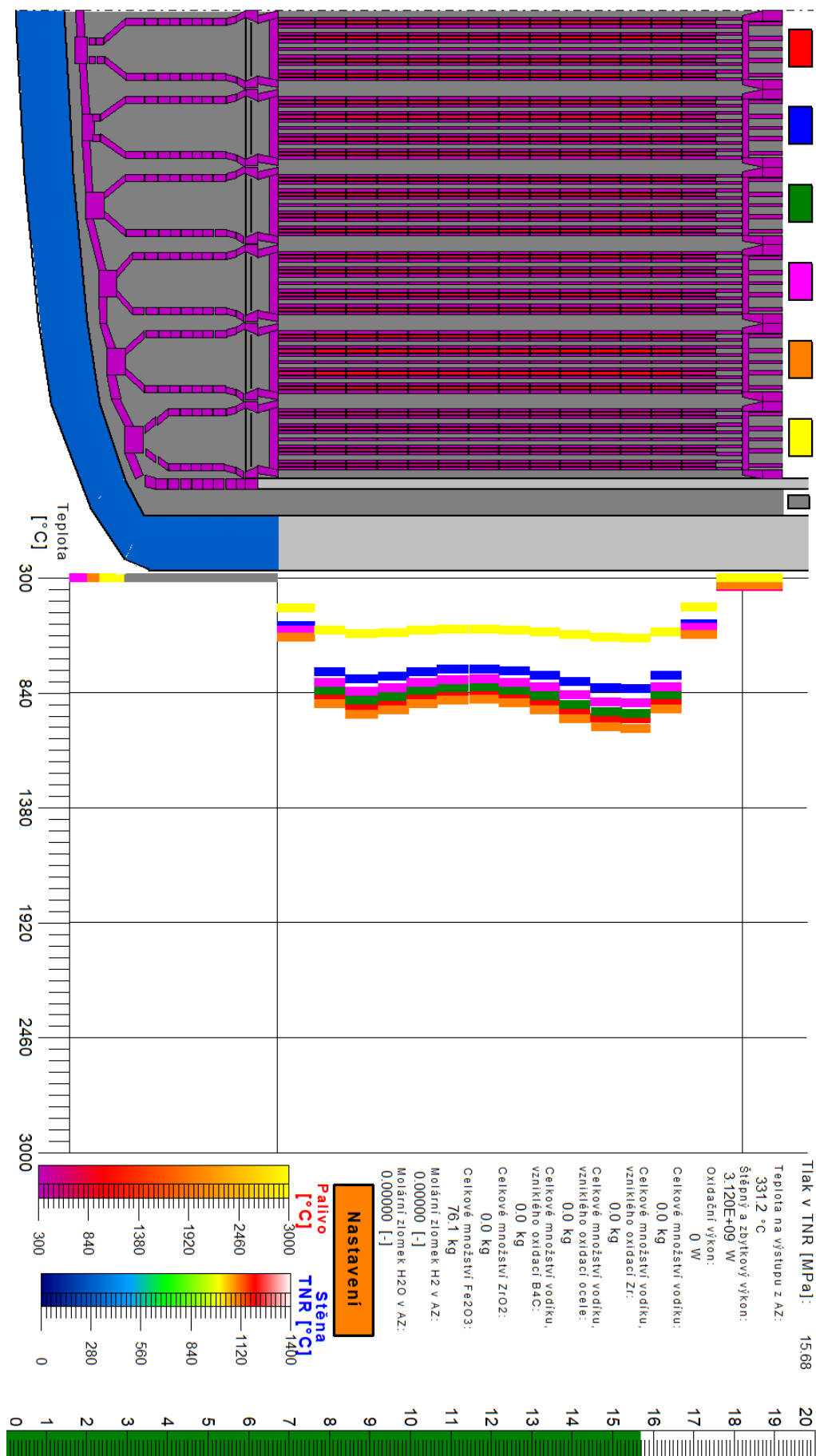
Přílohy

Příloha A

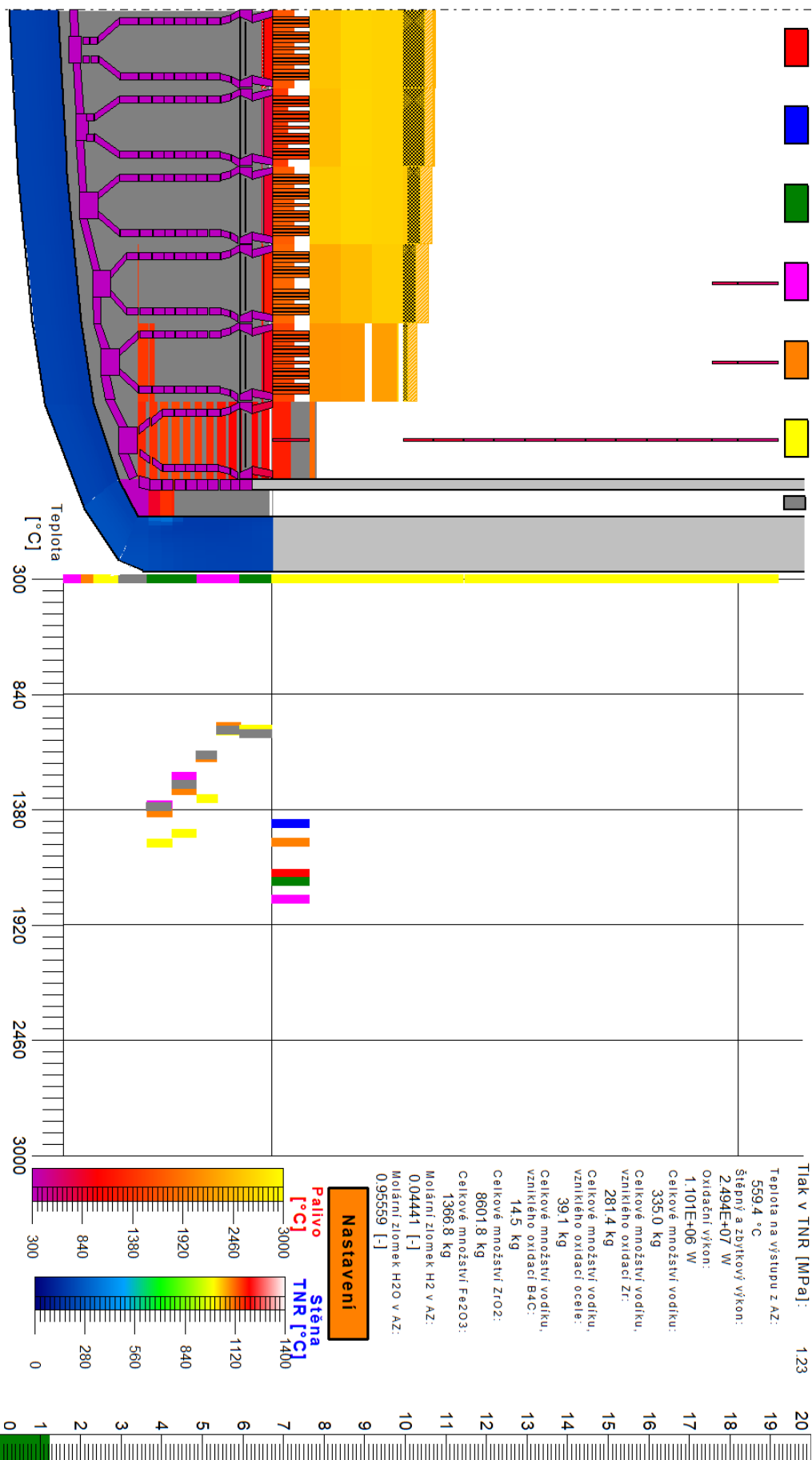
Výsledné grafy a vizualizace AZ



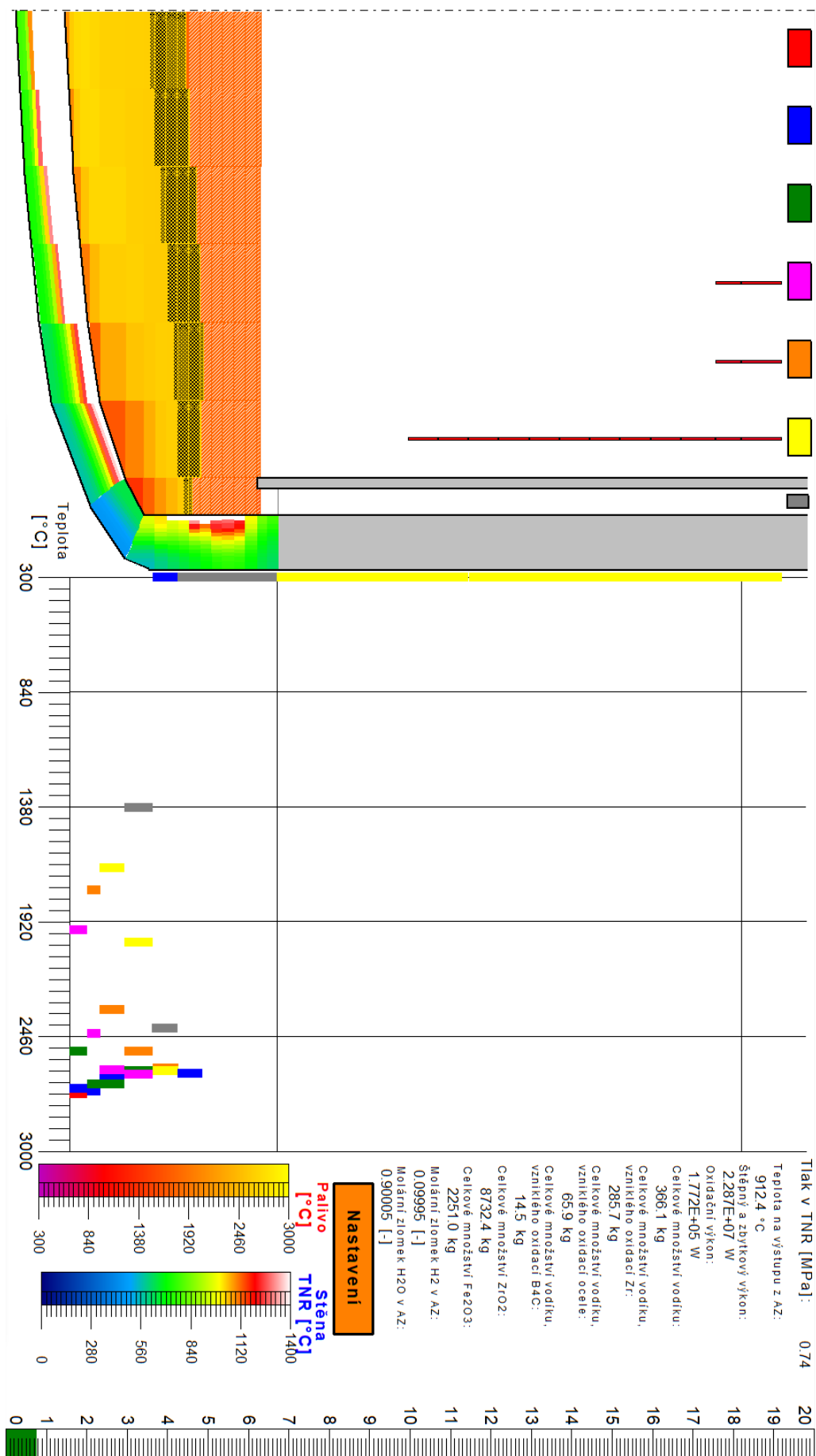
Obr. A.1: Nodalizace TNR v kódu MELCOR. AZ společně se sestupnou šachtou, je rozdělena do 7 radiálních prstenců a 35 axiálních úrovní. Světle modrá oblast reprezentuje spodek horní směšovací komory, růžová prostor AZ, lososová sestupnou šachtu a zelená oblast dolní směšovací komory (tmavě modrá barva reprezentuje její eliptické dno). Opěrná deska AZ je v 19. axiální úrovni. Příloha pro str. 67.



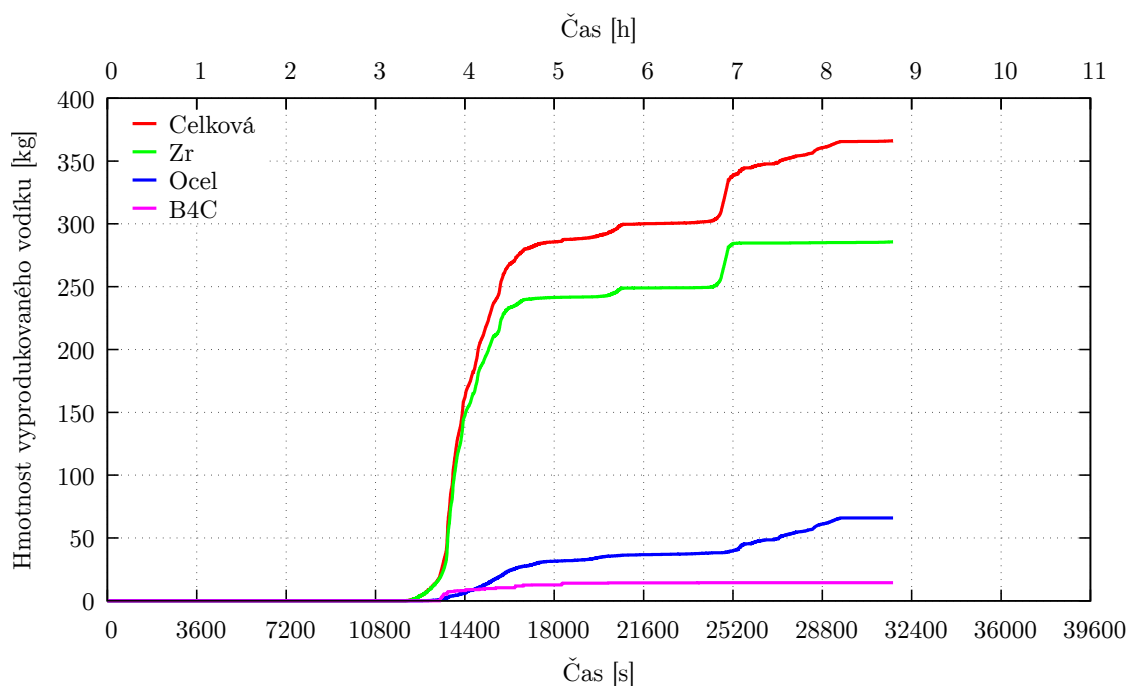
Obr. A.2: AZ během nominálního provozu okamžik před IU, příloha pro str. 69.



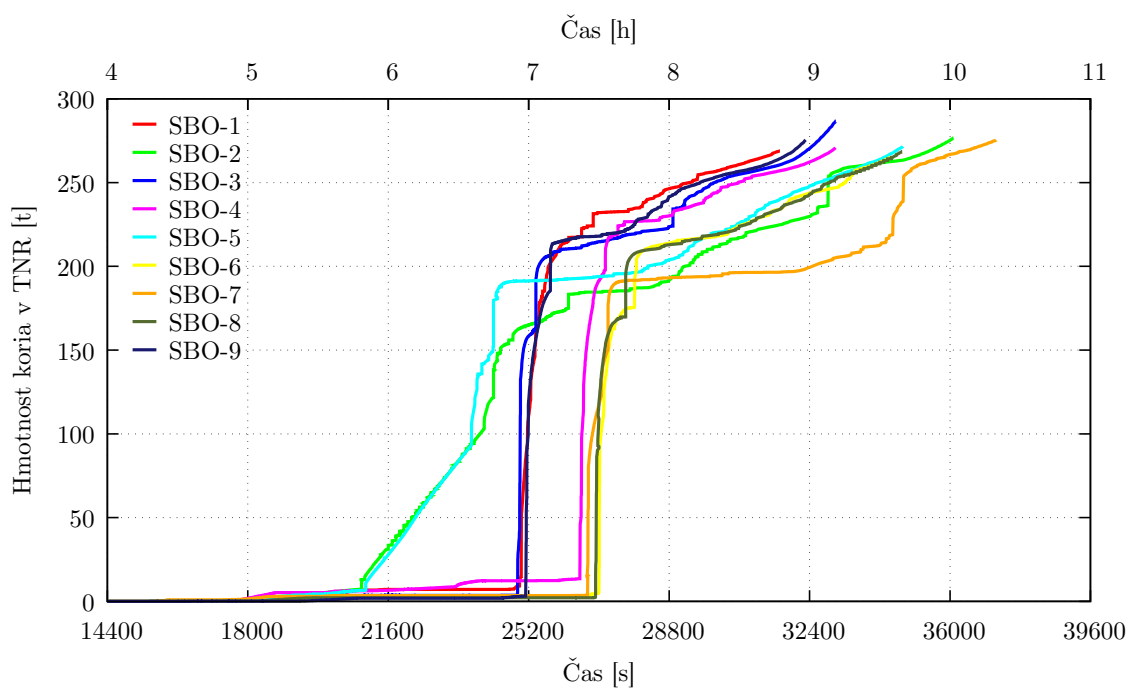
Obr. A.3: Selhání opěrné desky AZ ve výpočtu SBO-1, příloha pro str. 71.



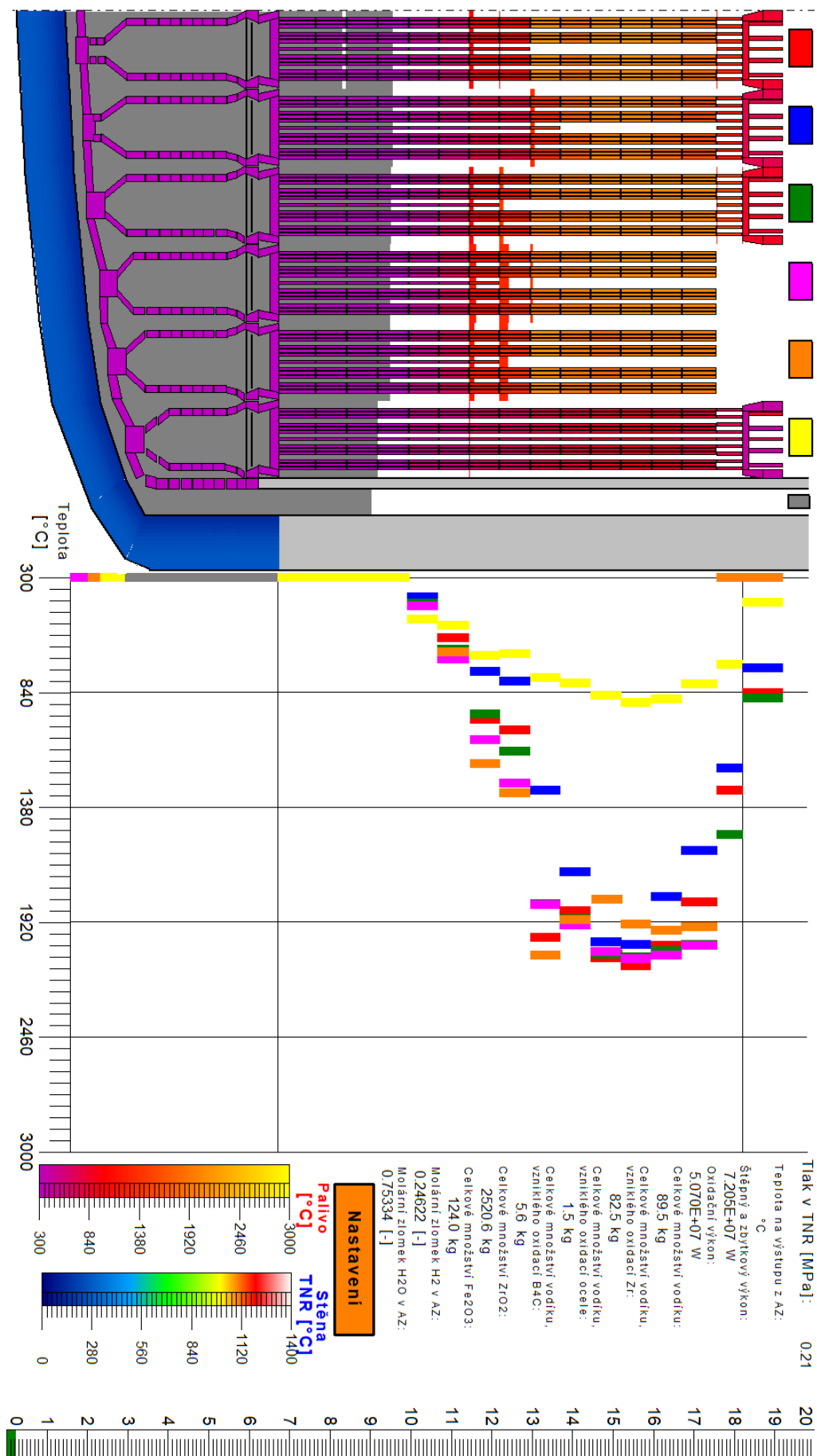
Obr. A.4: Moment před selháním dna TNR ve scénáři SBO, příloha pro str. 71.



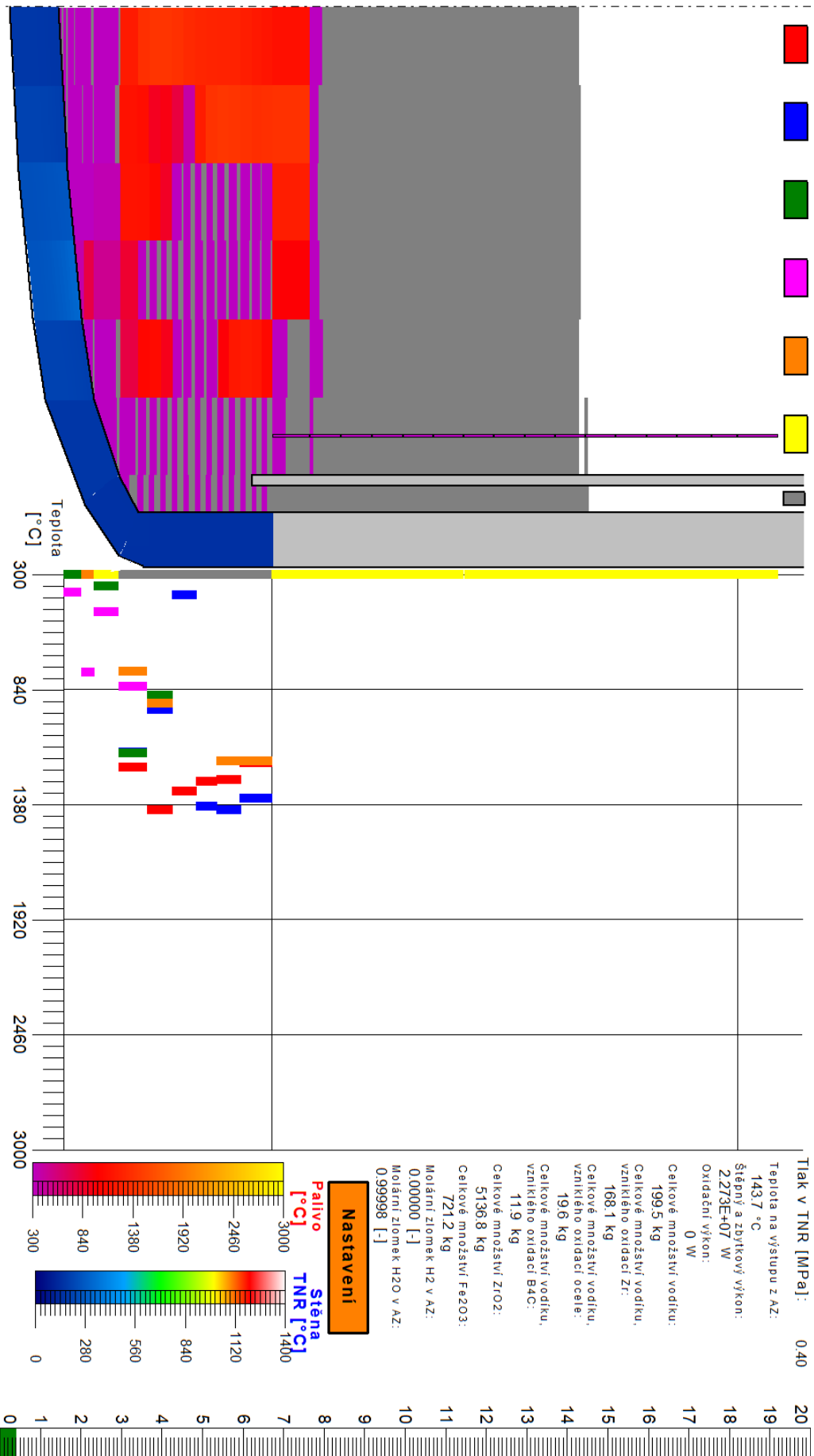
Obr. A.5: Složky produkce vodíku během výpočtu SBO-1. Prvotní oxidace nastává v momentě vyvažování chladiva v AZ. Druhý nárůst je pak spojen se selháním opěrné desky AZ a tvorbou páry z důvodu pádu koria do zbytků vody na dně TNR, příloha pro str. 70.



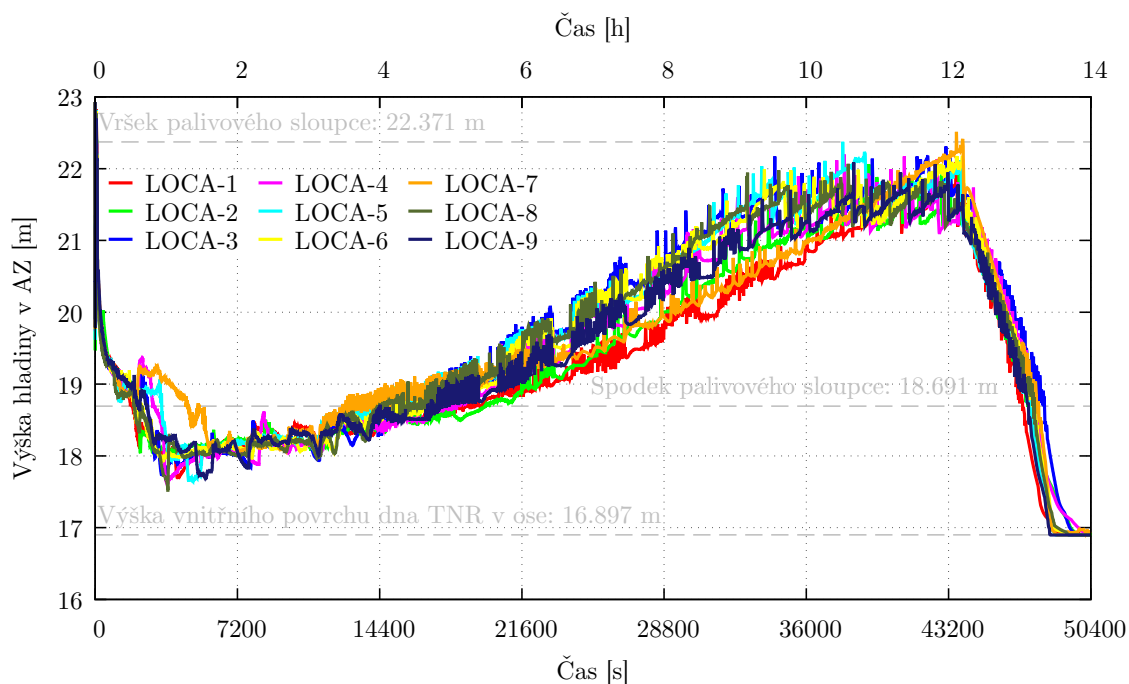
Obr. A.6: Celková hmotnost koria v TNR ve scénáři SBO, příloha pro str. 71,72.



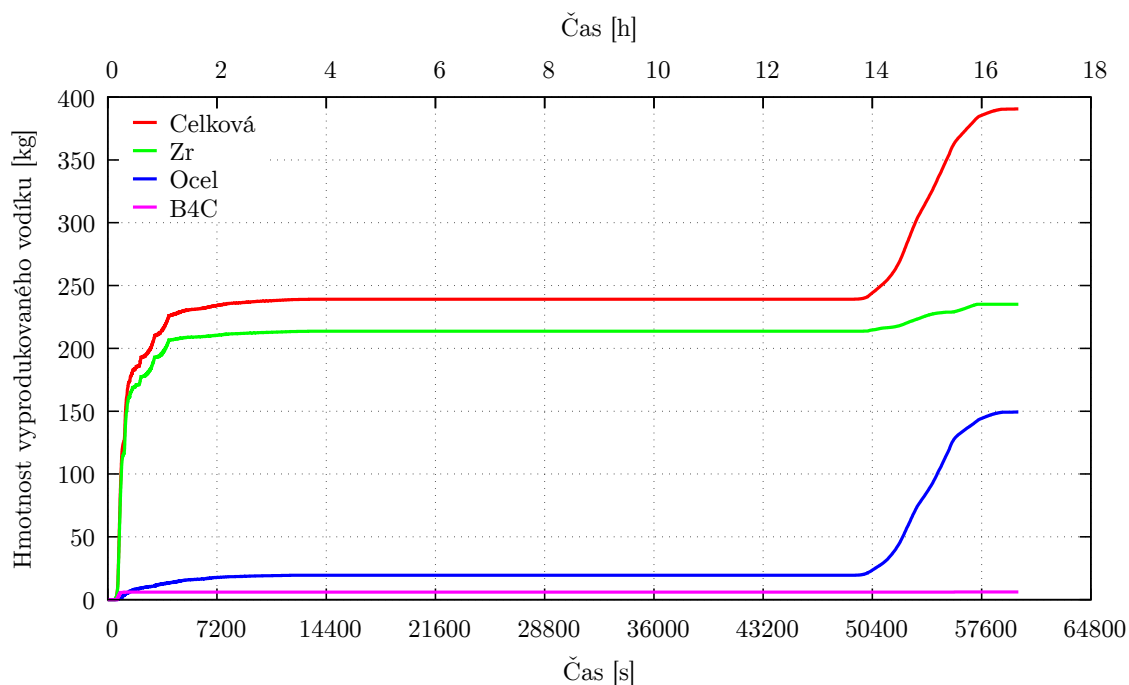
Obr. A.7: Počátek degradace AZ ve scénáři LOCA již 15 min po IU, příloha pro str. 73.



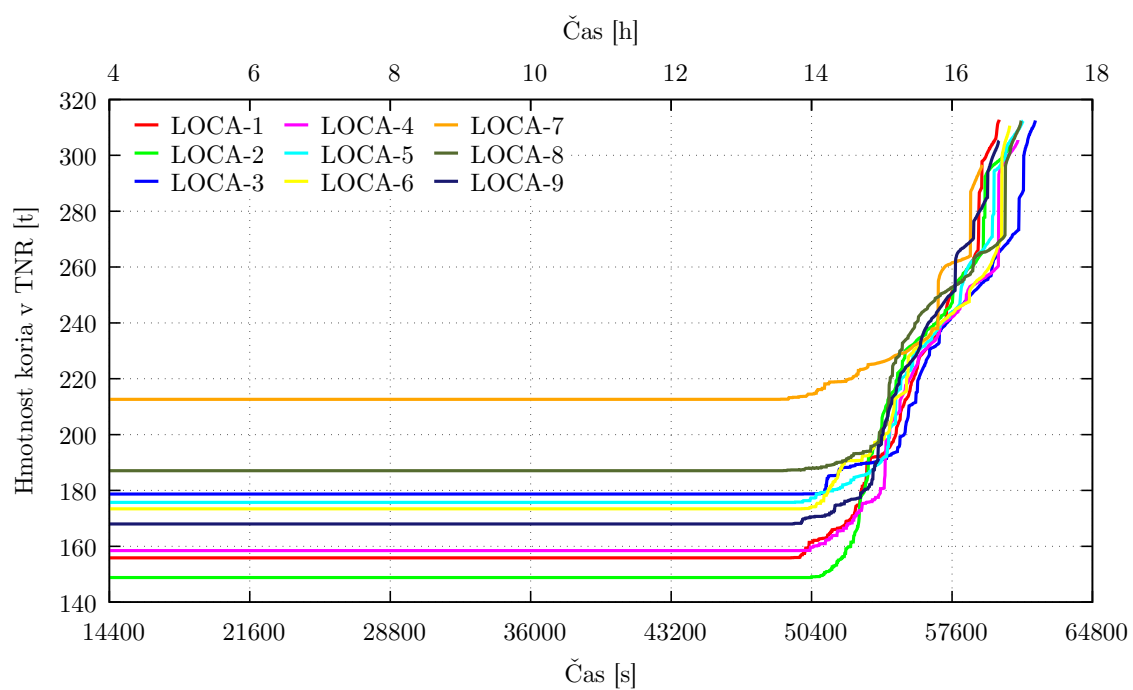
Obr. A.8: Znovuzaplavení AZ systémem diverzního doplňování během výpočtu LOCA-6 ve scénáři LOCA, příloha pro str. 73.



Obr. A.9: Hladina chladiva v AZ ve scénáři LOCA, příloha pro str. 73.



Obr. A.10: Složky produkce vodíku během výpočtu LOCA-6. Po prvotní prudké oxidaci při obnažení AZ nastává *steam starvation* až do momentu opětovného varu chladiva po znovuzaplavení AZ, příloha pro str. 73.



Obr. A.11: Celková hmotnost koria v TNR ve scénáři LOCA, příloha pro str. 74.

Příloha B

Výsledky analýzy rozptylu

Tab. B.1: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{H_2} ve scénáři SBO, příloha pro str. 67.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	3,69455e+03	2	1,84727e+03	1,21964e+00	3,59368e-01
Reziduální	9,08767e+03	6	1,51461e+03		
Celkem	1,27822e+04	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,54965e+03	2	1,27482e+03	7,47510e-01	5,13021e-01
Reziduální	1,02326e+04	6	1,70543e+03		
Celkem	1,27822e+04	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	4,39382e+03	2	2,19691e+03	1,57139e+00	2,82630e-01
Reziduální	8,38839e+03	6	1,39807e+03		
Celkem	1,27822e+04	8			

(d) Variovaný parametr: ξ

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,14420e+03	2	1,07210e+03	6,04680e-01	5,76453e-01
Reziduální	1,06380e+04	6	1,77300e+03		
Celkem	1,27822e+04	8			

Tab. B.2: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{tav} ve scénáři SBO, příloha pro str. 67.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,71923e+09	2	1,35962e+09	3,03660e+00	1,22740e-01
Reziduální	2,68646e+09	6	4,47743e+08		
Celkem	5,40569e+09	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,01362e+09	2	5,06812e+08	6,92355e-01	5,36356e-01
Reziduální	4,39207e+09	6	7,32012e+08		
Celkem	5,40569e+09	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,09004e+08	2	5,45021e+07	6,17390e-02	9,40718e-01
Reziduální	5,29669e+09	6	8,82781e+08		
Celkem	5,40569e+09	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,56383e+09	2	7,81916e+08	1,22115e+00	3,58980e-01
Reziduální	3,84186e+09	6	6,40310e+08		
Celkem	5,40569e+09	8			

Tab. B.3: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM $m_{\xi P}$ ve scénáři SBO, příloha pro str. 67.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	3,30544e+03	2	1,65272e+03	2,86058e-01	7,60918e-01
Reziduální	3,46654e+04	6	5,77756e+03		
Celkem	3,79708e+04	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	3,18144e+03	2	1,59072e+03	2,74346e-01	7,69113e-01
Reziduální	3,47894e+04	6	5,79823e+03		
Celkem	3,79708e+04	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	8,79829e+03	2	4,39914e+03	9,04785e-01	4,53495e-01
Reziduální	2,91725e+04	6	4,86209e+03		
Celkem	3,79708e+04	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,26857e+04	2	1,13428e+04	4,45248e+00	6,52320e-02
Reziduální	1,52852e+04	6	2,54753e+03		
Celkem	3,79708e+04	8			

Tab. B.4: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM τ_{end} ve scénáři SBO, příloha pro str. 67.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,57293e+06	2	1,28646e+06	3,30822e-01	7,30650e-01
Reziduální	2,33321e+07	6	3,88869e+06		
Celkem	2,59050e+07	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,11622e+07	2	5,58109e+06	2,27137e+00	1,84329e-01
Reziduální	1,47429e+07	6	2,45714e+06		
Celkem	2,59050e+07	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	3,83428e+06	2	1,91714e+06	5,21180e-01	6,18442e-01
Reziduální	2,20708e+07	6	3,67846e+06		
Celkem	2,59050e+07	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	8,33566e+06	2	4,16783e+06	1,42333e+00	3,11973e-01
Reziduální	1,75694e+07	6	2,92823e+06		
Celkem	2,59050e+07	8			

Tab. B.5: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{H_2} ve scénáři LOCA, příloha pro str. 72.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	7,11751e+03	2	3,55875e+03	2,30885	0,180453
Reziduální	9,24814e+03	6	1,54136e+03		
Celkem	1,63656e+04	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,20627e+03	2	1,10313e+03	4,67450e-01	6,47639e-01
Reziduální	1,41594e+04	6	2,35990e+03		
Celkem	1,63656e+04	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,90006e+02	2	1,45003e+02	5,41202e-02	9,47775e-01
Reziduální	1,60756e+04	6	2,67927e+03		
Celkem	1,63656e+04	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	6,75186e+03	2	3,37593e+03	2,10693e+00	2,02714e-01
Reziduální	9,61378e+03	6	1,60230e+03		
Celkem	1,63656e+04	8			

Tab. B.6: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM m_{tav} ve scénáři LOCA, příloha pro str. 72.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,02681e+09	2	5,13405e+08	1,31079e+00	3,37048e-01
Reziduální	2,35005e+09	6	3,91675e+08		
Celkem	3,37686e+09	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	9,32604e+08	2	4,66302e+08	1,14465e+00	3,79229e-01
Reziduální	2,44426e+09	6	4,07376e+08		
Celkem	3,37686e+09	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,34025e+09	2	6,70123e+08	1,97422e+00	2,19375e-01
Reziduální	2,03662e+09	6	3,39436e+08		
Celkem	3,37686e+09	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	7,72018e+07	2	3,86009e+07	7,01907e-02	9,32970e-01
Reziduální	3,29966e+09	6	5,49943e+08		
Celkem	3,37686e+09	8			

Tab. B.7: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM $m_{\xi P}$ ve scénáři LOCA, příloha pro str. 72.**(a)** Variovaný parametr: t_{AZ}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	9,39705e+05	2	4,69852e+05	1,50402e-01	8,63507e-01
Reziduální	1,87439e+07	6	3,12398e+06		
Celkem	1,96836e+07	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	6,82774e+06	2	3,41387e+06	1,59330e+00	2,78606e-01
Reziduální	1,28559e+07	6	2,14264e+06		
Celkem	1,96836e+07	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,17541e+06	2	5,87706e+05	1,90523e-01	8,31339e-01
Reziduální	1,85082e+07	6	3,08470e+06		
Celkem	1,96836e+07	8			

(d) Variovaný parametr: ξ

Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,07407e+07	2	5,37037e+06	3,60313e+00	9,37810e-02
Reziduální	8,94286e+06	6	1,49048e+06		
Celkem	1,96836e+07	8			

Tab. B.8: Výsledek analýzy rozptylu pro FOM τ_{fail} ve scénáři LOCA, příloha pro str. 72.

(a) Variovaný parametr: t_{AZ}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	6,82784e+05	2	3,41392e+05	4,47423e-01	6,58992e-01
Reziduální	4,57811e+06	6	7,63018e+05		
Celkem	5,26089e+06	8			

(b) Variovaný parametr: T_{SS}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	1,11977e+06	2	5,59885e+05	8,11206e-01	4,87726e-01
Reziduální	4,14113e+06	6	6,90188e+05		
Celkem	5,26089e+06	8			

(c) Variovaný parametr: SC_{B_4C}					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	2,57022e+06	2	1,28511e+06	2,86571e+00	1,33784e-01
Reziduální	2,69067e+06	6	4,48445e+05		
Celkem	5,26089e+06	8			

(d) Variovaný parametr: ξ					
Zdroj variability	S	f	S/f	F-hodnota	p-hodnota
Skupiny	8,88117e+05	2	4,44059e+05	6,09304e-01	5,74240e-01
Reziduální	4,37278e+06	6	7,28796e+05		
Celkem	5,26089e+06	8			