

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav energetiky



**Hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti
v úrovních ochrany do hloubky pro soubor opatření
pro zmírňování následků těžkých havárií v rámci
Funkčních Analýz ochrany do hloubky na Jaderné
elektrárně Temelín**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracovala: Bc. Klára Brázdová

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.

Rok: 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brázdová** Jméno: **Klára** Osobní číslo: **437378**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Jaderná energetická zařízení**
Studijní obor: **Jaderná energetická zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti pro soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií v úrovních ochrany do hloubky v rámci Funkčních Analýz ochrany do hloubky ETE.

Název diplomové práce anglicky:

Assessment of Completeness, Robustness and Independence of a Set of Measures to Mitigate the Consequences of Severe Accidents of Individual Levels in Defense in Depth at NPP Temelin Using Functional Analysis.

Pokyny pro vypracování:

1. Stručný popis filosofie a legislativních požadavků pro aplikaci konceptu ochrany do hloubky v projektech JE.
2. Rešerše k těžkým haváriím (TH), požadavky z české a mezinárodní jaderné legislativy (nAZ, vyhlášky, IAEA).
3. Možnosti řešení TH pro ETE. Způsoby a technická řešení souborů opatření pro zmírňování následků TH, požadavky na tyto soubory opatření.
4. Zpracování funkčních řetězců pro soubor opatření pro zmírňování následků TH popisující jejich podíl na plnění typových funkcí, respektive základních bezpečnostních funkcí a dále definování rozsahu jejich požadovaných podpůrných funkcí a projektových opatření pro stavy DiD 4 a DiD 5.
5. Vypracování dílčí mapy funkcí shrnující podíl souboru opatření pro zmírňování následků TH na typových funkcích pro reaktivitu, zásobu chladiva, odvod tepla z I.O. a zabránění šíření RA látek. Součástí práce bude zařazení příslušných FaSK do linií v odpovídajících úrovních DID.
6. Zpracování vlivu dvou vybraných hrozeb na soubor opatření pro zmírňování následků TH a vyhodnocení změn celkových funkčních řetězců pro typové funkce zásoby chladiva a odvodu tepla z IO vynucených aplikací těchto hrozeb.

Seznam doporučené literatury:

- [1] IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna (2016).
- [2] Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ze dne 14. července 2016
- [3] Vyhláška č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, ze dne 26. září 2017
- [4] IAEA, Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants, Safety Reports Series No. 46, IAEA, Vienna (2005).
- [5] IAEA, WWER-1000 Reactor Simulator, Training Course Series No. 21, IAEA, Vienna (2003).
- [6] NEA (2016), Implementation of Defence in Depth at Nuclear Power Plants: Lessons Learnt from the Fukushima Daiichi Accident, Nuclear Regulation, OECD Publishing, Paris,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

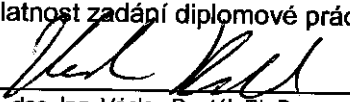
doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., ústav energetiky FS

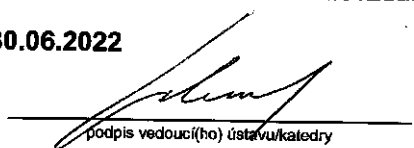
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.10.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **23.12.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.06.2022**


doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení:

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

V Praze dne 6. listopadu 2020

.....
Bc. Klára Brázdová

Poděkování:

Děkuji panu Václavu Dostálovi za vedení této diplomové práce, jeho ochotu a čas. Dále bych ráda poděkovala Václavu Haklovi, Milanu Krivdovi a Lucii Hinterholzingerové za jejich čas, neustávající trpělivost a mnoho cenných rad, které mi v průběhu vypracování této diplomové práce věnovali.

Také děkuji mým rodičům a sourozencům, kteří mi byli při celém studiu na FS ČVUT oporou. A v neposlední řadě chci poděkovat Jessice Neherové a Iljovi Hylasovi, kteří byli posledními kritiky všech napsaných textů a velkým zdrojem motivace k dokončení studia.

Název práce: Hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti úrovní ochrany do hloubky pro soubor opatření pro řešení těžkých havárií v rámci Funkčních Analýz ochrany do hloubky na Jaderné elektrárně Temelín

Autor: Bc. Klára Brázdová

Obor: Jaderná energetická zařízení

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D., Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze

Abstrakt: Tato diplomová práce popisuje proces sestavování datového modelu Funkčních analýz ochrany do hloubky pro soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií navrženého pro implementaci na Jaderné elektrárně Temelín. Pro sestavený datový model bylo provedeno hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky. Hodnocení robustnosti bylo provedeno i pro stávající fyzický stav zařízení Jaderné elektrárny Temelín.

Klíčová slova: těžké havárie, ochrana do hloubky, základní bezpečnostní funkce, Funkční analýzy ochrany do hloubky, Elektrárna Temelín

Title: Assessment of Completeness, Robustness and Independence of a Set of Measures to Mitigate the Consequences of Severe Accidents of Individual Levels in Defence in Depth at NPP Temelin Using Functional Analysis

Author: Bc. Klára Brázdová

Abstract: This diploma thesis is focused on the process of making of the Functional Analysis of the Defence in Depth data module for the Set of Measures to Mitigate the Consequences of Severe Accidents designed for its implementation at Nuclear Power Plant Temelin. Once the data module was completed, the evaluation the completeness, robustness and independence of defence in depth levels was executed. The evaluation of robustness was also executed for current state of Nuclear Power Plant Temelín's equipment.

Key words: Severe Accidents, Defence in Depth, Fundamental Safety Functions, Functional Analysis, Nuclear Power Plant Temelin

Obsah

Seznam zkratek	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Ochrana do hloubky	14
2.1 Úrovně ochrany do hloubky	15
2.1.1 Charakteristiky jednotlivých úrovní ochrany do hloubky	16
2.1.2 Organizační opatření pro zajištění jednotlivých úrovní ochrany do hloubky	18
3 Obecný úvod do problematiky těžkých havárií	20
3.1 Jevy vyskytující se při těžké havárii	21
3.2 Cíle při zmírňování následků těžkých havárií	22
3.2.1 Opatření pro zajištění první základní bezpečnostní funkce	23
3.2.2 Opatření pro obnovení druhé základní bezpečnostní funkce	23
3.2.3 Opatření pro zajištění třetí základní bezpečnostní funkce	24
3.3 Legislativní požadavky na zmírňování následků těžkých havárií	25
3.3.1 Požadavky na řešení těžkých havárií uvedené v české legislativě a dalších dokumentech	25
3.3.2 Požadavky uvedené v mezinárodních dokumentech	26
4 Prostředky pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín	27
4.1 Odtlakování primárního okruhu	28
4.2 Odvod tepla a stabilizace taveniny v tlakové nádobě reaktoru	29
4.3 Likvidace pohavarijního vodíku v hermetické obálce	32
4.4 Dlouhodobý odvod tepla z hermetické obálky	33
4.5 Filtrovaný venting	33
5 Funkční analýzy v úrovních ochrany do hloubky	36
5.1 Vymezení pojmů FA DiD	36
5.2 Struktura modelu	40
6 Sestavení datového modelu Funkčních analýz ochrany do hloubky	41
6.1 Stanovení typových funkcí a vlastností	41
6.2 Stanovení specifických funkcí a projektových opatření	44
6.2.1 Diverzní prostředek pro odtlakování I.O.	45
6.2.2 Zaplavení AZ v TNR a dlouhodobý odvod tepla z HO	46
6.2.3 Systém spalování vodíku v hermetické obálce	47
6.2.4 Filtrovaný venting HO	48
6.2.5 Podpurné systémy	48
6.3 Funkční řetězce	54
6.3.1 Řízení reaktivity	55

6.3.2	Zajištění zásoby chladiva	57
6.3.3	Zajištění odvodu tepla z AZ/TNR	60
6.3.4	Omezení úniků radioaktivních látek	63
6.3.5	Zajištění integrity fyzických bariér	66
6.3.6	Podpůrné systémy	68
6.4	Mapa funkcí	69
6.5	Definice hrozeb	71
7	Hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti	76
7.1	Úplnost	76
7.1.1	Postup hodnocení	76
	Kontrola plnění TxF/TBV v požadovaných úrovních DiD	76
	Kontrola linií DiD a funkčních řetězců	77
	Kontrola FaSK a jejich SxF/POx	77
7.1.2	Vyhodnocení úplnosti	78
	Kontrola plnění TxF/TBV v požadovaných úrovních DiD	78
	Kontrola linií DiD a funkčních řetězců	79
	Kontrola FaSK a jejich SxF/POx	79
7.2	Robustnost	79
7.2.1	Postup hodnocení	80
7.2.2	Vyhodnocení robustnosti	81
	TH vzniklá v důsledku nezvládnuté LOCA havárie	81
	TH vzniklá v důsledku nezvládnutého SBO	82
7.3	Nezávislost	83
7.3.1	Postup hodnocení	84
7.3.2	Vyhodnocení úplnosti	85
	Priorita 1	85
	Priorita 2	85
8	Závěr	86
	Literatura	87
	Seznam příloh	89

Seznam zkratek

ALT	Alternativní prostředek
AM	Havarijní předpisy (ang. Accident Management)
AZ	Aktivní zóna
BD	Bloková dozorna
BDBA	Nadprojektová havárie (ang. Beyond Design Basis Accident)
BSVP	Bazén skladování vyhořelého jaderného paliva
CFŘ	Celkový funkční řetězec
DBA	Základní projektová nehoda (ang. Design Basis Accident)
DEC	Rozšířené projektové podmínky (ang. Design Extension Conditions)
DG	Diesलगenerátor/diesलगenerátorový
DGČ	Diesलगenerátorové čerpadlo
DiD	Ochrana do hloubky (ang. Defence in Depth)
DIV	Diverzní prostředek
EDU	Elektrárna Dukovany
ENSREG	Evropské společenství jaderných dozorů (ang. The European Nuclear Safety Regulators Group)
EOPs	Havarijní provozní předpisy (ang. Emergency Operation Procedures)
ETE	Elektrárna Temelín
ExVC	Strategie lokalizace taveniny mimo tlakovou nádobu reaktoru (Ex-Vessel Cooling)
FA DiD	Funkční analýza ochrany do hloubky (ang. Functional Analysis of the Defence in Depth)
FaSK	Funkční analytická skupina
FCVS	Fitrovaný venting hermetické obálky (ang. Filtered Venting Containment System)
FSK	Funkční skupina
HO	Hermetická obálka
HPME	Vysokotlaké vypuzení taveniny (ang. High Pressure Melt Ejection)
HVB	Hlavní výrobní blok
HZSp	Hasičský záchranný sbor podniku
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (ang. International Atomic Energy Agency)
IVR-In	Strategie lokalizace taveniny v tlakové nádobě reaktoru chlazením taveniny uvnitř tlakové nádoby reaktoru (ang. In-Vessel Retention)
IVR-Ex	Strategie lokalizace taveniny v tlakové nádobě reaktoru kombinací chlazení taveniny i vnější stěny tlakové nádoby reaktoru (ang. In-Vessel Retention)
I.O.	Primární okruh
JE	Jaderná elektrárna
LOCA	Havárie se ztrátou chladiva (ang. Loss of Coolant Accident)
MČS	Mobilní čerpací stanice
mDG	Mobilní diesलगenerátor
NaCP	Po fukušimský národní akční plán
ND	Nouzová dozorna
PAMS	Pohavarijní monitorovací systém (ang. Post Accident monitoring System)

PAR	Pasivní autokatalytické rekombinátořy (ang. Passive Autocatalytic Recombiners)
PCFŘ	Počáteční celkový funkční řetzec
PIU	Postulovaná iniciační událost
POB	Projektové opatření bezpečnostní
POP	Projektové opatření provozní
POV	Projektové opatření s vlivem na jadernou bezpečnost
POx	Projektová opatření
PpBZ	Předprovozní bezpečnostní zpráva
PRV	Provision
RA	Radioaktivní látky
RČA	Rychločinné armatury
SAMG	Návody pro zvládání těžkých havárií (ang. Severe Accident Management Guidelines)
SAMS	Monitorovací systém pro těžké havárie (ang. Severe Accident Monitoring System)
SBF	Specifická bezpečnostní funkce
SBO	Havárie se ztráta elektrického napájení (ang. Station Black Out)
SKK	Systémy, konstrukce a komponenty
SKŘ	Systém kontroly a řízení
SPF	Specifická provozní funkce
SUB	Substituce typové funkce
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SVF	Specifická funkce s vlivem na jadernou bezpečnost
SxF	Specifická funkce
SZN	Systém zajištěného napájení
TB	Systém nádrží reagentů
TBF	Typová bezpečnostní funkce
TBV	Typová funkce s vlivem na jadernou bezpečnost
TH	Těžká havárie
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
TPF	Typová provozní funkce
TPS	Technické podpůrné středisko
TQ	Havarijní systémy chlazení zóny
TVD	Technická voda důležitá
TVF	Typová funkce s vlivem na jadernou bezpečnost
TxF	Typová funkce
VCFŘ	Výsledný celkový funkční řetzec
VF	Systém technické vody důležité
VZ	Vybraná zařízení
WANO	Světové sdružení provozovatelů jaderných elektráren (ang. The World Association of Nuclear Operators)
WENRA	Asociace západoevropských dozorných orgánů (ang. Western European Nuclear Regulators Association)
ZBF	Základní bezpečnostní funkce
ZPP	Základní projektové prostředky

Seznam obrázků

1	Schématické znázornění odstupňovaného přístupu ochrany do hloubky.	14
2	Schématické znázornění jevů vyskytujících se při těžké havárii.	21
3	Schématické znázornění IVR-Ex na VVER 400 V213.	24
4	Schéma lapače taveniny reaktoru VVER 1200.	24
5	Schéma obecného sledu činností při zmírňování následků TH na ETE .	28
6	Schéma ZPP, DIV a ALT prostředků doplňování chladiva do TNR. . .	31
7	Schéma umístění PAR ve vybraných místnostech hermetické obálky na ETE	32
8	Pasivní autokatalytický rekombinátor společnosti AREVA.	32
9	Schéma vazeb mezi bezpečnostními a provozními funkcemi.	37
10	Umístění jednotlivých prvků na funkčním řetězci.	55
11	Funkční řetězec Re-017 – Udržení jaderného reaktoru v podmínkách bezpečného odstavení v TH.	56
12	Funkční řetězec Re-018 – Zabránění nepřijatelným přechodovým procesů v TH.	57
13	Funkční řetězec Z-010 – Zdroje vody pro IVR-In.	58
14	Funkční řetězec Z-017 – Udržení zásoby chladiva ALT (mobilními) prostředky pro odtlakovaný I.O. v DEC B.	59
15	Funkční řetězec Z-019 – Udržení zásoby chladiva ALT (mobilními) prostředky pro natlakovaný I.O. v DEC B.	59
16	Funkční řetězec O-014 – Feed & Bleed – Systém pro odtlakování I.O. .	61
17	Funkční řetězec O-037 – Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnuté LOCA.	62
18	Funkční řetězec O-038 – Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnutého SBO.	62
19	Funkční řetězec U-006 – Únik z HO v DEC B – úplná ztráta el. napájení.	64
20	Funkční řetězec U-007 – Úniky z HO v DEC B.	64
21	Funkční řetězec U-008 – Úniky z HO v DiD 5.	65
22	Funkční řetězec U-032 – Filtrovaný venting.	65
23	Funkční řetězec I-017 – Integrita hermetické obálky v DEC B	67
24	Funkční řetězec I-018 – Integrita hermetického obálky v DiD 5	67
25	Funkční řetězec Pr-213 – Systém spalování vodíku v hermetické obálce v DEC B.	68
26	Funkční řetězec O-055 – Odvod tepla z NTTQ výměníku v DEC B. . .	69
27	Výřez mapy funkcí s vertikálním a horizontálním dělením buněk mapy funkcí.	71
28	Schéma procesu hodnocení nezávislosti linií DiD.	85

Seznam tabulek

1	Dělení jednotlivých úrovní ochrany do hloubky dle IAEA a WENRA. . .	16
2	Požadavky na plnění TxF/TBV v různých úrovních DiD.	42
3	Vysvětlivky ke značení plnění TxF/TBV v Tab. 2	44
4	Seznam SxF a POx pro DIV prostředek pro odtlakování I.O.	46
5	Seznam SxF a POx pro soubor opatření pro zaplavení TNR a dlouho- dobý odvod tepla z HO (TB 60 a VF 90).	46
6	Seznam SxF a POx pro systém spalování vodíku v HO.	47
7	Seznam SxF a POx pro ALT prostředek filtrovaného ventingu HO . . .	48
8	Seznam podpurných SxF/POx pro soubor opatření pro zmírňování ná- sledků TH.	49
9	Barevné rozlišení SxF/POx na funkčních řetězcích podle náležitosti k pro- fesím.	55
10	Seznam funkčních řetězců v SUB řízení reaktivity.	56
11	Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění zásoby chladiva.	57
12	Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění odvodu tepla z AZ/TNR. . .	60
13	Seznam funkčních řetězců v SUB omezení úniků RA látek.	63
14	Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění integrity fyzických bariér. . .	66
15	Seznam vybraných funkčních řetězců v SUB podpurných systémů. . . .	68
16	Seznam linií DiD, na jejichž zajištění se podílí soubor opatření pro zmír- ňování následků TH.	70
17	Odolnost FaSK a jejich SxF/POx na mechanismy hodnocených hrozeb. . .	72
18	Výstup kontroly plnění TxF/TBV ze softwarového nástroje HIDRA. . .	79
19	Přechod mezi úrovněmi DiD z PCFŘ do VCFŘ v rámci uvažovaných SUB a částí SUB podpurných systémů při nízkotlaké sekvenci.	81
20	Přechod mezi úrovněmi DiD z PCFŘ do VCFŘ v rámci uvažovaných SUB a částí SUB podpurných systémů při vysokotlaké sekvenci.	82

1 Úvod

Jedním z hlavních cílů provozovatele jaderné elektrárny je její bezpečný provoz. Podle Zák. č. 263/2016 Sb., atomového zákona je bezpečnost provozu jaderné elektrárny, resp. jaderná bezpečnost, definována jako „stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob jej obsluhujících zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce, úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod“ [1]. Tento zmiňovaný stav a schopnost jaderného zařízení, ale i personálu jej obsluhujícího, je předmětem mnoha hodnocení. Funkční analýzy ochrany do hloubky jsou jednou z možných metod hodnocení jaderné bezpečnosti.

Metoda Funkčních analýz ochrany do hloubky byla vytvořena pro potřeby splnění podmínky A4, která je součástí souboru podmínek povolení prodloužení provozu pro stávající bloky Jaderné elektrárny Dukovany. Toto povolení udělil Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) provozovateli českých jaderných elektráren, společnosti ČEZ, v Rozhodnutí č.j. SÚJB/OHJB/4932/2016 [2]. Samotná podmínka A4 zní:

„Žadatel zpracuje do PpBZ projektová východiska (pro jednotlivá VZ systémů elektrických, SKŘ, strojních a pro stavební konstrukce důležité pro plnění bezpečnostních funkcí) včetně:

- i. *projektových kritérií,*
- ii. *výsledků analýz souladu s projektovými východisky,*
- iii. *výsledků analýz plnění projektových kritérií,*
- iv. *nezbytných bezpečnostních rezerv pro tato zařízení a konstrukce a*
- v. *specifikace úrovně ochrany do hloubky, které je daný systém součástí.*

Žadatel rovněž objasní míru fyzické a funkční nezávislosti mezi jednotlivými úrovněmi ochrany do hloubky na EDU.“ [2]

Vzhledem k tomu, že v budoucnosti bude podána žádost o prodloužení životnosti i stávajících bloků Jaderné elektrárny Temelín, již probíhají práce na hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky z pohledu ochrany fyzických bariér. K tomu je používán softwarový nástroj HIDRA nad datovým modelem Funkčních analýz ochrany do hloubky.

Tato diplomová práce se soustředí na dílčí hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti pomocí Funkčních analýz ochrany do hloubky pro soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií právě v lokalitě Jaderné elektrárny Temelín. Hlavní cíle této práce jsou dva – sestavení datového modelu a hodnocení úplnosti, robustnosti a míry nezávislosti jednotlivých úrovní ochrany do hloubky po aplikaci dvou vybraných hrozeb. Je možné předpokládat, že nebude dosaženo úplné nezávislosti prostředků používaných při těžké havárii a základních projektových prostředků, protože Jaderná elektrárna Temelín nebyla projektována na nadprojektové havárie.

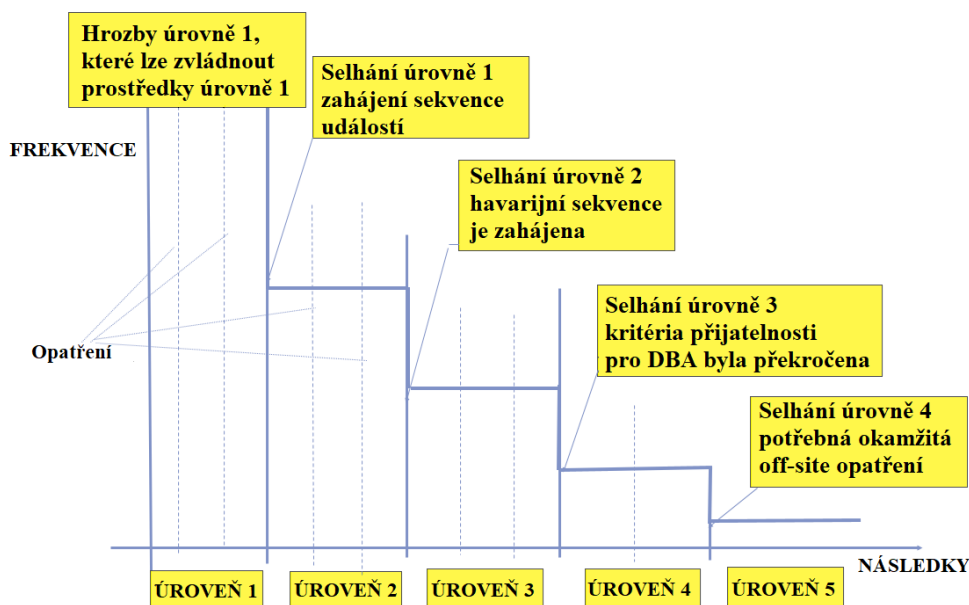
Tématem Funkčních analýz ochrany do hloubky se zabývala i Lucie Hinterholzingerová ve své diplomové práci [3], která hodnotila úplnost, robustnost a nezávislost v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky pro havarijní systém chlazení zóny na Jaderné elektrárně Temelín. Vzhledem k návaznosti souboru opatření pro zmírňování následků těžkých havárií na havarijní systém chlazení zóny se její a tato diplomová práce částečně překrývají v mapě funkcí v úrovních DiD 3a, 3b.

2 Ochrana do hloubky

Jedním ze základních bezpečnostních principů pro zajištění jaderné bezpečnosti je i tzv. koncepce ochrany do hloubky (ang. Defence in Depth – DiD), která má dva základní cíle – prevenci nehod a zmírňování následků nehod a havárií. Důležitými požadavky na tuto koncepci jsou co největší robustnost fyzických bariér, prostředků a opatření v úrovních DiD a co největší míra nezávislosti jednotlivých úrovní DiD. Ve své podstatě je tato koncepce založena na principu armádní obranné strategie, kde obrana nezávisí pouze na jedné velké obranné linii, ale na soustavě několika menších vzájemně se podporujících nezávislých obranných liniích. Proto v případě, kdy je prolomena jedna obranná linie, nedojde ke kolapsu celé obrany, ale následující obranná linie přebírá funkci té předchozí.

V jaderné bezpečnosti princip DiD znamená použití vícenásobných fyzických bariér, které jsou zachovávané pomocí víceúrovňového systému technických a organizačních opatření. Fyzické bariéry tvoří překážky mezi zdrojem radiace a radioaktivních látek (RA) a pracovníky, obyvatelstvem a životním prostředím. V současné době jsou uvažovány tři, v některých zdrojích čtyři¹, stupně fyzických bariér – pokrytí jaderného paliva, tlaková hranice primárního okruhu (I.O.) a ochranná obálka. Technická a organizační opatření pak zajišťují prevenci před selháním zmíněných fyzických bariér. Současná koncepce DiD se skládá z pěti úrovní DiD. [4]

Koncepce DiD je založena na odstupňovaném přístupu, kdy jsou použitá technická a organizační opatření dimenzována v závislosti na frekvenci výskytu, následcích a závažnosti porušení dané úrovně DiD, resp. fyzických bariér. Frekvence výskytu hrozeb v úrovni 1 je výrazně vyšší než v úrovni 2 a následky nezvládnutí úrovně 1 jsou menší než při nezvládnutí úrovně 2. Z toho důvodu události s nízkou frekvencí výskytu automaticky spadají do vyšší úrovně DiD. Schématické znázornění tohoto přístupu DiD je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1. Schématické znázornění odstupňovaného přístupu DiD. [5]

¹Určitá část odborné veřejnosti považuje za čtvrtou fyzickou bariéru matici jaderného paliva.

U fyzických bariér je důležitá zejména jejich robustnost vůči jednotlivým hrozbám a míra jejich vzájemné nezávislosti. Požadavek na robustnost konkrétní bariéry určuje její schopnost zvládnout projektovou iniciační událost (PIU) vyvolanou vnitřními nebo vnějšími přírodními vlivy nebo lidskou činností včetně jejich kombinací. Potřebná míra nezávislosti může být zajištěna různými prostředky, principy nebo jejich kombinací a zajišťuje požadovanou bezpečnostní funkci tak, aby byla odolná proti poruchám se společnou příčinou. Požadavek na vzájemnou nezávislost ve výsledku znamená, že v okamžiku selhání jedné bariéry nedojde k okamžitému selhání bariéry další (např. selháním integrity pokrytí paliva nedojde k okamžitému selhání integrity I.O.). [6]

Potřeba použití DiD, jako jeden ze základních principů jaderné bezpečnosti, plyne z českých legislativních požadavků uvedených například v § 45 odst. 1 Zák. č. 263/2016 Sb., atomový zákon [1] nebo v § 6 odst. 1 Vyhl. č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt [7]. Mimo jiné tato potřeba plyne i z dokumentů Mezinárodní agentury pro atomovou energii (ang. International Atomic Energy Agency – IAEA), kde je tato potřeba vyjádřena například v Requirement 7 IAEA Safety Standart SSR 2/1 [6].

2.1 Úrovně ochrany do hloubky

Požadavky na jednotlivé úrovně DiD prošly od počátku jaderné energetiky, tedy 70. let minulého století, vývojem, který kopíruje potřeby zlepšení zejména po haváriích na jaderných elektrárnách (JE) Three Mile Island (1979), Černobyl (1986) a Fukušima (2011). Tato zlepšení se týkala především změny struktury jednotlivých úrovní DiD a úpravám požadavků na jednotlivé úrovně a jejich zajištění. Původní koncepce DiD se skládala ze tří úrovní, jejichž počet byl pak postupně zvýšen na pět úrovní DiD a po havárii na JE Fukušima byla vytvořena rozšířená koncepce DiD.

Rozšíření do té doby platné koncepce DiD bylo nezávisle na sobě vypracováno IAEA a Asociací západoevropských dozorných orgánů (ang. Western European Nuclear Regulators Association – WENRA). Hlavním rozdílem oproti předchozím verzím koncepce DiD bylo především nahrazení nedostačujícího termínu nadprojektová nehoda/havárie (ang. Beyond Design Basis Accident) za termín nadprojektové podmínky (ang. Design Extension Conditions – DEC). Termín DEC totiž pokrývá nejen situace obsažené v BDBA, ale také nové scénáře, které byly doplněny po zkušenostech s událostmi v JE Fukušima. Tyto scénáře jsou rozděleny do dvou kategorií na vícenásobnou postulovanou poruchovou událost bez významného tavení paliva (DEC A) a na postulovanou těžkou havárii (TH) s tavením paliva (DEC B). [6], [8]

Rozšířená koncepce DiD se skládá z pěti úrovní DiD, z nichž některé úrovně jsou dále členěny. Pro každou z úrovní DiD bývá používáno zkratkové označení pomocí schématu *DiD X*, kde *DiD* označuje, že jde o úroveň DiD a *X* značí konkrétní úroveň DiD označenou číslovkou. Rozdíly v přístupu WENRA a IAEA k rozšířené koncepci DiD jsou znatelné právě na zmíněném členění některých úrovní DiD (viz. Tab. 1 na následující straně). Rozšířená koncepce DiD se vztahuje zejména na nové projekty JE, ale v rozumné míře je možné ji aplikovat i na již provozované JE. [4]

Každou z úrovní DiD je možné charakterizovat pomocí několika parametrů. Mezi základní parametry patří asociovaný stav bloku a cíl, který má daná úroveň DiD plnit. Asociovaný stav bloku charakterizuje podmínky, ve kterých se blok JE v daném DiD nachází (např. normální provoz nebo nadprojektové podmínky). Cíl jednotlivých úrovní DiD stanovuje požadavky na technické a organizační prostředky pro zajištění stavu JE příslušného k dané úrovni DiD. Ve výsledku tedy cíl úrovně DiD odráží jednu

ze základních vlastností koncepce DiD – tzv. princip řízeného ústupu jednotlivých linií DiD v minimálním potřebném rozsahu. Tento princip znamená, že vyšší úroveň DiD přebírá plnění požadovaných funkcí v případě selhání nižší úrovně DiD, a jde o projektem předepsanou funkci, která souvisí s odolností systémů, konstrukcí a komponent (SKK) proti PIU a profesními i meziprofesními režimy práce SKK.

2.1.1 Charakteristiky jednotlivých úrovní ochrany do hloubky

Základní charakteristiky jednotlivých úrovní DiD zmíněné v předchozí podkapitole byly pro přehlednost zaneseny do Tab. 1. V této tabulce je současně uvedeno dělení úrovní DiD v rozšířené koncepci DiD podle WENRA i IAEA. Ale díky všeobecné preferenci dělení dle WENRA je v této diplomové práci použito značení úrovní DiD podle WENRA.

Tab. 1. Dělení jednotlivých úrovní DiD dle IAEA a WENRA včetně příslušných asociovaných stavů bloku a cílů. [8]

DiD WENRA	DiD IAEA	Asociovaný stav bloku	Cíl
1	1	Normální provoz	Předcházení odchylkám od normálního provozu, předcházení poruchám, prevence přechodu do abnormálního stavu.
2	2	Abnormální provoz	Identifikace poruch a zvládnutí očekávaných provozních událostí (náprava abnormálního provozu), prevence přechodu do DBA.
3a	3	DBA	Zvládnutí DBA a přechod do stabilizovaného a následně do bezpečného stavu, tj. zabránění rozvoji poruch, zadržení RA látek a prevence přechodu do DEC.
3b	4A	DEC A	Zvládnutí DEC A a prevence přechodu do DEC B.
4	4B	DEC B	Zmírňování následků DEC B, prevence časných a velkých úniků RA látek.
5	5	DEC B	Snižování dopadu úniků RA látek do okolí JE.

Asociovaným stavem v DiD 1 je normální provoz a cílem této úrovně je prevence odchylek od normálního provozu bloku (tj. abnormálnímu provozu) a poruch SKK důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti. Pro splnění zmíněných cílů slouží především vhodné umístění zařízení, konzervativní přístup k projektu, vhodné inherentní vlastnosti systémů a zajištění designu, konstrukce, údržby a provozu v souladu s programem zajištění kvality a provozními zkušenostmi. Aby byly tyto požadavky splněny, je kladen velký důraz na výběr vhodných výpočetních kódů a použitých materiálů, zajištění kvality v celém procesu výstavby i provozu. Tomu předchází podrobná analýza, která určuje požadavky na provoz a údržbu bloku včetně požadavků na program zajištění kvality pro provoz a údržbu. [6] V případě porušení první úrovně DiD nedojde sice k úniku RA látek do životního prostředí, ale dojde k přechodu bloku do tzv. abnormálního provozu. [6], [8]

Prostředky DiD 2 pokrývají všechny stavy zařízení v abnormálním provozu a mají za cíl jejich detekci a řízení tak, aby bylo zabráněno vývoji předpokládaných provozních stavů do havarijních podmínek. Ačkoliv provozovatel JE podstupuje veškeré

kroky k prevenci PIU vedoucích k abnormálnímu stavu, je jejich výskyt za dobu životnosti bloku JE velmi pravděpodobný. Proto jsou pro zajištění plnění cílů této úrovně DiD potřeba opatření a systémy zakotvené v projektu a prověřené projektovou nebo bezpečnostní analýzou a příslušné provozní předpisy a organizační opatření. Při porušení DiD 2 nedochází k úniku RA látek do okolí JE, ale dojde k přechodu bloku do havarijních podmínek. [6]

Ke vstupu do DiD 3a dojde v případě, že i přes velmi malou pravděpodobnost vyeskalují předpokládané provozní podmínky nebo PIU až do základní projektové nehody (ang. Design Basis Accident – DBA), která je asociovaným stavem této úrovně DiD. Cílem prostředků DiD 3a je proto zvládnutí DBA a přechod do stabilizovaného odstaveného a následně bezpečného stavu JE. Tím je zaručeno zabránění rozvoji dalších poruch zařízení, zadržení RA látek a prevence přechodu do DEC, resp. DEC A. Aby byl tento cíl naplněn, je třeba projektem zajistit inherentní bezpečnostní prvky, systémy a organizační opatření pro prevenci tavení aktivní zóny (AZ) a úniků RA látek do okolí bez nutnosti zásahu off-site opatření. Tyto systémy jsou za normálního provozu v pohotovosti, ale nepracují. Ačkoliv při porušení této úrovně DiD dojde k úniku RA látek do okolí, nejsou nutná neodkladná opatření na ochranu obyvatelstva. [4], [6]

Asociovaným stavem „nově přidané“ úrovně DiD 3b je DEC A, nebo-li PIU s vícenásobnými a komplexními poruchami. Hlavním cílem této úrovně DiD je zvládnutí stavu bloku v DEC A a prevence výrazného tavení paliva, tj. přechodu do DEC B. Pro zajištění splnění tohoto cíle mohou být použity základní projektové prostředky (ZPP) pro zvládnutí havarijních stavů, ale projektové prostředky pro použití v DiD 3b jsou tzv. diverzní prostředky (DIV). DIV jsou SKK nebo organizační opatření pro zajištění nebo nahrazení bezpečnostní funkce v případě její ztráty v důsledku poruchy ze společné příčiny [7]. V této úrovni DiD je uvažována malá míra natavení jaderného paliva v AZ nebo BSVP, ale nepředpokládá se velký únik RA látek do okolí JE. Nejsou proto nutná neodkladná opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí.

Cílem prostředků DiD 4 je zmírňování následků postulované TH, která může být lokálního (např. havárie s únikem chladiwa I.O.) nebo globálního charakteru (např. nadprojektová seismicita, ztráta vnějšího napájení, nebo ztráta koncového jímače tepla). Asociovaným stavem bloku v DiD 4 je DEC B, tedy jde o stav s významnou degradací jaderného paliva v AZ reaktoru, nebo v BSVP. Hlavní prioritou této úrovně je zmírňování následků DEC B a prevence velkých a časných úniků RA látek do okolí JE. Pro dosažení zmíněného cíle je možné použít ZPP a DIV pro zvládnutí havarijních stavů, ale projektem jsou pro zmírňování následků TH určeny tzv. alternativní systémy (ALT). ALT jsou SKK nebo organizační opatření určená pro zvládnutí DEC v situacích, kdy může z důvodu poruchy ze společné příčiny dojít při zajišťování základní bezpečnostní funkce ke ztrátě funkce ZPP a DIV určených projektem jaderného zařízení [7]. V DiD 4 se předpokládá zachování integrity poslední fyzické bariéry, ale přesto může dojít k malému úniku RA látek do okolí JE. V tom případě jsou spuštěna ochranná opatření omezená v rozsahu a čase tak, aby posloupnost událostí vedoucí k velkému a časnému úniku byla prakticky eliminována. [6], [8]

Úroveň DiD 5 nenahrazuje předchozí úroveň DiD 4 v případě jejího selhání, ale k její aktivaci dochází již při vzniku rizika úniku RA látek do okolí JE. Do DiD 5 se tedy nemohou dostat systémy (ty zůstávají v krajním případě v DiD 4). Cílem této úrovně DiD je zmírňování radiologických následků a zajištění prevence a zmírňování následků velkých a časných úniků RA látek do okolí JE. Prostředky potřebné pro zajištění této úrovně DiD jsou především organizačního charakteru a jsou zakotvené ve

vnitřních a vnějších havarijních plánech. Současně tyto prostředky doplňují prostředky používané v předchozích úrovních DiD a při jejich případném selhání zajišťují snížení dopadu následků na okolí JE.

Projekt JE připouští ústup po jednotlivých profesních liniích DiD nerovnoměrně, avšak meziprofesionálně koordinovaně. To zajišťuje režimové rezervy v aplikaci strategie DiD a přispívá i ke zvýšení spolehlivosti, například snížením počtu automatických a ručně řízených manipulací nebo zachováním stabilních režimů práce zařízení.

2.1.2 Organizační opatření pro zajištění jednotlivých úrovní ochrany do hloubky

Kromě technických prostředků jsou pro zajištění jednotlivých úrovní DiD potřeba i organizační opatření zaměřující se na otázku vzdělávání, alokace personálu a provozní a havarijní dokumentace pro danou úroveň DiD.

Pro zvládání úrovně DiD 1 slouží v oblasti personálu zejména školení a výcviky pro normální provoz, údržbu a další činnosti. Z dokumentace spadají do DiD 1 zejména provozní předpisy, ale i údržbová dokumentace, požadavky na funkční zkoušky dle Limit a podmínek, program provozních kontrol a mnoho dalších. [8]

V úrovni DiD 2 slouží k řízení a zvládání situace postupy popsané v předpisech pro zvládání abnormálního provozu. Těmito předpisy se řídí i provozní personál při výcviku zvládání abnormálních stavů bloku JE, který probíhá například ve formě výcviku posádky blokové dozorny na plnorozsahovém simulátoru. [8]

Dokumentace sloužící pro zvládání stavů bloku spadajících do úrovně DiD 3a zahrnuje havarijní předpisy (EOPs) a postupy pro vnitřní havarijní odezvu tzv. zásahové instrukce. V oblasti personálu je potřeba zajistit dostatek lidských zdrojů pro realizaci vnitřního havarijního plánu, zvládání havarijních podmínek a zajištění potřebného výcviku provozního personálu. Příkladem výcviku provozního personálu pro zvládání stavů bloku v DiD 3a je výcvik posádky blokové dozorny na plnorozsahovém simulátoru nebo ověření schopnosti provozního personálu jako celku při havarijních cvičeních (zejména se týká Hasičského záchranného sboru podniku – HZSp). [8]

Dokumentace použitá pro zvládání úrovně DiD 3b je shodná s dokumentací použitou v předchozí úrovni DiD, tj. EOPs a zásahové instrukce. Oproti DiD 3a počítají havarijní předpisy s použitím DIV a ALT. Z pohledu personálu je potřeba pro zajištění úspěšného plnění kroků v EOPs, zásahových instrukcích a vnitřních (potažmo vnějších) havarijních plánů v DiD 3b zajistit dostatečnou kapacitu lidských zdrojů a jejich výcvik na plnorozsahovém simulátoru pro personál blokové dozorny, havarijní cvičení pro provozní personál jako celek nebo školení pro technické podpůrné středisko. [8]

Při vstupu do DiD 4, tedy do stavu bloku v TH, dojde k přechodu z návodů EOPs do návodů pro zmírňování následků TH (ang. Severe Accident Management Guidelines – SAMG). Kromě těchto návodů jsou v této úrovni DiD používány i příslušné zásahové instrukce a EDMG (ang. Extensive Damage Management Guidelines). V oblasti personálu se jedná o stejné požadavky jako v úrovni DiD 3b. [8]

Do poslední úrovně DiD (tj. DiD 5) spadají organizační prostředky pro zmírňování radiačních následků úniku RA látek a ionizujícího záření uvnitř a vně areálu JE. V České republice je vnější havarijní odezva v kompetenci Hasičského záchranného sboru příslušného kraje a vnitřní havarijní odezva je již součástí úrovně DiD 3 a je koordinována HZSp. [8]

U nových bloků JE je zahrnutí technických a organizačních prostředků pro zmírňování následků TH a vzájemná nezávislost prostředků zasahujících v jednotlivých úrovních DiD legislativně požadováno. Toto ale neplatí u současných provozovaných bloků JE, proto bývají některé základní systémy a technická a organizační opatření použita ve více úrovních DiD. V tomto případě je kladen důraz na konzervativní návrh projektu, provozu, vhodné nastavení kultury bezpečnosti a zajišťování jakosti.

Tato diplomová práce se zabývá analýzou souboru opatření pro zmírňování následků TH, proto budou další části této práce věnovány právě technickým a organizačním opatřením používaným v úrovních DiD 4 a DiD 5.

3 Obecný úvod do problematiky těžkých havárií

V jaderné energetice má slovní spojení těžká havárie (TH) dva různé významy. Jedním z nich je označení šestého stupně stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí INES, kdy je jako TH vyhodnocena situace s velkým únikem RA látek do okolí, která bude pravděpodobně vyžadovat nasazení plánovaných protiopatření. Stupnice INES je používána pro komunikaci neočekávaných událostí na JE s veřejností a médii a označení události na JE jako TH nijak nesouvisí s terminologií používanou odbornou veřejností. Ta chápe jako TH havarijní podmínky spadající do úrovně DiD 4, při kterých, na rozdíl od INES, nemusí dojít k úniku RA látek do okolí.

V současné době neexistuje jednotná mezinárodní definice termínu těžká havárie. Většina společností a dozorných orgánů má vlastní definici, ale ve většině případů mají tyto definice TH stejné nebo alespoň podobné jmenovatele. Těmi jsou především tavení paliva a uvolnění velkého množství RA látek a ionizujícího záření do okolí JE. Definice termínu TH vybraných dozorných orgánů a IAEA jsou uvedeny níže.

- TH jsou „*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.*“ (dle Vyhl. 329/2017 Sb. [7])
- TH je druh havárie závažnější než základní projektová havárie, která zahrnuje značnou degradaci aktivní zóny. (dle IAEA Safety Glossary [9])
- TH je druh havárie, která může ohrozit bezpečnostní systémy na úrovni mnohem vyšší, než bylo předpokládáno. (dle US NRC Glossary [10])

Výše zmíněné definice TH mají shodné nebo alespoň podobné znaky mezi sebou i v návaznosti na další dokumenty týkající se problematiky TH. Proto je možné říci, že za TH se dají považovat takové nadprojektové události a stavy JE, které jsou spojené s významným poškozením jaderného paliva v AZ nebo v bazénu skladování vyhořelého paliva (BSVP). Na druhou stranu je potřeba zdůraznit, že přechod JE do stavu TH nemusí nutně znamenat uvolnění RA látek a ionizujícího záření do životního prostředí nebo ohrožení osob v areálu JE a jeho okolí. [11] I přes možné zobecnění definice TH je v této diplomové práci respektována definice TH uvedená v české legislativě, tj. § 2 písm. k) Vyhl. č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt [7].

Definice TH pomocí úrovně tavení paliva je složitě uchopitelná pro provozní personál. Proto je vstup do TH, a tedy i přechod mezi EOPs a SAMG, definován provozními parametry jako je teplota na výstupu z AZ nebo tlak a dávkový příkon v ochranné obálce pro případ TH s otevřeným reaktorem nebo v BSVP. V současné době jsou technická a organizační opatření na stávajících i nových JE na takové úrovni, že vstup do TH je velmi málo pravděpodobný. Z toho důvodu je pro analýzy TH, obvykle po dohodě s dozorným orgánem, postulovaná v projektu a projekt JE musí prokázat, že disponuje dostatečnými technickými a organizačními opatřeními pro zmírnění jejich následků bez použití prostředků z úrovně DiD 1–3b.

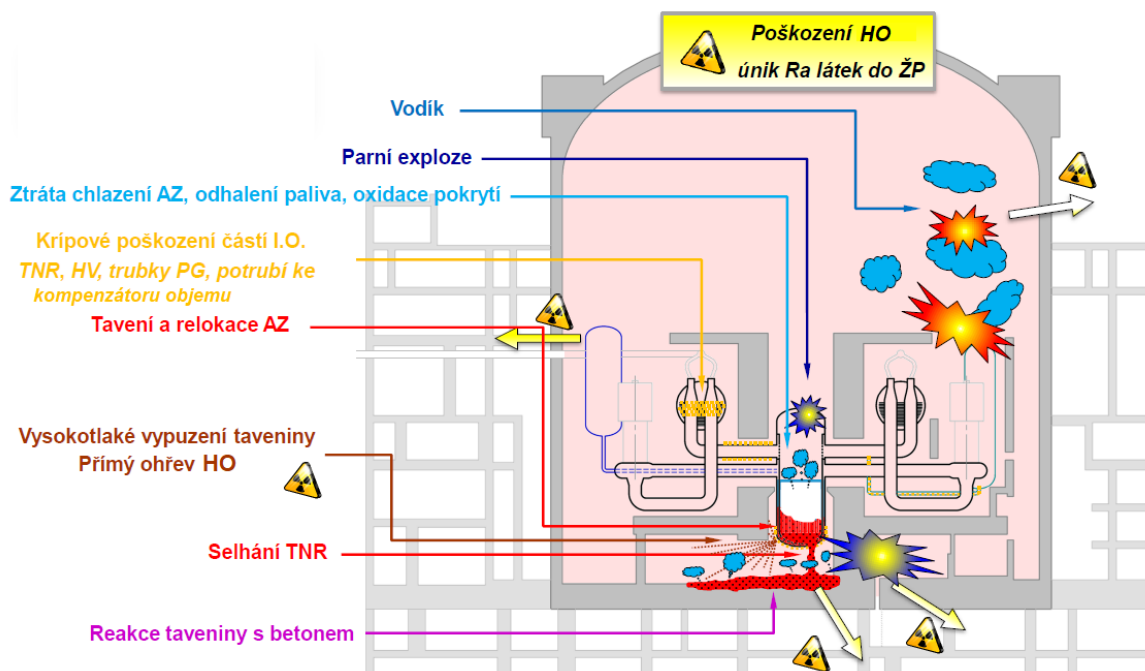
Na počátku jaderné energetiky byla problematice TH věnována relativně malá pozornost. Značným impulsem ve výzkumu, analýzách a hodnocení TH byly havárie na druhém bloku americké JE Three Mile Island (1979), čtvrtém bloku JE Černobyl (1986) a prvním, druhém a třetím bloku JE Fukušima (2011). V návaznosti na tyto havárie

byly provedeny rozsáhlé studie a analýzy, které vedly například k rozšíření konceptu DiD a zvýšení požadavků na jadernou bezpečnost, a tím i k úpravě technických a organizačních opatření. Především šlo o zavedení návodů EOPs, implementaci systémů pohavarijního monitorování (ang. Post Accident Monitoring System – PAMS), úpravu systému vzdělávání obsluhy JE, implementaci návodů SAMG a hodnocení odolnosti projektů JE na málo pravděpodobné události (formou tzv. zátěžových testů (ang. stress test)).

3.1 Jevy vyskytující se při těžké havárii

Před zavedením vhodných opatření pro zmírňování následků TH je potřeba dostatečně porozumět fenomenologii jejich vzniku a průběhu. Samotná fenomenologie vzniku TH je složitá a její průběh je závislý na sledu a kumulaci poruch různých zařízení a také na mnohdy improvizovaných krocích operátorů a provozního personálu JE. Průběh, rozsah a množství dílčích jevů při TH závisí na konstrukci JE a na vlastním řešení zmírňování následků TH (tj. technických a organizačních prostředcích a návodech SAMG). [11]

Všechny jevy vyskytující se při TH jsou následkem významné degradace AZ, která je již z definice počátečním jevem při TH. Schématické znázornění vybraných jevů vyskytujících se při TH je zobrazeno na Obr. 2 a jejich bližší popis dále v této kapitole.



Obr. 2. Schématické znázornění jevů vyskytujících se při TH. [11]

Ještě před vstupem do TH dochází k produkci vodíku při oxidaci palivového pokrytí již přibližně od 800 °C. K autokatalytické reakci ale dochází až při teplotě přibližně 1100 °C. Kromě oxidu zirkoničitého při ní vzniká i vodík a reakční teplo, které má pro teploty 1700–2700 °C hodnotu 576–599 kJ/mol_{Zr}. [12] Vlivem uvolňování reakčního tepla dojde k výraznému nárůstu tepelného výkonu produkovaného v AZ, kdy okamžitý tepelný výkon oxidace palivového pokrytí mnohonásobně převyšuje zbytkový tepelný výkon paliva. Obvykle spolu s tímto jevem dochází k degradaci AZ a první relokaci

taveniny do nižších, chladnějších, částí tlakové nádoby reaktoru (TNR). Interakce horké taveniny o teplotě přibližně 3000 °C a výrazně chladnější vody na dně TNR vede k intenzivní tepelné výměně, která může v případě rychlého pádu taveniny do vody v řádu milisekund vést až k parní explozi.

Po relokaci taveniny na dno TNR a vypaření zbytkového obsahu vody se dostane tavenina do kontaktu se stěnou dna TNR, která může být poškozena již při pádu taveniny do spodní směšovací komory. V důsledku kontaktu taveniny se stěnou dna TNR může dojít k jeho protavení/odtavení (většinou pro nízkotlaké scénáře) nebo k jeho porušení tepelným krípem (typické pro středotlaké a vysokotlaké scénáře). Z hlediska rizik je horší variantou vysokotlaký a středotlaký scénář, kde dojde k prudkému vypuzení taveniny z TNR do ochranné obálky (ang. High Pressure Melt Ejection – HPME). [12]

Tavenina vypuzená z TNR se dostane do kontaktu s betonem v šachtě reaktoru s teplotou ablace přibližně 1600 °C a okamžitě dojde k napadení betonu i ocelového zařízení v šachtě reaktoru (např. manipulační dveře). Pokud nejsou provedena včasná nápravná opatření dojde k protavení i dalších konstrukčních prvků až pod základovou desku a mimo budovu ochranné obálky, což je výrazným radiačním rizikem. Vlivem tavení konstrukčních částí v šachtě reaktoru dochází k uvolňování velkého množství plynů, zejména vodíku, a aerosolů do prostoru ochranné obálky. [12]

Hromaděním vodíku v ochranné obálce vzniká riziko jeho hoření a vzniku výbušné směsi s kyslíkem, a tedy i riziko porušení integrity ochranné obálky. Hodnoty rizikové koncentrace vodíku pro hoření i detonaci vodíku v ochranné obálce je možné určit pomocí experimentálně stanoveného Shapirova diagramu. Ten znázorňuje oblasti hoření a detonace vodíku v závislosti na objemové koncentraci vodíku, vodní páry a vzduchu. Z diagramu vyplývá, že k hoření vodíku dochází již při objemové koncentraci 5–8 % a k detonacím vodíku dochází přibližně při 20% objemové koncentraci vodíku. [12] Spolu s vodíkem uniká do prostoru ochranné obálky i pára a nekondenzovatelné plyny, které zvyšují tlak v ochranné obálce, a tím zvyšují riziko porušení její integrity.

Všechna tato rizika vedou k potřebě zavedení vhodných technických a organizačních opatření pro zmírňování následků těžkých havárií. Tento fakt podpořily i události na JE Three Mile Island, Černobyl a Fukušima, které ukázaly, že ačkoliv je pravděpodobnost TH velmi malá, není možné ji prakticky vyloučit. U nových bloků JE jsou opatření pro zmírňování následků TH již zavedena v projektu, ale u bloků JE v provozu bylo a je nutné jejich projekt těmto scénářům přizpůsobit.

3.2 Cíle při zmírňování následků těžkých havárií

Cílem veškerých opatření při TH je zajistit přechod JE do stabilizovaného a následně do bezpečného stavu. Stabilizovaný stav JE je takový stav, ve kterém jsou po dobu potřebnou pro uplatnění opatření k dosažení bezpečného stavu zajištěny všechny základní bezpečnostní funkce (ZBF). Bezpečný stav JE je definován jako stav bloku, ve kterém jsou dlouhodobě plněny všechny tři ZBF: [7]

- ZBF1 - řízení reaktivity,
- ZBF2 - odvod zbytkového tepla z AZ a z použitého paliva nacházejícího se mimo reaktor,
- ZBF3 - zadržení RA látek, stínění proti radiaci, řízení plánovaných výpustí RA látek a omezení úniků RA látek v havarijních stavech.

3.2.1 Opatření pro zajištění první základní bezpečnostní funkce

K zajištění plnění ZBF1 ve všech provozních i havarijních stavech slouží ZPP pro řízení reaktivity. Do AZ je vnesena záporná reaktivita pomocí úplného, nebo alespoň částečného, zasunutí regulačních orgánů nebo v případě havarijních stavů rychlým odstavením reaktoru pádem regulačních orgánů do AZ a současným zvýšením koncentrace kyseliny borité (H_3BO_3) během prvních momentů havarijního stavu.

Při vstupu do TH je již reaktor odstaven a uveden do dostatečně podkritického stavu. Navíc v případě roztavení AZ je podkritičnost taveniny zajištěna projektem AZ a konkrétní vsázky. [8]

3.2.2 Opatření pro obnovení druhé základní bezpečnostní funkce

O obnovení ZBF2 při TH je možné mluvit v časné fázi TH (v řádu minut od vstupu do TH), ve střednědobé i v dlouhodobé fázi (v řádu hodin a dní). V časné fázi je potřeba zajistit odvod tepla z degradované AZ, zatímco ve střednědobé a dlouhodobé fázi jde zejména o zajištění odvodu tepla z ochranné obálky.

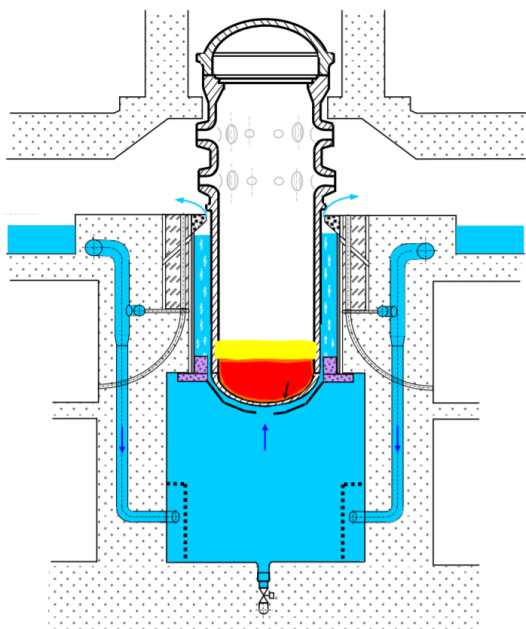
V současné době existují dvě základní strategie pro zajištění ZBF2 v časné fázi TH a to stabilizace taveniny uvnitř TNR (ang. In-Vessel Retention – IVR) a stabilizace taveniny vně TNR (ang. Ex-Vessel Cooling – ExVC). Strategii IVR je možné dále dělit podle způsobu chlazení taveniny na přímé chlazení taveniny vstříkáním chladiva do TNR (IVR-In) a na kombinaci vstříku chladiva do TNR a chlazení vnějšího povrchu TNR (IVR-Ex). Ale aby bylo možné tyto strategie realizovat, je potřeba nejprve provést úspěšné odtlakování I.O. pro prevenci HPME a umožnění vstříku chladiva do TNR.

Strategie IVR-In byla již v minulosti úspěšně realizována při zmiňované havárii na JE Three Mile Island. V tomto případě sice šlo o improvizovaný postup založený na špatné interpretaci stavu JE, nicméně byla prokázána možnost její realizace včasnými zásahy operátorů a provozního personálu. Na druhou stranu došlo vlivem nedostatečného chlazení k přemístění většího množství taveniny do spodní části TNR. Z pozdějších analýz vyplývá, že by bylo chlazení taveniny efektivnější, pokud by bylo doplněno o vhodné vnější chlazení spodní části TNR. [13]

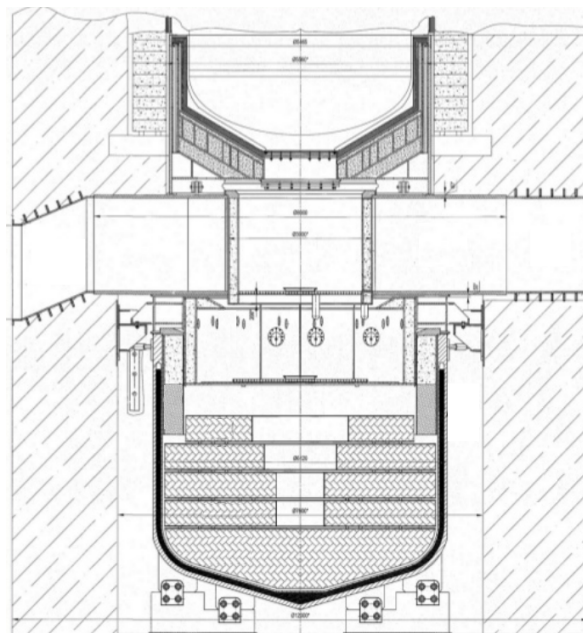
Toto doporučení je základem strategie IVR-Ex, jejíž princip spočívá v zaplavení šachty reaktoru vodou pro chlazení vnějšího povrchu TNR v kombinaci se vstříkáním chladiva do TNR. Na rozdíl od strategie IVR-In je volba zaplavení šachty reaktoru konstrukčně jednodušší, ale projekt JE musí mít vhodné charakteristiky [13]. Mezi ty patří zejména nízký tepelný výkon, velký objem vody v I.O., dno TNR bez konstrukčních úprav, vhodná konstrukce systému vzduchotechniky šachty reaktoru a možnost technologických úprav konstrukce šachty pro zajištění dostatečného průtoku chladiva do šachty reaktoru a odvod páry vznikající odparem na povrchu TNR. [14] Strategie IVR-Ex je již aplikovaná na mnohých JE s reaktorem VVER 440 (JE Dukovany a JE Paks), ale i na nových projektech jako je například americký projekt AP 1000. Schématické znázornění IVR-Ex na VVER 440 je zobrazeno na Obr. 3 na následující straně.

Strategie ExVC může být volena jako primární strategie odvodu tepla z taveniny nebo jako „záložní plán“ v případě neúspěšnosti původní zvolené strategie. Tato strategie počítá s protavením TNR a rozlitím taveniny do tzv. lapače taveniny. Lapač taveniny je nádoba nebo ohraničený prostor s tzv. obětním materiálem a otvory pro vstup chladiva, jehož hlavní funkce jsou zachycení tuhé a tekuté složky taveniny a dalších uvolněných konstrukčních materiálů AZ a zajištění jejich chlazení. Vhodný obětní materiál musí zajistit podkritičnost taveniny a minimalizovat produkci vodíku. [13]

Konstrukční uspořádání lapače taveniny může být různé. Mezi základní uspořádání lapače taveniny je možné považovat ty použité v projektu reaktoru EPR 1600 a projektu reaktoru VVER 1200. Lapač taveniny reaktoru EPR 1600 je umístěný mimo osu TNR a tavenina do něj proudí pomocí propojovací šachty a lapač taveniny reaktoru VVER 1200, který má tvar otevřené nádoby umístěné v ose TNR a vystlané několika vrstvami obětního materiálu. Schéma lapače taveniny reaktoru VVER 1200 je na Obr. 4.



Obr. 3. Schématické znázornění IVR-Ex na VVER 400 V213. [14]



Obr. 4. Schéma lapače taveniny reaktoru VVER 1200. [15]

V případě, že při TH dojde ke zvyšování teploty a tlaku v ochranné obálce i ve střednědobé a dlouhodobé fázi, je potřeba zajistit odvod tepla z ochranné obálky pomocí k tomu určenému systému.

3.2.3 Opatření pro zajištění třetí základní bezpečnostní funkce

Při odtlakování I.O. dochází k uvolnění velkého množství parovzdušné směsi do prostoru ochranné obálky, čímž v ní dochází ke zvyšování tlaku a teploty. Dalším zdrojem parovzdušné směsi, a tedy i příspěvek k růstu parciálního tlaku páry v ochranné obálce, je odpařování vody z technologických okruhů a při hašení trosky AZ. Součástí parovzdušné směsi jsou i nekondenzovatelné plyny jako je vodík, aerosoly a vzácné plyny unikající z I.O. a nekondenzovatelné plyny produkované při interakci taveniny s betonem. [13] Z toho plyne potřeba snižovat tlak v ochranné obálce a objemovou koncentraci vodíku v časně, střednědobé i dlouhodobé fázi TH.

Pro snižování tlaku v ochranné obálce je ZPP sprchovací systém ochranné obálky. K jeho aktivaci dochází v případě potřeby již v úrovni DiD 3a. Princip snižování tlaku v ochranné obálce je založen na rozprašování chladiva ze studené větve I.O. nebo jiných zdrojů chladiva do prostoru ochranné obálky. Tím dojde ke kondenzaci páry, snížení teploty v ochranné obálce a ve výsledku k poklesu parciálního tlaku páry.

Technickými prostředky pro snižování koncentrace vodíku v ochranné obálce jsou tzv. rekombinátoři vodíku (ang. Passive Autocatalytic Recombiners - PAR). Jde o pasivní systémy umístěvané obvykle ve vrchních částech jednotlivých místností v ochranné obálce, jejichž funkce je v principu založena na autokatalytické reakci vodíku a kyslíku na vhodném katalyzátoru (např. platina nebo paladium) i za nízkých teplot. Výsledným produktem této reakce je vodní pára. Hlavní výhodou PAR je jejich pasivní funkce, která nevyžaduje elektrické napájení ani řízení.

Ve střednědobé a dlouhodobé fázi TH je taktéž potřeba zajistit snižování tlaku v ochranné obálce. Ke snižování tlaku dochází i v důsledku odvodu tepla z ochranné obálky, případně je možné pro snižování tlaku použít k tomu určený systém. Návrh a realizace konkrétního systému zajišťujícího funkci snižování tlaku je předmětem mnoha studií a závisí na konkrétním projektu JE. Jedním ze způsobů je systém filtrované ventilace ochranné obálky (ang. Filtered Containment Venting System – FCVS). Princip FCVS spočívá v odvodu parovzdušné směsi z ochranné obálky přes zařízení zachycující RA látky a aerosoly a následné odpouštění filtrovaného vzduchu do atmosféry. Zachycení RA látek ve FCVS je možné provést suchým (např. filtroventilační jednotka) nebo mokřím způsobem (např. vodní lázeň a aerosolový filtr).

3.3 Legislativní požadavky na zmírňování následků těžkých havárií

Základním právním předpisem v oblasti mírového využívání jaderné energie na území České republiky je Zák. č. 236/2016 Sb., atomový zákon [1], který je dále rozvíjen příslušnými vyhláškami. Vzhledem k tomu, že je Česká republika členem několika mezinárodních organizací zabývajících se jadernou energetikou, je třeba do jednotlivých požadavků promítnout i doporučení a požadavky z dokumentů těchto organizací. Jde například o IAEA, WENRA, ENSREG nebo Euratom.

3.3.1 Požadavky na řešení těžkých havárií uvedené v české legislativě a dalších dokumentech

V české legislativě se problematice požadavků na technická a organizační opatření pro zvládnutí TH, a havarijních stavů obecně, věnuje především Vyhl. č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt [7]. Ta říká, že projekt jaderného zařízení musí stanovit požadavky na technická a organizační opatření pro prevenci a zvládnutí provozních a havarijních stavů včetně TH. Dále říká, že projekt jaderného zařízení musí při TH zajistit předcházení ztráty funkce poslední fyzické bariéry, vytvoření připojovacích míst pro DIV a ALT prostředky (které slouží například k havarijnímu chlazení AZ, k odtlakování I.O. nebo jako zdroj elektrického napájení), opatření pro prevenci velkých a časných úniků RA látek, dlouhodobou podkritičnost roztavené AZ a opatření systému ochranné obálky dalšími systémy, které zajišťují zmírňování následků TH. Vyhl. č. 329/2017 Sb. rovněž upravuje požadavky na hodnocení bezpečnosti projektu pro případ DEC a na prostory používané při zvládnutí radiční mimořádné události (např. úkryty nebo technické podpůrné středisko).

Do problematiky požadavků na soubor opatření pro řešení TH má dopad i Vyhl. č. 162/2017 Sb., o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona [16]. Ta určuje požadavky na soulad systému zvládnutí havárií s výsledky periodického pravděpodobnostního hodnocení včetně určení jejich účinnosti a také požadavky na

periodické pravděpodobnostní hodnocení systému prevence poškození AZ.

Některé zbylé legislativní dokumenty v České republice, jako je například atomový zákon a některé příslušné vyhlášky, se věnují zejména požadavkům na technická a organizační opatření pro zvládnání radiační mimořádné události nebo radiační nehody (tj. opatření v DiD 5). Atomový zákon obecně udává požadavky na odezvu na radiační mimořádnou událost a na postavení jaderného dozoru v této situaci. Mezi vyhlášky, které rozvíjejí požadavky z atomového zákona patří Vyhl. č. 21/2017 Sb., o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení [17] a Vyhl. č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnání radiační mimořádné události [18].

Vyjma legislativy se hodnocení a požadavkům na opatření pro zmírňování následků TH věnuje několik dalších dokumentů. Nejdůležitějším z nich je Po fukušimský Národní Akční Plán (NAcP) [19] na posílení jaderné bezpečnosti jaderných zařízení v České republice, který navazuje na Národní zprávu o zátěžových zkouškách jaderných elektráren ČR zpracovanou na podnět Evropské komise v souladu se zadáním ENSREG po havárii na JE Fukušima. NAcP [19] uvádí konkrétní požadavky na posílení jaderné bezpečnosti na JE v ČR, které vyplývají nejen ze zátěžových testů provedených na konkrétních lokalitách, ale i z doporučení plynoucích z hodnocení nezávislými experty v rámci skupiny ENSREG. Požadavky a doporučení pro oblast řízení TH jsou uvedena v kap. 3.3 NAcP [19]. Mezi těmito požadavky a doporučeními jsou například doporučení pro zajištění záložního doplňování vody do parogenerátorů, odtlakovaného reaktoru a BSVP, realizaci dodatečných stabilních zdrojů napájení pro případ ztráty vnějšího napájení, zvětšení kapacity systému likvidace pohavarijního vodíku, analýza volby strategie pro dlouhodobý odvod tepla z taveniny, zavedení školení personálu pro případ TH atd.

3.3.2 Požadavky uvedené v mezinárodních dokumentech

Je dobrým zvykem, že při provozu jaderných zařízení, zejména JE, jsou dodržovány nejen legislativní požadavky příslušného státního dozorného orgánu, ale i doporučení a požadavky mezinárodních organizací z jaderné oblasti. Mezi takové organizace patří například Euratom, WENRA nebo IAEA. Požadavky a doporučení Euratom a WENRA jsou zapracovávány přímo do atomového práva členských zemí.

Doporučení Euratom a WENRA jsou určena především pro dozorné orgány pro zapracování do požadavků na jadernou bezpečnost jednotlivých států. Dokumenty vydávané IAEA jsou podle obsahu určené buď provozovatelům JE nebo dozornému orgánu a je možné je rozdělit na informativní (např. kvantitativní hodnocení provozu jednotlivých elektráren) a na dokumenty vztahované k jaderné bezpečnosti a jejímu zajištění tzv. Safety Standards. Série dokumentů Safety Standards se dále dělí do tří kategorií na Safety Fundamentals, Safety Requirements a Safety Guides.

Požadavky a doporučení IAEA na zajištění jaderné bezpečnosti při TH jsou obsažené například v:

- SSR-2/1 [6] - požaduje analýzy DEC provedené za účelem zvýšení odolnosti jaderného zařízení na TH,
- SSR-2/2 [20] - požaduje tvorbu a implementaci havarijních plánů (EOPs a SAMG) pro provozní a havarijní stavy a jeho periodické hodnocení dozorným orgánem,
- SSG-54 [21] - obsahuje doporučení pro splnění požadavků IAEA na havarijní plánování (EOPs a SAMG).

4 Prostředky pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín

Jaderná elektrárna Temelín (ETE) je umístěna v Jižních Čechách přibližně 5 km od města Týn nad Vltavou a přibližně 25 km od Českých Budějovic. Skládá se ze dvou bloků s jaderným reaktorem typu VVER 1000 V320 o nominálním tepelném výkonu 3125 MWt a elektrickém výkonu 1051 MWe na jeden blok. Projekt ETE je jedinečný v tom, že jde o kombinaci východní a západní technologie tlakovodních reaktorů. Výstavba totiž probíhala podle ruského projektu, ale tendr na pokročilý systém kontroly a řízení implementovaný na základě výsledků hodnotící mise IAEA a WANO před spuštěním vyhrála americká společnost Westinghouse. Tato kombinace technologií řadí ETE na pomezí reaktorů druhé a třetí generace.

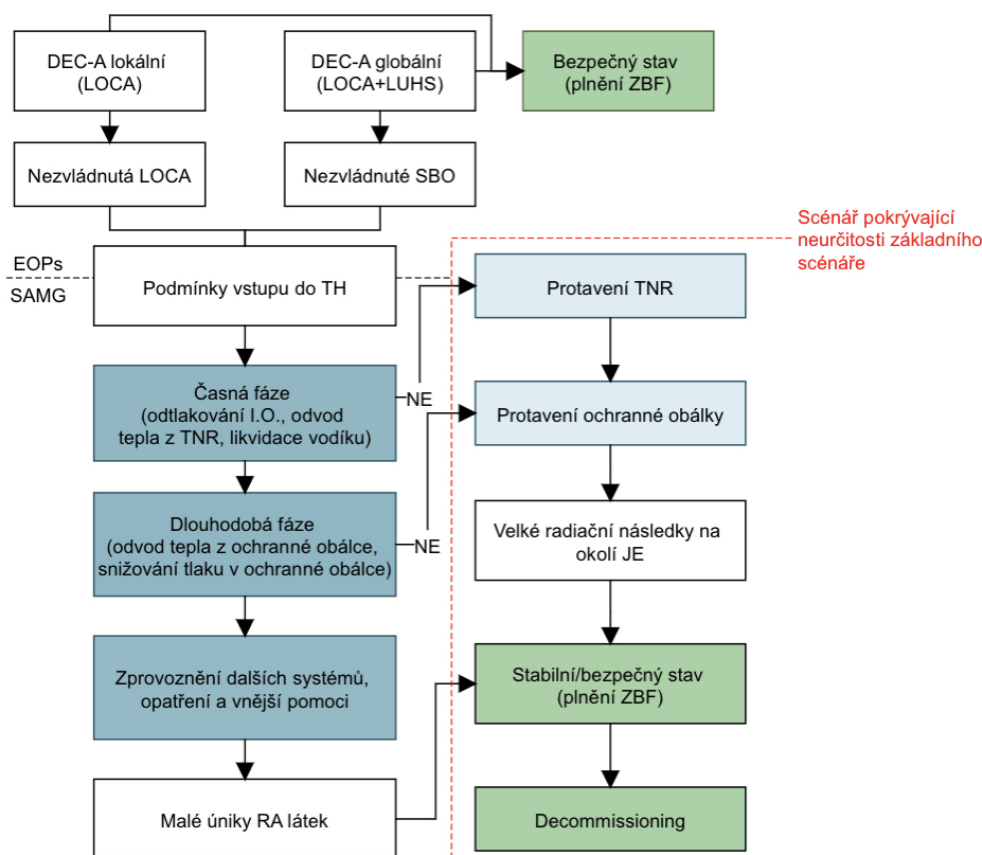
Původní projekt ETE byl navržen na zvládnutí DBA, ale v průběhu výstavby a provozu bylo potřeba zvýšit jeho odolnost i na DEC. Z tohoto důvodu byla provedena řada analýz a studií, z nichž nejrozsáhlejší byly v rámci zátěžových testů a jejich následného hodnocení. Výstupem zátěžových testů [22] bylo velké množství obecných i konkrétních doporučení pro zajištění technických a organizačních prostředků pro zvýšení bezpečnosti JE mimo jiné i v TH. Doporučení pro zvýšení odolnosti na TH ETE byla například zvýšení kapacity PAR, implementace DIV prostředků pro dodávku chladiva do I.O., BSVP a havarijní jímky GA201 nebo zavedení ALT prostředků [19]. Dalším významným krokem při řešení TH byla implementace EOPs a SAMG, která proběhla již v 90. letech 20. století.[23]

Návody EOPs slouží pro zvládnutí havarijních stavů až do úrovně DiD 3b. Pokud nebyly postupy a procesy pro zvládnutí havarijních stavů a prevenci přechodu do TH uvedené v návodu EOPs dostatečně účinné, dochází k přechodu do návodů SAMG. Přechod mezi návody EOPs a SAMG je definovaný vstupem do TH, který je na ETE určen teplotou na výstupu z AZ vyšší než 650 °C (pro odstavený reaktor 550 °C nad AZ nebo 370 °C ve studené větvi I.O.), a v případě otevřeného reaktoru v odstávce je určen dávkovým příkonem na reaktorovém sále vyšším než předem určená hodnota v Gy/hod. Teoreticky je možné, aby došlo ke vzniku TH i v BSVP a v otevřeném reaktoru. Nicméně v souboru obecných požadavků na projekt ETE [23] je prokázáno, že doba do odhalení a do počátku degradace paliva je v obou případech velmi dlouhá a zároveň existuje řada možností pro zajištění doplňování chladiva do BSVP i do otevřeného reaktoru. Proto je možné říci, že vznik TH je v těchto případech prakticky vyloučenou skutečností (tzn. jejich výskyt je považován za fyzikálně nemožný nebo jsou s vysokým stupněm věrohodnosti velmi nepravděpodobné [7]). Z toho důvodu se analýzy TH na ETE, včetně této diplomové práce, zabývají pouze možnostmi vzniku TH v uzavřeném jaderném reaktoru.

Pravděpodobnost vzniku TH v jaderném reaktoru na ETE nezvládnutím některé z PIU je velmi malá, proto byly po dohodě se SÚJB postulovány dva typové scénáře vzniku TH uvedené i v souboru obecných požadavků na projekt ETE [23]. Ty říkají, že ke vzniku TH může dojít buď z důvodu nezvládnuté havárie se ztrátou chladiva (ang. Loss of Coolant Accident – LOCA) nebo z důvodu nezvládnuté havárie se ztrátou elektrického napájení, tj. vnějšího napájení i dieselgenerátorových stanic v areálu JE (ang. Station Blackout – SBO). První ze scénářů je nízkotlaký s typickým rychlým průběhem, který obvykle postihuje pouze jeden blok v lokalitě. Druhý scénář je vysokotlaký s obvykle nižší rychlostí rozvoje a vyšším potenciálem postihnout více bloků současně, čímž omezí jejich schopnost vzájemné pomoci.

V obou případech je cílem veškerých technických a organizačních opatření zabránit časným nebo velkým únikům RA látek prostřednictvím udržení integrity poslední fyzické bariéry – ochranné obálky (resp. hermetické obálky – HO), k čemuž je nutné zajistit plnění základních bezpečnostních funkcí. V případě obnovení plnění všech ZBF je JE uvedena do stabilního a následně bezpečného stavu. Tento stav je díky významné degradaci AZ a poškození TNR nevratný, proto pak následuje už jen vyřazování JE z provozu (ang. decommissioning).

Obnova plnění ZBF1 při TH je zajištěna projektem AZ a konkrétní palivové vsázky, které musí zaručit, že i při roztavení celé AZ bude tavenina za všech podmínek podkritická. Pro zajištění plnění ZBF2 musí být předem zvolena vhodná strategie odvodu tepla z taveniny a hermetické obálky (HO) a pro zajištění plnění ZBF3 je potřeba realizace systému pro dlouhodobý odvod tepla z HO. Realizovatelnost zvolených strategií musí být podložena příslušnými analýzami. Na Obr. 5 je zobrazeno schéma obecného sledu potřebných činností při zmírňování následků TH na ETE.



Obr. 5. Schéma obecného sledu činností při zmírňování následků TH na ETE.

V následujících podkapitolách jsou popsány systémy instalované nebo plánované na ETE pro zmírňování následků TH.

4.1 Odtlakování primárního okruhu

Podle návodů SAMG musí být odtlakování I.O. provedeno neprodleně po vstupu JE do TH [23]. Cílem úspěšného odtlakování I.O. je zajištění vhodných tlakových podmínek pro prosazení nízkotlakých systémů doplňování chladiva pro odvod tepla z taveniny

v TNR a zabránění rizikům spojeným s HPME (okamžité zvýšení tlaku v HO, přímé uvolnění tepla do HO v důsledku chemických reakcí taveniny s betonem nebo exploze vodíku). Funkce systému odtlakování I.O. je nezbytná v případě vzniku TH nezvládnutým SBO (vysokotlaký scénář), zatímco při vzniku TH vlivem nezvládnuté LOCA (nízkotlaký scénář) nemá odtlakování I.O. smysl už z principu havárie samotné (porušení integrity I.O. vede k okamžitému snížení tlaku v I.O.).

Požadavky na výkonné technické prostředky určené k odtlakování I.O. při TH jsou specifikovány v souboru obecných požadavků na projekt ETE [23]. Ty říkají, že odtlakování I.O. musí být provedeno pomocí DIV technologických prostředků (elektroarmaturami pro zajištění spolehlivého otevření a setrvání v otevřeném stavu) určených pro funkci v podmínkách TH, které jsou nezávislé na stávajícím ZPP (systém ochrany I.O. od převýšení tlakem). Zároveň musí tyto prostředky disponovat dostatečnou hltností, aby zaručily odtlakování I.O. na hodnotu 1,2 MPa do 5 minut od vstupu do TH [24], protože pak dochází k aktivaci ALT prostředků pro doplňování chladiva do TNR (nízkotlaký systém). Požadavky na odolnost, řízení a napájení DIV prostředků pro odtlakování I.O. jsou následující: [23]

- odolnost na charakteristiky prostředí v HO, vnitřní vlivy, seismicitu a odolnost proti vnějším vlivům musí být zajištěna stavební částí,
- řízení musí být provedeno ze zařízení umístěného na blokové (BD) a nouzové dozorně (ND) a zároveň musí být možnost ovládat elektroarmatury z ALT prostředků (přenosný ovládací kufr),
- napájení prostředků musí být realizováno ze zdrojů I. kategorie ze SZN 1, 2, 3, případně z ALT prostředku přenosné elektrocentrály pro napájení drobných spotřebičů (armatur).

V současné době ale není potřebný DIV prostředek pro odtlakování I.O. v TH na ETE instalován, proto se k provedení této funkce využívá stávající systém ochrany I.O. od převýšení tlakem (složený z uzlu ventilů kompenzátoru objemu). Tento systém je ale dimenzovaný pouze na zvládání DBA, a jeho hltnost není dostatečná pro požadované rychlé odtlakování při TH, proto probíhají projekční práce pro doplnění požadovaného DIV prostředku.

4.2 Odvod tepla a stabilizace taveniny v tlakové nádobě reaktoru

Po úspěšném odtlakování I.O. je dalším krokem v SAMG zajištění odvodu tepla z taveniny a její následná stabilizace uvnitř/vně TNR v závislosti na zvolené strategii. Po havárii na JE Fukušima byla hodnocena možnost použití strategie ExVC a IVR-Ex a teprve na základě výsledků těchto analýz byla posuzována i možnost použití strategie IVR-In na ETE. Tyto analýzy měly dvě pomyslné části. První částí bylo provedení návrhu možného technického řešení implementace prostředků pro jednotlivé strategie na ETE a druhou částí bylo hodnocení rozumné realizovatelnosti nalezených řešení (tj. možnost vlastní realizace návrhu a jeho technicko-ekonomické hodnocení).

Navržené technické řešení strategie řízeného ExVC spočívalo ve vystlání prostoru šachty reaktoru keramickými dlaždicemi a zajištění chlazení taveniny rozlité vně TNR pomocí DIV prostředků. Toto řešení však nebylo možné realizovat z důvodu vysokého

dávkového příkonu v šachtě reaktoru, který znemožňoval pracovníkům pobyt v šachtě reaktoru po dobu potřebnou k provedení prací. [23]

Technické řešení odvodu tepla z taveniny strategií IVR-Ex se skládalo z použití pasivního systému zaplavení šachty reaktoru (čtyři nádrže s chladivem umístěné na střeše obestavby hlavního výrobního bloku (HVB)) a aktivního systému doplňování chladiva do šachty reaktoru. Celkem měly tyto systémy zajistit odvod tepla z taveniny po dobu 72 hod (6 hod pasivní systém a 66 hod aktivní systém). Pro realizaci této strategie by bylo nutné zabrat poslední dvě volné hermetické průchodky pro přivedení chladiva z nádrží pasivního systému do vzduchotechnického systému šachty reaktoru, díky čemu by nemohl být realizovaný systém filtrovaného ventingu (FCVS) pro snižování tlaku v HO. Navíc ekonomické dopady potřebných úprav by byly neúměrné pravděpodobnosti vzniku TH na ETE. Proto byla implementace strategie IVR-Ex zamítnuta. [23], [25]

Proto, z důvodu nerealizovatelnosti strategií řízeného ExVC a IVR-Ex, byla pro zajištění odvodu tepla z taveniny při TH na ETE zvolena strategie IVR-In. Její princip spočívá ve včasném dodání dostatečného množství chladiva před relokací taveniny do kompaktního bazénu na dně TNR tak, aby došlo k nastolení přirozené cirkulace v TNR a k odparu vody z reaktoru.

V současné době zajišťují dodávku chladiva do TNR havarijní systémy doplňování chladiva (ZPP) a TB 50 (DIV). Nicméně při TH není předpokládána funkce ZPP a pracovní bod čerpadel systému TB 50 je cca 11,1 kg/s při 1,6 MPa (abs), což je pro dodávky chladiva do TNR v případě TH nedostatečné, protože při analýzách TH na ETE byl stanoven minimální hmotnostní průtok potřebný pro stabilizaci taveniny v TNR na 20 kg/s a optimalizovaný průtok na 25 kg/s při minimálním protitlaku 1,97 MPa (abs) a při uvažování tlakových ztrát cca 2,5 MPa (abs). Z toho důvodu byl, jako náhrada překonaného systému TB 50, navržen nový ALT prostředek pro doplňování chladiva do TNR při TH, který označován jako TB 60 (v současné chvíli není na ETE instalován, ale již je dokončen Úvodní projekt [24] pro jeho doplnění). [23]

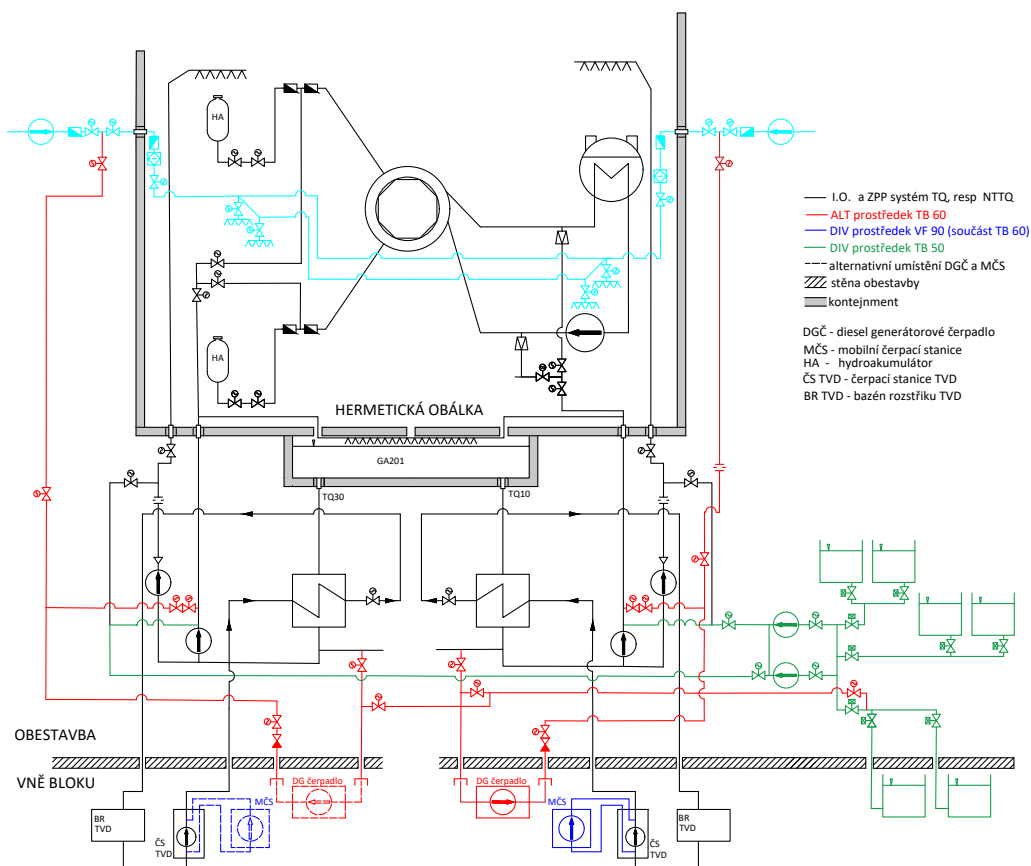
ALT prostředek pro zajištění odvodu tepla z taveniny v TNR TB 60 je z pohledu bezpečnostní klasifikace zařazen jako zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost, které však není vybraným zařízením podle Vyhl. č. 329/2017 Sb. Tento prostředek se skládá z mobilního DG čerpadla (DGČ) a propojovacích potrubí rozdělených do dvou divizí (TB 61, 63) podle toho, ke které divizi systému havarijního doplňování chladiva do reaktoru (systém TQ; 1. a 3. divize) je připojena. DGČ samotné je umístěno vně obestavby HVB na úrovni terénu v kontejneru na podvozku, který je vybaven kotvícím zařízením pro možnost jeho zafixování na předem vytipované pozici u obestavby a provozní zásobu paliva alespoň na 24 hodin provozu. Požadavky na odolnost, řízení a napájení ALT prostředku pro odvod tepla z taveniny jsou následující: [23]

- provozuschopnost a plnění funkce po seismické události v daném místě u HVB, odolnost na vnější vlivy a odolnost kontejneru na extrémní vnější vlivy a jejich kombinaci,
- řízení musí být provedeno ze zařízení umístěného v elektrorozvodně AE725/2, stav systému musí být sdělován do technického podpůrného střediska (TPS) a musí být možnost ovládat armatury z ALT prostředků (mDG a přenosné ovládací kufry),
- napájení musí být realizováno ze zdrojů I. kategorie ze SZN 1, 2, 3, případně

z ALT prostředků přenosné elektrocentrály pro napájení drobných spotřebičů (armatur).

Zdrojem chladiva pro ALT prostředek TB 60 je dostupný objem roztoku H_3BO_3 v nádržích systému TB a v případě jeho nedostatečnosti je sání DGČ přenastaveno na sání z havarijní jímky GA201. Rozdíl mezi těmito dvěma zdroji chladiva je v tom, že chladivo čerpané z havarijní jímky GA201 má teplotu sytosti odpovídající tlaku v HO (max. hodnota je 0,77 MPa, teplota je pak přibližně 169 °C). Takto vysoká teplota na vstupu do TQ výměníku vede ke zvyšování teploty TVD na výstupu z výměníku a tedy i ke zvyšování teploty v bazénech rozstříku TVD, což vede ke zvýšení teploty TVD na vstupu do TQ výměníku, a tím i ke zhoršení jeho tepelné bilance a potenciálního rizika vzniku kavitace v DGČ. [23]

Kromě funkce doplňování chladiva do TNR plní ALT prostředek TB 60 i funkci snižování tlaku v HO sprchováním. Na rozdíl od čerpadla ZPP (sprchový systém TQ 11) nemá DGČ dostatečný hmotnostní průtok pro efektivní funkci sprchového systému. Proto byla jako alternativa pro zachování plnění funkce snižování tlaku v HO voleno napojení výtlačku DGČ na potrubí rozstříku požárního systému (UJ) v místnosti hlavních cirkulačních čerpadel. Z toho důvodu může ALT prostředek TB 60 pracovat ve třech různých režimech – Doplňování I.O. (25 kg/s při 2,5 MPa (abs)), Sprchování HO (40 kg/s při 1,3 MPa (abs)) a Kombinovaný režim (65 kg/s při 2,5 MPa (abs)). Schéma ZPP, DIV a ALT prostředků doplňování chladiva do TNR je zobrazeno na Obr. 6. [23]



Obr. 6. Schéma ZPP, DIV a ALT prostředků doplňování chladiva do TNR.

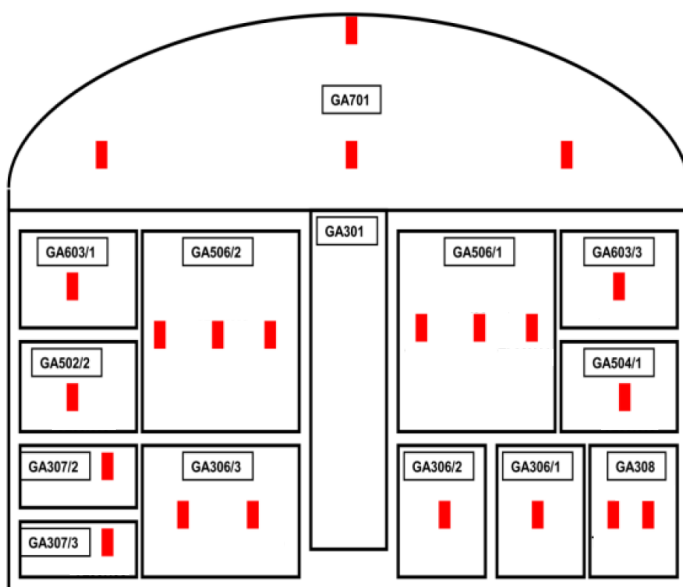
V případě potřeby je kontejner s DGČ umístěn na předem vytipované pozici u obestavby HVB u bajonetových závitů divize TB 61 (pracovní divize) nebo divize TB 63 (záložní divize). Propojení od DGČ do HVB je zajištěno hadicemi, které jsou napojeny na bajonetové závitů umístěné na stěně obestavby HVB. [23]

4.3 Likvidace pohavarijního vodíku v hermetické obálce

Při odtlakování I.O. uniká do prostoru HO parovzdušná směs, ve které je obsažený i vodík produkovaný oxidační reakcí vody na zirkoniovém pokrytí palivových proutků za vysokých teplot. Z Shapirova diagramu plyne, že při objemové koncentraci vodíku kolem 5–8 % dochází k jeho hoření. Proto je z důvodu prevence selhání integrity HO nutné zabránit hoření a velkých detonací vodíku v prostoru HO. Pro zajištění rychlé a účinné katalytické oxidace vodíku v HO na ETE jsou používány pasivní autokatalytické rekombinátory (PAR) založené na návrhu PAR společnosti AREVA. Ze zátěžových testů vyplynula potřeba zvýšení kapacity systému likvidace pohavarijního vodíku v HO, proto bylo na ETE zvýšeno množství PAR na 109 kusů [8]. Požadavky na odolnost, řízení a napájení PAR jsou: [23]

- odolnost na podmínky prostředí, vnitřní vlivy, seismicitu,
- požadavky na řízení a napájení nejsou z důvodu jejich pasivní funkce.

Vlastní konstrukce PAR se skládá z platinového katalyzátoru ve tvaru povlakovaných plechů a vnějšího pláště s horním a dolním průduchem, které umožňují proudění vzduchu přes PAR komínovým efektem. K funkci PAR dojde pouze za přítomnosti vodíku a kyslíku v HO při objemové koncentraci vodíku v HO v rozmezí 0,5–2 %. Jejich efektivita závisí také na rozmístění PAR v HO, kde je umístění jednotlivých PAR dáno analýzami hromadění vodíku v konkrétních místnostech HO. [11] Schéma rozmístění některých PAR na ETE v budově hermetické obálky je zobrazeno na Obr. 7 a PAR firmy AREVA je zobrazený na Obr. 8.



Obr. 7. Schéma umístění PAR (červeně) ve vybraných místnostech HO na ETE. [11]



Obr. 8. PAR společnosti AREVA. [11]

V časně fázi TH je hlavním zdrojem vodíku oxidace zirkoniového pokrytí. Ale v případě protavení TNR dojde k vylití taveniny do šachty reaktoru a k intenzivní reakci taveniny s betonem, při které vzniká značné množství vodíku výrazně překračující množství produkované při oxidaci palivového pokrytí. Vzhledem k dlouhodobé likvidaci vodíku v prostoru HO se postupně snižuje koncentrace kyslíku v HO, což vede k nižší efektivitě PAR. Z toho důvodu je v dlouhodobé fázi TH potřeba přivádět vzduch z atmosféry, případně odvádět vzdušninu z HO přes ALT prostředek FCVS do atmosféry. [23]

4.4 Dlouhodobý odvod tepla z hermetické obálky

Po úspěšném zvládnutí časně fáze zmírňování následků TH pomocí základního scénáře (IVR-In) nebo pomocí scénáře pokrývajících neurčitosti základního scénáře (ExVC), je potřeba zajistit plnění ZBF i ve střednědobé a dlouhodobé fázi. Toho je dosaženo odvodem tepla produkovaného odparem chladiwa z TNR ven z HO a snižováním tlaku v HO. Oba tyto cíle se podílejí na zabezpečení obnovy plnění ZBF3, a tedy na prevenci velkých úniků RA látek do okolí JE. Pro jejich plnění je možné využít ALT prostředek TB 60 (resp. napojení DGČ na systém UJ), který pro svůj provoz vyžaduje chlazení vody čerpané z havarijní jímky GA201 pomocí výměníků systému TQ. Tento výměník je chlazen technickou vodou důležitou (TVD) přivedenou z bazénu rozstříku TVD pomocí ZPP čerpadla TVD. V případě nefunkčnosti tohoto čerpadla je potřeba provést jeho bypass pomocí DIV prostředku VF 90. [23], [24]

DIV prostředek VF 90 je z pohledu bezpečnostní klasifikace zařazen jako zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost, které však není vybraným zařízením podle Vyhl. č. 329/2017 Sb. Jde o prostředek složený z mobilní DG čerpací stanice (MČS), která je stejně jako DGČ umístěná v kontejneru na podvozku vně obestavby HVB v chráněném objektu. V případě potřeby je MČS dopravena na předem vytipovanou pozici vedle kobky čerpadel první nebo třetí divize TVD (podle divize, ke které je připojeno DGČ) a pomocí hadic propojených se sáním a výtlačkem ZPP čerpadla TVD (viz. Obr. 6). Konkrétní požadavky na odolnost, řízení a napájení ALT prostředku VF 90 jsou: [23]

- provozuschopnost a plnění funkce po seismické události v daném místě u HVB, odolnost vůči vnějším hazardům, vnějším extrémním vlivům a klimatickým podmínkám,
- řízení musí být provedeno z elektrorozvodny AE725/2, stav sdělován do TPS a musí být možnost ovládat armatury z ALT prostředků (mDG a přenosné ovládací kufry) a parametry pro stanovení provozu jsou snímány v rámci PAMS a SAMS a lokální parametry (teplota a průtok) musí být měřeny a sdělovány v rámci MČS,
- napájení musí být řešeno ze zdrojů I. kategorie ze SZN 1, 2, 3, případně z ALT prostředků – přenosné elektrocentrály pro napájení drobných spotřebičů (armatur).

4.5 Filtrovaný venting

Při ztrátě funkce dlouhodobého odvodu tepla z HO při TH je potřeba zajistit plnění ZBF3, k čemuž je možné použít nezávislý ALT prostředek FCVS využívaný pouze v úrovni DiD 4. Zároveň je možné tento prostředek využít i v případě neúspěšnosti

základního scénáře zmírňování následků TH (IVR-In), kdy dochází k intenzivní interakci taveniny s betonem v šachtě reaktoru, a v následku i k rychlému zvýšení tlaku v HO vlivem produkce vodíku a dalších plynů z této interakce. Princip funkce ALT prostředku FCVS spočívá v odpouštění parovzdušné směsi z HO přes filtroventilační zařízení do atmosféry, čímž snižuje tlakové i teplotní namáhání HO. Požadavky na odolnost, řízení a napájení ALT prostředku pro snižování tlaku v HO jsou: [23]

- odolnost částí umístěné uvnitř i vně HO na vnitřní vlivy a prostředí, seismická odolnost,
- řízení musí být provedeno ze zařízení na BD a ND a v elektrorozvodně AE725/2 a stav sdělován do TPS, možnost ovládat armatury musí být i z ALT prostředků (mDG a přenosné ovládací kufry) a parametry pro stanovení provozu jsou snímány v rámci PAMS a SAMS,
- napájení musí být řešeno ze zdrojů I. kategorie ze SZN 1, 2, 3 a zálohou mohou být ALT prostředky – přenosné elektrocentrály pro napájení drobných spotřebičů (armatur).

V současné době není ALT prostředek FCVS na ETE instalován. Nicméně v roce 2018 byla provedena studie koncepční části možnosti implementace FCVS na ETE [26] a v současné době probíhají práce na rozšíření úvodního projektu a následné implementaci FCVS na ETE. Studie koncepční části FCVS hodnotila technickou realizovatelnost umístění FCVS v mokré i suché variantě včetně možnosti napojení na stávající trasy a jejich případné potřebné úpravy. [26]

Princip mokré varianty FCVS spočívá v proudění parovzdušné směsi přes tzv. vodní scrubber. Podle předběžného návrhu jde o svislou válcovou nádobu se dvěma stupni filtrace. Prvním stupněm je vodní lázeň s případným doplňováním podpurných látek, v níž probíhá probublávání parovzdušné směsi z HO a odloučení radioaktivních částic a zejména organického jódu ze vzdušiny. Druhým stupněm je odlučovač kapek a filtr z kovových vláken pro filtraci malých částic aerosolů. Tyto dva stupně mohou být následovány ještě molekulovým sítem pro dočištění vzdušiny. Vzhledem k potřebným rozměrům scrubberu je uvažováno jeho umístění v obestavbě HVB. U této varianty je potřeba zároveň počítat s potřebou napojení FCVS na rozvod demivody a dusíku a potřebu konstrukčních úprav v prostoru umístění nádrže. [26]

Suchá varianta FCVS využívá k odstranění RA látek z parovzdušné směsi třístupňové filtrační zařízení složené z předfiltru, aerosolového filtru z kovových vláken pro odstranění částic aerosolů a sorpčního filtru pro odstranění elementárního a organického jódu. Jednotlivé stupně filtrace mohou být prováděny různými zařízeními, případně zařízeními kombinovaným. Na ETE byla zvolena varianta kombinovaného aerosolového a jódového filtru. Celkem byly uvažovány dvě varianty umístění kombinovaného filtračního zařízení a to buď uvnitř nebo vně HO. Z bezpečnostního hlediska je lepší umístění filtračního zařízení uvnitř hermetické obálky, nicméně nebylo nalezeno vhodné místo v HO pro jeho umístění. [26]

Pro přívod vzdušiny, resp. parovodní směsi, z HO do mokré i suché varianty FCVS je možné využít volné hermetické průchodky případně systém TL 42, který za normálních podmínek vytváří ve vnitřním prostoru HO podtlak. Základním požadavkem provozovatele ETE byl návrh řešení FCVS tak, aby šlo o pasivní systém co nejvíce nezávislý na stávajících systémech a aby měl co nejmenší počet akčních členů. Z tohoto důvodu byla varianta přívodu parovzdušné směsi z HO označena za nevhodnou. [26]

Odvod filtrovaného vzduchu z FCVS je osazený průtržnou membránou, která zajišťuje pasivní oddělení FCVS od okolní atmosféry. Vlastní odvod filtrovaného vzduchu musí být zaústěn do ventilačního komína, kde je zároveň prováděna radiační kontrola vypouštěného vzduchu.

Podle předběžného návrhu uvedeného ve studii koncepční části FCVS by mělo k první funkci FCVS dojít při tlaku v HO 0,77 MPa (abs), což je hodnota, při které je 5% pravděpodobnost selhání HO přetlakem. Vlivem funkce FCVS dochází ke snížení tlaku v HO a k uzavření systému FCVS dojde při snížení tlaku na 0,3 MPa (abs). K dalšímu otevření FCVS dochází při zvýšení tlaku v HO na hodnotu 0,5 MPa (abs). Otevření a zavření ventilů FCVS je řízeno manuálně z BD/ND operátorem. [26]

Aby bylo možné zaručit, že bude zvolená strategie zmírňování následků TH úspěšná, je potřeba ověřit, do jaké míry jsou technická a organizační opatření použitá v úrovních DiD 4, 5 úplná, robustní a nezávislá na systémech a prostředcích použitých v předchozích úrovních DiD, tj. v úrovni DiD 1–3b. Jednou z metod, kterou je možné použít, je metoda Funkčních analýz ochrany do hloubky.

5 Funkční analýzy v úrovních ochrany do hloubky

Metoda Funkčních analýz v úrovních ochrany do hloubky (FA DiD) je definovaná již v souboru obecných požadavků na projekt ETE [23]. Jde o metodu hodnocení bezpečnosti JE, která je založena na ověření plnění funkcí a cílů JE se zřetelem na dostupné lidské zdroje, technologii a další prostředky poskytující podklad pro určení, jak lze danou funkci zabezpečit a realizovat [23]. Cílem FA DiD je vytvoření modelu SKK, vzájemných vnitřních vazeb a funkčních závislostí mezi těmito systémy a projektovými východisky a požadavky v jednotlivých úrovních DiD pro prokázání dříve uvedených cílů a požadavků konceptu DiD (viz kap. 2). [27]

Hodnocení bezpečnosti JE pomocí FA DiD je založeno na požadavcích české jaderné legislativy a původním souboru ruských projektových východisek a požadavků upravených podle nové jaderné legislativy (zejména podle Zák. č. 263/2016 Sb. [1] a Vyhl. č. 329/2017 Sb.[7]). Spolu s těmito požadavky jsou respektována i doporučení uvedená v mezinárodních dokumentech publikovaných IAEA a WENRA. Metoda FA DiD v principu rozvíjí metodu „objective trees“ definovanou v IAEA SRS 46 [28], a to především v oblastech technického řešení a koncepce projektu. Ve FA DiD je totiž použito podrobnější členění technologických systémů, stavebních objektů a bezpečnostních cílů (resp. funkcí) projektu a projektových opatření pro ochranu fyzických bariér. [27]

Toto podrobnější členění se promítá i do vlastního datového modelu FA DiD, který obsahuje seznamy bezpečnostních a provozních funkcí a opatření, vnitřní vazby a vzájemné závislosti mezi systémy a odolnosti vůči možným hrozbám a mnoho dalších informací členěných podle jednotlivých úrovní DiD a dalších parametrů. Zároveň tento datový model obsahuje i informace o různých jevech, resp. hazardech, (vnitřních, vnějších, náhodných selhání SKK a chyb lidského faktoru a jejich kombinací) a jejich mechanismech jejich působení na SKK a o opatřeních působících proti nim.

Vzhledem k tomu, že metoda FA DiD obsahuje velké množství specifických pojmů, je před začátkem vlastních prací klíčové porozumění těmto pojmům. Pro tento účel jsou v následující podkapitole uvedené definice základních pojmů FA DiD.

5.1 Vymezení pojmů FA DiD

Typové funkce (TxF)

je souhrnné označení pro TBF, TVF či TPF (typové bezpečnostní funkce/typové funkce s vlivem na JB/typové provozní funkce). [23], [27]

Specifické funkce (SxF)

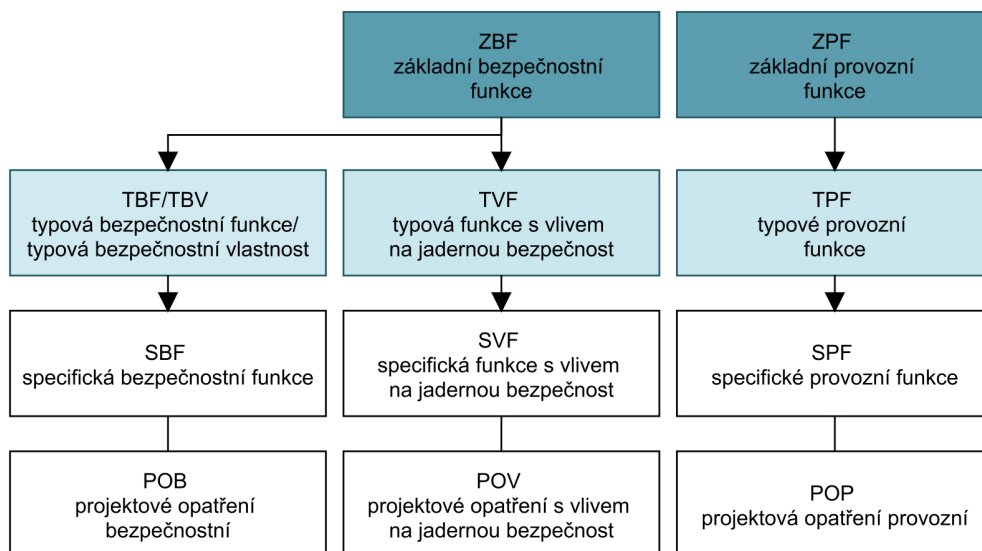
je souhrnné označení pro SBF, SVF či SPF (specifické bezpečnostní funkce/specifické funkce s vlivem na JB/specifické provozní funkce). [23], [27]

Projektová opatření (POx)

je souhrnné označení pro POB, POV či POP (projektová opatření bezpečnostní, projektová opatření s vlivem na jadernou bezpečnost a projektová opatření provozní). POx jsou výsledek prací na konzervativním projektu jaderného zařízení a jde zejména o konzervativní projektové postupy, vylepšené vlastnosti, schopnosti a odolnosti SKK nebo některé doplněné SKK mající za cíl zajistit potřebnou odolnost proti vnějším a vnitřním zátěžím, snížení četnosti nebo až praktickou eliminaci poruch. Dále projektová opatření zajišťují ochranu pracovníků a obyvatelstva před účinky vnitřních a vnějších hrozeb,

předcházení rozvoje PIU do závažnějších důsledků. Projektová opatření jsou většinou projektována již pro normální provoz, jejich přínos se ale využívá i ve vyšších úrovních DiD. Můžeme o nich mluvit jako o pasivní složce funkcí TxF/TBV. [23], [27]

Pro lepší přehled vzájemných vazeb mezi dříve definovanými bezpečnostními a provozními funkcemi jsou na Obr. 9 tyto vzájemné vztahy zobrazeny.



Obr. 9. Schéma vazeb mezi bezpečnostními a provozními funkcemi.

Funkční skupina (FSK)

je soubor SKK, které vykonávají všechny činnosti potřebné k zajištění funkce, skládající se obecně z výkonných, ochranných/řídících a podpurných SKK, které jsou odolné nebo chráněné proti hrozbě (PIU) vyvolávající požadavek na plnění této funkce. Princip spolupráce SKK (FaSK) v rámci FSK je základním principem víceprofesní spolupráce na konzervativním projektu. [23]

Funkční analytická skupina (FaSK)

je množina SKK stejné profese, které se v daném funkčním řetězci podílejí plněním své SxF nebo POx na plnění dané konkrétní TBF, TBV, TVF nebo TPF v rámci funkčních řetězců. Jedna FaSK může být součástí několika funkčních řetězců, a tím se podílet na plnění několika TBF, TBV, TVF či TPF. [23]

Funkční řetězec

je množina jednotlivých funkčních skupin FaSK tvořená z jednotlivých SKK, které vzájemně spolupracují a jako celek zajišťují plnění jedné konkrétní TBF, TBV, TVF nebo TPF. Funkční řetězec obvykle plní TBF, TBV, TVF nebo TPF jen v určité úrovni DiD, ale existují i některé vybrané FŘ, které plní tyto funkce i ve více úrovních DiD. V případě selhání daného funkčního řetězce přebírá výkon TBF, TBV, TVF, respektive TPF, jiný funkční řetězec z vyšší úrovně DiD. [23]

Vykonávaná SxF/POx

je SxF/POx, kterou FaSK vykonává na příslušném funkčním řetězci, a tím se podílí na plnění dané TxF/TBV. [23], [27]

Podpurná SxF/POx

je SxF/POx, kterou daný FaSK potřebuje na příslušném funkčním řetězci, a která podmiňuje jeho schopnost vykonávat jeho SxF/POx, a tím se podílet na plnění dané TxF/TBV. [23], [27]

Vylepšující SxF/POx

je podpůrná SxF/POx daného FaSK, která není nezbytně nutná pro plnění SxF/POx daného FaSK, ale pokud by byla k dispozici, zlepšila by možnost plnění těchto SxF/POx je označena jako vylepšující podpůrná funkce. Na funkčním řetězci jsou vylepšující funkce značeny specifickým kódem funkce uvedeným v hranatých závorkách. [23], [27]

Jevy

jsou negativní zátěže, které působí na FSK prostřednictvím mechanismů a v důsledku mohou být příčinou ztráty některých (příp. všech) SxF/POx daného FSK. Jevy se v zásadě dělí na vnitřní a vnější, včetně náhodných poruch SKK a chyb obsluhy (lidský faktor) a uvažují se i jejich kombinace [7]. [23]

Efekt

je specifický projev (účinek) určitého jevu. Obecně má každý jev jeden nebo i více efektů. [23]

Mechanismus

vyjadřuje fyzikální nebo jinou podstatu účinku vyvolaného jevem (efektem jevu) a jeho parametrizaci. Parametry mohou být různého charakteru: kvalitativní, kvantitativní a časové. [23]

Hrozba

je komplexní problém (porucha, slabina), v dané úrovni DiD vzniklá působením jednoho či více jevů prostřednictvím příslušných mechanismů těchto jevů. Pojem principiálně odpovídá zobecněné PIU. [23]

Nezávislost

je vlastnost projektu umožňující zajištění požadované funkce pomocí dvou nebo více funkčních řetězců odolných proti poruše. Nezávislost je důležitou podmínkou pro zálohování (redundanci) systémů a opatření a je potřeba ji řešit vůči PIU, při které má systém fungovat (odolnost, ochrana, vstupy a výstupy), mezi redundantními systémy ve stejné funkční úrovni DiD nebo mezi systémy v různých funkčních úrovních DiD. Ve FA DiD se ověřuje míra nezávislosti jednotlivých úrovní DiD, tj. nezávislost technických a organizačních prostředků chránících fyzické bariéry vůči specifickým hrozbám. Ověření míry nezávislosti úrovní DiD souvisí s dostatečnou nezávislostí linií DiD (technické a organizační prostředky) a je spojeno s konkrétní hrozbou, respektive PIU. [23]

Zálohování

je metoda zajišťování zvýšené spolehlivosti SKK použitím záloh. Redundance spočívá v zajištění záložních SKK buď identických (stejnorodých) nebo diverzifikovaných (různorodých) tak, aby kterákoliv z nich mohla plnit požadovanou funkci. Spolehlivost plnění funkce souvisí s mírou nezávislosti redundantních SKK. [23]

Diverzita (různorodost)

je zajištění požadované funkce pomocí dvou nebo více systémů, založených na odlišné technologii, odlišném fyzikálním principu nebo i umístění tak, aby byla minimalizována možnost jejich selhání z důvodů poruchy se společnou příčinou. [23]

Robustnost

je míra schopnosti zvládnout/absorbovat hrozbu, resp. PIU vyvolané vnějšími i vnitřními vlivy včetně jejich kombinací (tj. poruchy SKK, rizikové vlivy, havarijní stavy a další) a v potřebné míře zajistit plnění požadované funkce, a tím zajistit schopnost zůstat při hrozbě, resp. PIU, v dané úrovni DiD. [23]

Linie DiD

tvorí jednotlivé FaSK nebo jimi tvořené řetězce FaSK – funkční řetězec a slouží jako vícenásobné co nejvíce navzájem nezávislé prostředky zabezpečující v dané profesi vykonávání potřebných bezpečnostních, respektive provozních funkcí. Linie jsou zakreslovány do mapy funkcí. [27]

Celkový funkční řetězec

je funkční řetězec sestavený z dostupných linií DiD všech relevantních profesí pro určitou PIU s uvažováním stavů a režimu bloku a režimů profesních SKK za účelem plnění požadované TBF, TBV, TVF či TPF. [27] Pro potřeby FA DiD je dále definován počáteční celkový funkční řetězec před aplikací hrozby a výsledný celkový funkční řetězec po aplikaci hrozby.

Provisions (PRV)

jsou taková technická a organizační řešení, která zmírňují nebo eliminují efekty a mechanismy působení jevů, a tím zajišťují plnění SxF a související POx. Soubory PRV tedy potlačují hrozby a jsou aplikovány ve formě projektových požadavků kladených na jednotlivé FaSK či skutečných vlastností FaSK zajišťujících odolnost FaSK vůči hrozbě. [27] Pro potřeby FA DiD jsou PRV definovány jako příznaky jednotlivých FaSK, respektive jejich SxF/POx, které vyznačují, že pro daný FaSK nebo jeho části vykonávající určené SxF/POx, je přijat úplný soubor takových technických a organizačních řešení, která zmírňují nebo eliminují efekty a mechanismy působení jevů a garantují funkčnost FaSK.

PRV je možné dělit na kvantitativní, které má přiřazeny parametry spojené s mechanismem působení hrozby (např. silové účinky od seismicity) a kvalitativní (např. diviznost 3×100 %).

Linie DiD v mapě funkcí

slouží v mapě funkcí pro jedno profesní sloučení souvisejících funkčních řetězců. Linie DiD tvoří vícenásobné, co nejvíce vzájemně nezávislé prostředky, zabezpečující v dané profesi vykonávání potřebných substitucí typových funkcí (SUB). Pro účely FA DiD a zobrazení mapy funkcí se rozlišují dva typy linií DiD: [27]

- **Výkonná** – v jedné či více úrovních DiD se podílí v konkrétní konfiguraci svými funkčními řetězci na plnění požadované výkonné SUB. Pro jednu konfiguraci v jedné SUB bude existovat pouze jedna souhrnná linie DiD obsahující všechny výkonné funkční řetězce potřebné v dané profesi pro splnění SUB. V dané SUB může existovat i více linií DiD, ale jen v případě, že následující linie DiD nahrazuje předchozí v plnění požadované SUB, a tím předchozí linii DiD zálohuje. Je namalována pod příslušným SUB.
- **Podpůrná** – linie DiD vytvářené v mapě funkcí pro podpůrné SUB. Jednotlivé funkční řetězce jsou podle souvislosti seskupeny do linií DiD. Podpůrné linie DiD jsou do celkových funkčních řetězců vybírány podle požadavků výkonných linií DiD za účelem splnění požadavku výkonné linie DiD.

Konfigurace

určuje variantní horizontální stupňovitou sestavu linií DiD v závislosti na výchozím režimu bloku nebo pro výsledný celkový funkční řetězec v závislosti na uvažované PIU. [27]

Mapa funkcí

je grafické znázornění funkčních vazeb FaSK potřebných pro plnění požadovaných SUB v úrovních DiD. Tvoří ji tabulka členěná v jednom směru na SUB (osa x) a v druhém na úroveň DiD (osa y).

Jedno pole mapy vymezené určitou SUB a úrovní DiD obsahuje všechny linie DiD, které byly nalezeny analýzou pro naplnění příslušné SUB ve stanovené úrovni DiD. Každé pole mapy funkcí může být rozděleno na „konfigurace“ v závislosti na výchozím režimu bloku nebo v závislosti na následcích určité hrozby (PIU), např. LOCA. [27]

5.2 Struktura modelu

Vlastní model FA DiD se skládá ze dvou částí – z datového modelu a ze softwarového nástroje HIDRA nad tímto datovým modelem. Datový model je ve výsledku databáze všech bezpečnostních a provozních funkcí a opatření, veškerých vztahů a závislostí mezi nimi, množin jevů, hrozeb a jejich mechanismů a odolností působících proti těmto jevům (aby bylo zajištěno plnění požadované funkce). Výsledky inženýrského posouzení hodnotícího vztah mezi funkcemi, zátěžemi a opatřeními a mapy funkcí přiřazující SUB/funkce a úrovně/linie DiD pomocí funkčních skupin a funkcí, které si funkční skupiny vzájemně poskytují. [27]

Vzhledem ke značnému množství informací obsažených v datovém modelu bylo potřeba vytvořit uživatelsky příjemné prostředí pro vpisování do datového modelu. K tomuto účelu byl vytvořen nad datovým modelem softwarový nástroj HIDRA, který umožňuje jednodušší tvorbu vnitřních vazeb a funkčních závislostí mezi jednotlivými SKK JE. Tento softwarový nástroj je spolu s inženýrským hodnocením používán pro vyhodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti jednotlivých úrovní DiD při aplikaci určité hrozby.

Metodika práce s datovým modelem, resp. se softwarovým nástrojem HIDRA, je podrobně popsána v dokumentu Metodika FA DiD [27]. Tato metodika byla použita i v této diplomové práci pro vytvoření datového modelu a vyhodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti pro soubor opatření pro zmírňování následků TH. V následující kap. 6 je popsána tvorba datového modelu (tj. seznam plněných TxF/TBV, SxF/POx, funkčních řetězců atd.) a poté v kap. 7 je popsáno vyhodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti pro soubor opatření pro zmírňování následků TH.

6 Sestavení datového modelu Funkčních analýz ochrany do hloubky

Soubor opatření pro zmírňování následků TH se skládá z DIV prostředku pro odtlakování I.O., ALT prostředku pro zaplavení AZ a dlouhodobý odvod tepla z HO, systému spalování vodíku v HO a ALT prostředku pro snižování tlaku v HO. Funkceschopnost těchto prostředků je projektem předpokládána v úrovni DiD 4 (výjimečně i v úrovni DiD 3b), ale svoje funkce jsou schopny plnit i v nižších úrovních DiD v případě nedostupnosti ZPP nebo DIV prostředků.

Při sestavování datového modelu FA DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH na ETE byla respektována logika prací popsaná v Metodice FA DiD [27]. Ta spočívá v postupu od definování SxF/POx, přes sestavení funkčních závislostí (funkčních řetězců), tvorbu linií DiD a mapy funkcí, definici hrozeb a odolností působících proti nim až po aplikaci hrozeb na mapu funkcí a řešení případných kolizí.

6.1 Stanovení typových funkcí a vlastností

Prvním krokem při tvorbě datového modelu FA DiD je výběr TxF/TBV, jejichž plnění souborem opatření pro zmírňování následků TH je v jednotlivých úrovních DiD požadováno nebo předpokládáno. Typové funkce se skládají z typových bezpečnostních funkcí (TBF), typových funkcí s vlivem na jadernou bezpečnost (TVF) a typových provozních funkcí (TPF).

TBF vychází ze ZBF a rozvíjejí plněné činnosti, cíle a definují podmínky pro plnění bezpečnostních funkcí. Konkrétní seznam TBF je specifický pro každý projekt JE a jejich definice je založena na Příloze č. 1 Vyhl. 329/2017 Sb. [7] a mezinárodních dokumentech včetně těch s vazbou na hodnocení havárie na JE Fukušima. Analogií TBF jsou typové bezpečnostní vlastnosti (TBV), které jako takové nevykonávají žádné funkce, ale podílejí se na plnění ZBF (jde například o pasivní funkce, zajištění spolehlivosti systémů, apod.). V rámci FA DiD jsou TBF a TBV značeny podle následujícího schématu:

X_TBFYY, resp. **X_TBVYY**, kde

X .. je vazba na konkrétní ZBF (X = 1 na ZBF 1, X = 2 na ZBF 2, X = 3 na ZBF 3 a X = 0 na všechny tři ZBF) a

YY . je pořadové číslo TBF, resp. TBV.

TVF rozvíjí plněné činnosti, cíle a definují podmínky pro plnění funkcí s vlivem na jadernou bezpečnost, čímž se také podílejí na plnění ZBF. Hlavním dokumentem pro definování TVF je Vyhl. č. 329/2017 Sb., konkrétně § 8, kde jsou definována zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost, která nejsou vybraným zařízením, a slouží k omezení dopadů selhání nebo poruch vybraných zařízení a jejich porucha může negativně působit na vybraná zařízení (tj. jde o požadavky na DIV a ALT prostředky). Syntaxe značení TVF ve FA DiD je principiálně shodná se značením TBF, a proto se řídí schématem:

TVFYY, kde

YY .. je pořadové číslo TVF.

TPF tvoří soubor typových funkcí podílejících se na plnění základních provozních a ekonomických cílů JE přímo nebo jako podpůrné funkce. V principu vycházejí TPF z ZBF

a podporují, přispívají nebo zajišťují jejich plnění zejména v normálním provozu. Jedná se typicky o funkce související se stabilní výrobou elektrické energie, zajištěním spolehlivosti výrobních procesů, podporou a zajištěním některých činností při odstávkách a poskytováním potřebných informací obsluze. Plněním těchto funkcí se rovněž předchází aktivaci bezpečnostních systémů a systémů souvisejících s jadernou bezpečností při přechodu JE do abnormálního stavu, čímž se podílejí na plnění koncepce DiD. Značení TPF v rámci FA DiD odpovídá schématu použitému i u TVF, a to:

TPFYYY, kde

YYY .. je pořadové číslo TPF.

V rámci prací FA DiD je potřeba určit, které TxF/TBV musí být plněny v jednotlivých úrovních DiD. Při určování těchto požadavků se vychází z definic stavů bloku, požadavků na plnění jaderné bezpečnosti a z formulace jednotlivých TxF/TBV. Seznam TxF/TBV a požadavků na jejich plnění v různých úrovních DiD je uvedený v Tab. 2 včetně vyznačených TxF/TBV, jejichž plnění je zajišťováno souborem opatření pro zmírňování následků TH.

Tab. 2. Požadavky na plnění TxF/TBV v různých úrovních DiD dle Vyhl. č. 329/2017 Sb. [7]. Vysvětlivky k tabulce jsou uvedeny v následující Tab. 3.

ZBF	Typové funkce a vlastnosti pro JZ s reaktorem		Úrovně DiD, kde je TxF/TBV plněna					
			1	2	3a	3b	4	5
	TBF, TBV, TVF							
ZBF1	1.TBF02	Zabránění nepříjemných přechodových procesů reaktivity.						
	1.TBF03	Udržení jaderného reaktoru ve stabilizovaném podkritickém stavu po všech činnostech, které vedly k jeho odstavení, a po každém z jeho odstavení.						
ZBF2	2.TBF05	Udržení dostatečného množství chladiva pro chlazení aktivní zóny v průběhu základních projektových nehod, při kterých nedošlo k porušení tlakové hranice primárního okruhu, a po odeznění příčin těchto havarijních podmínek.						
	2.TBF06	Udržení dostatečného množství chladiva pro chlazení aktivní zóny jaderného reaktoru při všech provozních stavech zohledněných v projektu jaderného zařízení.						
	2.TBF07	Zajištění odvodu tepla z aktivní zóny a k omezení poškození jaderného paliva při základní projektové nehodě s porušením hranice primárního okruhu.						
	2.TBF08	Nezbytný odvod zbytkového tepla z aktivní zóny v průběhu provozních stavů a při základní projektové nehodě, při které nedošlo k porušení integrity hranice primárního okruhu.						
	2.TBF09	Odvod tepla z bezpečnostních systémů do okolního prostředí.						
	3.TBF12	Omezení úniku radioaktivní látky z hermetické obálky v rozšířených projektových podmínkách.						
	3.TBF13	Udržení ozáření pracovníků jaderného zařízení a obyvatelstva při radiační mimořádné události v havarijních podmínkách včetně událostí, jejichž následkem může dojít k unikům RA látek a šíření ionizujícího záření ze zdrojů ionizujícího záření.						

Pokračování Tab. 2

ZBF	Typové funkce a vlastnosti pro JZ s reaktorem		Úrovně DiD, kde je TxF/TBV plněna					
			1	2	3a	3b	4	5
	TBF, TBV, TVF							
ZBF3	3.TBF29	Nezbytné omezení úniků radioaktivní látky z hermetické obálky v průběhu havarijních podmínek a po dosažení stabilizovaného podkritického stavu jaderného zařízení při základní projektové nehodě.						
	3.TBV02	Pasivní funkce (integrita) SKK fyzické bariéry pokrytí jaderného paliva.						
	3.TBV03	Pasivní funkce (integrita) SKK tlakové hranice primárního okruhu.		*	*	*	*	
	3.TBV04	Pasivní funkce (integrita) SKK fyzické bariéry hermetické obálky.						**
Společné funkce	0.TBF19	Nezbytná dodávka energií nebo řízení provozu vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 2 při plnění jejich bezpečnostních funkcí.						
	0.TBF20	Zajištění provozuschopnosti jiných vybraných zařízení při plnění jejich bezpečnostních funkcí s výjimkou dodávek energie nebo řízení jejich provozu.						
	0.TBF21	Udržení podmínek prostředí nutných pro provoz bezpečnostních systémů a pro přístup pracovníků obsluhy jaderného zařízení k provádění činností důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, technické bezpečnosti a monitorování radiační situace.						
	0.TBF30	Bezpečnostní funkce ochranného nebo informačního systému kontroly a řízení, která je požadována pro dosažení stabilizovaného podkritického stavu, k zabránění vzniku závažnější než základní projektové nehody a ke zmírnění důsledků základní projektové nehody.						
	0.TBF31	Bezpečnostní funkce ochranného nebo informačního systému kontroly a řízení nutná pro zajištění informace nezbytné pro provedení činností pracovníků obsluhy nutných k dosažení stabilizovaného podkritického stavu jaderného zařízení.						
	0.TBF32	Dodávka energií nebo pro řízení provozu vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 3 při plnění jejich bezpečnostních funkcí.						
	0.TBF33	Bezpečnostní funkce systémů kontroly a řízení nezbytná pro dosažení a udržení bezpečného stavu jaderného zařízení nebo pro zabránění nežádoucímu rozvoji havarijních podmínek.						
	0.TBF35	Bezpečnostní funkce systémů kontroly a řízení, která nahrazuje bezpečnostní funkce vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 2 nebo 3 diverzními prostředky při ztrátě jejich funkce v důsledku poruchy ze společné příčiny.						

Pokračování Tab. 2

ZBF	Typové funkce a vlastnosti pro JZ s reaktorem		Úrovně DiD, kde je TxF/TBV plněna					
			1	2	3a	3b	4	5
	TBF, TBV, TVF							
Společné funkce	0_TBF36	Bezpečnostní funkce systémů kontroly a řízení sloužící k zabránění vzniku nebo omezení důsledků méně významných úniků radionuklidů mimo jaderné zařízení.						
	0_TBF37	Bezpečnostní funkce systémů kontroly a řízení potřebné pro monitorování a signalizaci vzniku a důsledků vnitřních událostí a parametrů vlastností území působících negativně na úroveň zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a technické bezpečnosti.						
	0_TBF38	Nahrazující bezpečnostní funkce vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 2 nebo 3 diverzními prostředky při ztrátě jejich funkce v důsledku poruchy ze společné příčiny.						
	0_TBF41	Funkce systémů kontroly a řízení, které jsou jediným prostředkem pro řízení sledovaného provozního parametru jaderného zařízení.						
	0_TBV05	Zajištění bezpečného stavu funkcí ochranného nebo informačního systému kontroly a řízení, jejichž porucha nebo nežádoucí spuštění funkce vybraného zařízení by mohly vést k nežádoucím důsledkům, zejména není-li k dispozici funkce jiného vybraného zařízení.						
	0_TBV09	Předcházení poruchám vybraných zařízení, pokud by mohly vést k narušení plnění jejich bezpečnostních funkcí, nebo pro omezení následků těchto poruch.						
		TVF01	Omezení dopadů selhání nebo poruch vybraných zařízení pro zvládnutí DEC.					
	TVF02	Zamezení negativního vlivu vlastních poruch, jež mohou při působení vnitřních nebo vnějších vlivů negativně působit na vybraná zařízení.						

Tab. 3. Vysvětlivky ke značení plnění TxF/TBV v Tab. 2

	TxF/TBV funkce souboru opatření pro zmírňování TH vyžadované v jednotlivých úrovních DiD, ale řešeny budou pouze v úrovních DiD 4, 5.
*	Funkce 3_TBV03 v úrovni DiD 2 připouští kompenzovatelný únik, v úrovni DiD 3a, 3b havárii LOCA a v úrovni DiD 4 je pro její plnění požadováno už jen zachování integrity TNR.
**	Funkce 3_TBV04 je v úrovni DiD 5 plněna, ale připouští možné porušení a únik, nicméně konstrukce HO nesmí spadnout.
	Tyto funkce nebudou řešeny.

6.2 Stanovení specifických funkcí a projektových opatření

Druhým krokem při tvorbě datového modelu FA DiD je rozdělení SKK do funkčních analytických skupin (FaSK) a definování vykonávaných a podpurných specifických

funkcí a projektových opatření (SxF/POx) pro jednotlivé FaSK souboru opatření pro zmírňování následků TH. Tyto SxF/POx ve výsledku popisují úlohu jednotlivých FaSK na plnění konkrétních TxF/TBV v rámci funkčních řetězců.

Nejprve bylo potřeba definovat jednotlivé FaSK a přiřadit jim označení dle jednotného systému značení v rámci FA DiD. V syntaxi je z historických důvodů místo označení FaSK využito zkratky FSK. Syntaxe značení samotná je:

FSK_X_YY, kde

X .. určuje kód profese (A = I.O., B = technologie kromě I.O., E = elektro, Q = SKŘ a S = stavba) a

YY . je pořadové číslo v dané profesi.

Podle toho, na jaké TxF/TBV se FaSK podílí, je možné SxF/POx rozdělit do tří, resp. šesti, skupin. Tyto skupiny pro specifické funkce jsou specifické bezpečnostní funkce (SBF), specifické funkce s vlivem na jadernou bezpečnost (SVF) a specifické provozní funkce (SPF). Projektová opatření se dělí, obdobě jako SxF, na projektová opatření bezpečnostní (POB), projektová opatření s vlivem na jadernou bezpečnost (POV) a provozní projektová opatření (POP). Syntaxe značení SxF, resp. POx, je uvedena na následujícím schématu:

SxF_X_YYY, resp. **POx_X_YYY**, kde

x ... určuje, zda jde o specifickou funkci bezpečnostní (x = B), s vlivem na jadernou bezpečnost (x = V) nebo provozní (x = P),

X .. definuje vazbu na profesi nebo část jadernou (I.O.; X = A), strojní (II.O.; X = B), elektro (X = E), kontroly a řízení (X = Q) a stavební (X = S) a

YYY .. je pořadové číslo v dané profesi.

V kap. 6.2.1–6.2.4 jsou blíže specifikovány SxF/POx vykonávané souborem opatření pro zmírňování následků TH na ETE. V kap. 6.2.5 je uvedený seznam podpůrných SxF/POx potřebných pro správnou funkci tohoto souboru.

6.2.1 Diverzní prostředek pro odtlakování I.O.

V úrovních DiD 1–3a plní funkci snižování tlaku ZPP systém ochrany I.O. od převýšení tlakem, proto není v těchto úrovních funkce DIV prostředku pro odtlakování I.O. požadována. I přesto je DIV prostředek pro odtlakování I.O. připraven na plnění své funkce v případě její potřeby i v DiD 1–3a.

V úrovni DiD 3b může DIV prostředek odtlakování I.O. (FSK_A_046) plnit svou funkci Odtlakování I.O. při DEC A a TH (SBF_A_174), jejíž sekundárním plněním je podpora metody Feed & Bleed. To proto, že díky snížení tlaku v I.O. se mohou prosadit i systémy zajišťující dodávku chladiva do AZ při nižším tlaku než aktivní bezpečnostní systémy (např. hydroakumulátory apod.). V úrovni DiD 4 již plní DIV prostředek pro odtlakování I.O. při TH svou funkci rychlého odtlakování I.O. dle návodů SAMG, která je součástí funkce SBF_A_174.

Ačkoliv není v současné době DIV prostředek pro odtlakování I.O. na ETE implementován, je možné předpokládat, že bude realizován napojením tras na systém ochrany I.O. od převýšení tlakem, který je součástí tlakové hranice I.O. Z toho důvodu je potřeba zajistit integritu tras systému ochrany I.O. od převýšení tlakem i integritu tras DIV prostředku pro odtlakování I.O. (POB_A_512).

Seznam všech vykonávaných SxF/POx DIV prostředkem pro odtlakování I.O. včetně jejich názvu a podrobného popisu jednotlivých funkcí a opaření je uveden v Tab. 4.

Tab. 4. Seznam SxF a POx pro DIV prostředek pro odtlakování I.O.

SxF/POx	Název	Popis
SBF_A_174	Odtlakování I.O. při DEC A a TH (DEC B)	V případě, že předcházejícím scénář nebyla LOCA havárie, musí být zajištěno dostatečně rychlé snížení tlaku v I.O., čímž dojde k prevenci HPME a umožnění včasného zahájení strategie IVR-In. Uvedenou SBF je zajištěna i sekundární funkce – podpora metody Feed & Bleed uvažovaná v DEC A.
POB_A_512	Udržení integrity trasy DIV prostředků pro odtlakování I.O. spadající do tlakového okruhu reaktoru	Potravní trasa DIV prostředků pro odtlakování I.O. po první uzavírací armaturu (včetně) tvořící tlakovou hranici I.O. musí zachovat svou integritu za všech stavů JE.

6.2.2 Zaplavení AZ v TNR a dlouhodobý odvod tepla z HO

V úrovních DiD 1–3b plní funkci doplňování chladiva do I.O., resp. AZ, ZPP systém doplňování, odpouštění a regulace kyselinou boritou (DiD 1, 2), havarijní systémy chlazení zóny (DiD 3a, 3b) a v případě jejich selhání a odtlakovaného I.O. i DIV prostředek doplňování chladiva do TNR (DiD 3b). Přestože ALT prostředek doplňování chladiva do I.O. TB 60 v těchto úrovních DiD nepracuje, je připraven k plnění své funkce v případě její potřeby, která může nastat v případě selhání ZPP a DIV prostředků.

V úrovni DiD 4 plní funkci doplňování chladiva do AZ, resp. TNR, ALT prostředek doplňování chladiva do TNR TB 60 (FSK_A_027), který dodává chladivo do TNR přes potrubní trasy nízkotlakého systému havarijního chlazení aktivní zóny (NTTQ). Tuto dodávku chladiva reprezentuje funkce Doplňování chladiva do TNR systémem TB 60 přes bezpečnostní systémy (SBF_A_193), jejíž součástí je i dlouhodobý odvod tepla z HO, který je v DiD 4 zajišťován DIV prostředkem VF 90 (součást FSK_A_027). Další funkcí, kterou vykonává ALT prostředek TB 60, je snižování tlaku rozstříkem chladiva v boxech hlavních cirkulačních čerpadel (SBF_A_199) prostřednictvím skrápěcího zařízení systému UJ napojeného na výtlak DGČ.

Seznam vykonávaných SxF/POx souborem opatření pro zaplavení TNR a dlouhodobý odvod tepla z HO při TH včetně názvu a podrobného popisu funkcí a opaření je uveden v Tab. 5.

Tab. 5. Seznam SxF a POx pro soubor opatření pro zaplavení TNR a dlouhodobý odvod tepla z HO (TB 60 a VF 90).

SxF/POx	Název	Popis
SBF_A_193	Doplňování chladiva do TNR systémem TB 60 přes BS (NTTQ)	Zajištění přívodu média z ALT prostředku TB 60 přes trasy BS (NTTQ) pro strategii IVR-In. Tím je zajištěn dlouhodobý odvod zbytkového tepla z AZ po TH.

Pokračování Tab. 5

SxF/POx	Název	Popis
SBF_A_199	Sprchování boxů HCČ pro dlouhodobý odvod tepla z HO	Systém Zaplavení AZ v TNR a dlouhodobý odvod tepla z HO (TB 60) zajišťuje napojením do výtlačku požárních čerpadel systému UJ sprchování boxů HCČ. Touto funkcí systém TB 60 zajistí dlouhodobý odvod tepla z HO po TH.
SBF_A_201	Diverzní odvod tepla z výměníků HSCHZ pomocí systému VF 90 (MČS)	Systém VF 90 (MČS) zajišťuje během nadprojektových stavů a těžkých havárií odvod tepla z výměníků HSCHZ (diverzní systém k TVD).
POB_A_601	Udržení integrity tras systému TB 60	Potrubi trasy TB 60 po první uzavírací armaturu (včetně) napojené na NTTQ musí zachovat svou integritu za všech stavů JE.

6.2.3 Systém spalování vodíku v hermetické obálce

Funkce systému spalování vodíku v HO (FSK_A_015) je čistě pasivní, tedy není závislá na dodávkách elektrické energie ani jiných médií do systému pro zajištění jeho správné funkce. Na druhou stranu, jak již bylo zmíněno v kap. 4.3, je funkceschopnost tohoto systému podmíněna přítomností vodíku a kyslíku v HO. Ke katalytické reakci vodíku s kyslíkem za přítomnosti katalyzátoru totiž dochází až přibližně od objemové koncentrace vodíku 0,5 % v atmosféře HO. A vzhledem k tomu, že dosažení této objemové koncentrace je v úrovních DiD 1, 2 jen velmi málo pravděpodobné, není funkce systému spalování vodíku v HO v těchto úrovních DiD předpokládána, ale systém je v pohotovosti a připraven k plnění funkce. Současně je možné případné malé množství vodíku v HO odvést pomocí vzduchotechnického systému.

Ve vyšších úrovních DiD, tj. DiD 3a–4, zajišťuje systém spalování vodíku v HO funkci Spalování vodíku v HO v havarijních situacích (SBF_A_083) a Spalování vodíku v HO při TH (SBF_A_084). Tyto funkce jsou zajišťovány zcela pasivně PAR a pro monitorování objemové koncentrace vodíku v atmosféře HO slouží Systém monitorování koncentrace pohavarijního vodíku, který je vyvedený do systému PAMS.

Seznam plněných SxF/POx pro systém spalování vodíku v HO včetně názvu a podrobného popisu funkcí a opáření je uveden v Tab. 6.

Tab. 6. Seznam SxF a POx pro systém spalování vodíku v HO.

SxF/POx	Název	Popis
SBF_A_083	Spalování vodíku v HO v havarijních stavech	Fyzikální způsob splnění SBF spočívá v katalytickém spalování vodíku (exotermního slučování vodíku a kyslíku za vzniku vodní páry), který se vyvine při nehodě (DBA, DEC A a DEC B) tak, aby bylo zabráněno vzniku výbušné koncentrace vodíku v HO.
SBF_A_084	Spalování vodíku v HO při TH	Fyzikální způsob splnění SBF spočívá v katalytickém spalování vodíku (exotermního slučování vodíku a kyslíku za vzniku vodní páry), který se vyvine při těžké havárii (DEC B) tak, aby bylo zabráněno vzniku výbušné koncentrace vodíku v HO.

6.2.4 Filtrovaný venting HO

V úrovních DiD 1–3b neplní ALT prostředek FCVS (FSK_A_028) žádnou funkci. Funkce snižování tlaku v HO je totiž v těchto úrovních DiD plněna ZPP – sprchovým systémem HO (součást TQ systému), případně DIV prostředkem – připojení výtlaku ALT prostředku TB 60 do výtlakového potrubí systému UJ (jde o sekundární plnění funkce SBF_A_199). Nicméně ALT prostředek pro snižování tlaku v HO, systém FCVS, je v těchto úrovních DiD připraven k plnění své funkce v případě potřeby, pokud dojde k selhání ZPP nebo DIV prostředku.

ALT prostředek FCVS plní svou funkci až v úrovni DiD 4, a to pouze v případě, že dojde k selhání ZPP a DIV prostředků pro snižování tlaku v HO. Hlavní vykonávanou funkcí ALT prostředkem FCVS je snižování tlaku v HO při TH (SBF_A_213) odvodem vzdušiny z HO přes filtroventilační zařízení do okolní atmosféry. Vzhledem k tomu, že trasy systému FCVS vedou hermetickou průchodkou mimo HO, je potřeba zajistit integritu těchto tras (POB_A_600).

Seznam vykonávaných SxF/POx ALT prostředkem FCVS včetně názvu a podrobného popisu funkcí a opatření je uveden v Tab. 7.

Tab. 7. Seznam SxF a POx pro ALT prostředek FCVS.

SxF/POx	Název	Popis
SVF_A_213	Filtrovaný venting	Odvod paroplynné směsi z HO v DiD 4 přes filtroventilační zařízení do atmosféry. Sekundárním plněním této funkce je odvod tepla z HO.
POB_A_600	Integrita tras FCVS mimo HO	Konstrukce tras FCVS vně HO musí zajistit jejich integritu, a tím prevenci úniků RA látek do atmosféry.

6.2.5 Podpůrné systémy

Pro zaručení správné funkce souboru opatření pro zmírňování následků TH je potřeba zajistit celou řadu podpůrných funkcí a opatření jako jsou například vhodné podmínky prostředí, elektrické napájení, systémy kontroly a řízení (SKŘ), umístění ve stavebních objektech, zdroje chladiva a dalších.

Vhodné podmínky prostředí zaručují funkceschopnost jednotlivých systémů a prostředků souboru opatření pro zmírňování následků TH především odvodem tepelné zátěže od příslušných elektro a SKŘ částí. Tento odvod tepla je realizován vzduchotechnickým systémem za normálních i extrémních podmínek ve všech ročních obdobích. Současné řešení odvodu tepla vzduchotechnickým systémem je realizováno chlazením vzdušiny pomocí TVD, což je v případě PIU se ztrátou TVD nemožné. Kromě dostupnosti TVD je pro správnou funkci vzduchotechnického systému důležitá i dostupnost elektrického napájení, které musí být řešeno napájením z dieselgenerátorů určených pro SBO (AAC DG) nebo mobilní dieselgenerátorové stanice (mDG). Oba požadavky (chlazení v případě ztráty TVD a napájení z AAC DG a mDG) nejsou na ETE v současné době realizovány, proto je potřeba provést návrh lepšího řešení. [23]

Napájení elektro částí jednotlivých zařízení souboru opatření pro zmírňování následků TH využívá rozvodů SZN 1, 2, 3. Pro tyto rozvody existuje několik variant napájecích schémat. Napájení je možné z DIV zdrojů elektrické energie (AAC DG), ALT zdrojů elektrické energie (mDG) nebo zařízení disponují vlastním napájením

(např. DGČ a MČS), anebo v případě dostupnosti je možné použít zdroje vnějšího napájení. V případě, že je TH způsobena nezvládnutým SBO, jsou v krátkodobém horizontu k dispozici pouze zdroje nepřetržitého napájení (sítě I. a III/I. kategorie – akubaterie) a v dlouhodobém horizontu jsou k napájení při SBO primárně určeny AAC DG, případně mDG a nebo vlastní napájení (např. DGČ a MČS). [23]

Systém SKŘ zajišťuje spolehlivou funkci akčních členů souboru opatření pro zmírňování následků TH a monitorování vybraných parametrů jako je teplota, tlak, průtoky, atd. K těmto účelům slouží řízení a monitorování stavu celé JE z BD/ND, z rozvaděče elektro v místnosti AE752/2 nebo z mobilních prostředků. K vlastnímu monitorování vybraných parametrů při TH slouží přímo přiřazené sdělovače primárního systému ochran reaktoru (PRPS), diverzního systému ochran reaktoru (DPS) nebo PAMS, univerzální měřící přenosné skříňky nebo ALT prostředek pro monitorování vybraných parametrů – SAMS (který však není v současné době na ETE instalován ani navržen). Všechny měřené parametry jsou pak přenášeny do BD/ND, TPS, záložního TPS a do vnějšího havarijního podpůrného střediska pomocí záložních zdrojů komunikace (vysílačky). K dalším funkcím systému SKŘ patří i zajištění vnější a vnitřní komunikace a sdělování měřeného dávkového příkonu v areálu JE i v okolí. [23]

Poslední řešenou skupinou podpůrných funkcí jsou funkce od stavebních objektů a vnější infrastruktury. Stavební objekty zajišťují umístění a ochranu před vnějšími vlivy pro jednotlivá zařízení souboru opatření pro zmírňování následků TH. Tato zařízení jsou umístěna přímo v HO (např. PAR), v obestavbě HVB (např. FCVS), vně budovy HVB (DGČ) nebo v jiných budovách v areálu JE (např. MČS). Zajištění vnější infrastruktury slouží při TH zejména pro umožnění manipulace s mobilními prostředky v rámci areálu JE. [23]

Všechny podpůrné SxF/POx pro soubor opatření pro zmírňování následků TH jsou uvedeny v Tab. 8.

Tab. 8. Seznam podpůrných SxF/POx pro soubor opatření pro zmírňování následků TH

SxF/POx	Název	Popis
POB_A_517	Integrita VT potrubních tras mimo HZ	V rámci projektového opatření je zabezpečena integrita potrubních tras systému vysokotlakého havarijního vstřikování a doplňování mimo HZ.
POB_A_519	Integrita NT potrubních tras mimo HZ	V rámci projektového opatření je zabezpečena integrita potrubních tras nízkotlakého systému havarijního chlazení aktivní zóny mimo HZ.
POB_A_520	Integrita potrubních tras sprchového systému mimo HZ	V rámci projektového opatření je zajištěna integrita potrubních tras sprchového systému mimo hermetickou zónu.
POB_A_525	Nádrž GA201 obsahuje předepsanou koncentraci H_3BO_3	Toto projektové opatření stanovuje, že médium v nádrži GA201 obsahuje předepsanou koncentraci kyseliny borité.
POB_A_527	Tavenina palivového systému zajišťuje zabránění dosažení opětovné kritičnosti	Z důvodu nízkého obohacení uranu v tavenině a nepřítomnosti moderátoru je zajištěno zabránění dosažení opětovné kritičnosti v tavenině palivového systému.
POB_A_536	Napojení systémů důležitých z hlediska JB na I.O.	Integritou neporušených potrubních tras a dispozičním umístěním musí I.O. umožnit přívod média z připojených systémů pro chlazení AZ nebo taveniny ve všech režimech.

Pokračování Tab. 8

SxF/POx	Název	Popis
POB_A_540	Napojení NTTQ na AZ	V rámci projektového opatření je umožněna dodávka chladiva z divizí NTTQ přes trasy HDA (na které je napojena) pod a nad AZ. Tím se systém HDA podílí na zajištění funkční schopnosti systému NTTQ.
POB_A_541	Poskytnutí tras systémem ochrany I.O. pro systém odtlakování	V souladu s přijatou koncepcí řešení systému odtlakování I.O. při TH musí systém ochrany I.O. poskytnout trasy pro umožnění odtlakování I.O.
POB_A_589	Integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 10, 30 do TB 50	V rámci projektových opatření musí být zabezpečena integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 10, 30 pro doplňování chladiva do odtlakovaného I.O, BSVP a GA201 přes systém TB 50, 60.
POB_A_590	Integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 40 do TB 50	V rámci projektových opatření musí být zabezpečena integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 40 pro doplňování chladiva do odtlakovaného I.O, BSVP a GA201 přes systém TB 50, 60.
POB_A_591	Zásoba chladiva pro TB 50, 60	V rámci projektových opatření musí být zajištěna dostatečná zásoba chladiva v nádržích TB 10, 30 pro doplňování chladiva do odtlakovaného I.O, BSVP a GA201.
POB_A_592	Zásoba chladiva pro TB 50, 60	V rámci projektových opatření musí být zajištěna dostatečná zásoba chladiva v nádržích TB 40 pro doplňování chladiva do odtlakovaného I.O, BSVP a GA201.
POB_A_599	Využití tras systému TQ pro doplňování vody do GA201 a I.O. mobilními prostředky.	Toto POB poskytne potrubní trasy pro doplňování chladiva do GA201 a I.O. pomocí mobilních prostředků (mobilní čerpadlo s vlastním napájením) v DiD 3b.
POP_A_801	Zásoba roztoku H_3BO_3 v nádržích TB pro těžké havárie	Nádrže TB 10, 30 musí zajistit zásobu H_3BO_3 o předepsané koncentraci.
SBF_A_013	Odvod tepla z bezpečnostních systémů pomocí TVD	Systém TVD zajišťuje během provozních (normální a abnormální provoz) a havarijních stavů bloku odvod tepla ze spotřebičů BS.
SBF_A_192	Chlazení média z GA201 pomocí výměníků NTTQ	Plnění této funkce je požadováno v případě, kdy mají čerpadla ZPP (VTTQ, NTTQ, sprchový systém HO) nebo ALT prostředku (TB 60) plnit svou funkci. Médium z GA201 je chlazeno přes tepelné výměníky NTTQ TVD.
SBF_A_196	Doplňování média do GA201 systémem TB 50	Systém musí zajistit přívod média do GA201 BSVP při SBO a dalších nehodách. Tím jsou zajištěny podmínky pro funkci BS v případě snížení hladiny v GA201.
SBF_A_203	Doplňování nafty do ALT (mobilních) prostředků v dlouhodobé fázi TH HZSp	V dlouhodobé fázi TH je pro zaručení správné funkce DGČ a MČS důležité zajištění doplňování nafty do nádrží a příslušných čerpadel HZSp.
SVF_A_211	Alternativní doplňování vody do GA201 mobilními prostředky	Část mobilních prostředků musí zajistit alternativní možnost doplňování chladicí vody do GA201 při vzniku MU pro omezení jejích následků.

Pokračování Tab. 8

SxF/POx	Název	Popis
SBF_B.029	Odvod tepelných ztrát od technologických průchodek na hranici HO.	
SBF_B.053	Odvod tepelných ztrát od technologického zařízení v místnostech havarijních systémů TQ.	
SPF_B.301	Doplňování surové vody	Zajišťuje přívod surové vody pro doplňování chladicího okruhu, TVN a TVD.
SBF_E.001	Dodávka elektrické energie pro spotřebiče důležitosti Ia.	Napájení spotřebičů se zvýšenými požadavky na spolehlivost el. napájení a nepřipouštějící přerušení napájení delší než zlomky sekundy ve všech režimech včetně režimu úplné ztráty napětí pracovních i rezervních zdrojů vlastní spotřeby. Patří sem spotřebiče BS.
SBF_E.021	Dodávka elektrické energie pro spotřebiče SZN II. kategorie vyžadující napájení v DEC A (SBO)	Napájení spotřebičů (důležitost IIa.) se zvýšenými požadavky na spolehlivost napájení, připouštějící přerušení napájení na dobu od desítek sekund do několika minut. SBF zajišťuje i dodávku el. energie pro spotřebiče vyžadující napájení i při SBO.
SVF_E.201	Dodávka elektrické energie z mDG	SVF zajišťuje napájení projektem určených SKK z mDG pomocí kabelových propojů, popř. s využitím provozuschopné části elektrického rozvodu VS v rozšířených havarijních stavech (DEC A, B).
SVF_E.202	Dodávka el. energie z mobilních el. centrál HZS	Funkce musí zajistit alternativní možnost dodávky elektrické energie z mobilních el. centrál HZS.
SBF_Q.060	Přímo přiřazené 1E řízení a monitorování	Jde o ruční řízení a související monitorování zařízení, která jsou nezbytná pro havarijní odstavení reaktoru, izolaci HO, chlazení AZ a odvod tepla z HO a reaktoru nebo jsou jiným způsobem nezbytná při zabraňování významných úniků RA látek do okolí.
SBF_Q.061	Pevně propojené řízení z ND (FWC)	FWC slouží pro situace rozsouhlasení povelů ze systémů ESFAS (PRPS) a DPS, kdy není možno jednoznačně automaticky stanovit bezpečný stav akčního členu a pro rozhodnutí o poloze akčního členu postačuje obsluha delší časový horizont po přechodu na ND.
SBF_Q.062	Diverzní manuální řízení z BD (DMC)	DMC slouží pro situace rozsouhlasení povelů ze systémů ESFAS (PRPS) a DPS, kdy není možno jednoznačně automaticky stanovit bezpečný stav akčního členu, avšak je třeba určitý stav zvolit v krátkém časovém horizontu z BD dle průběhu události po ukončení zásahů ochranných systémů – umožní obsluhu rozhodnout o jejich stavu ručně.
SBF_Q.171	Ruční spouštění zásahů ESFAS	SBF zajišťuje možnost ruční aktivace nejdůležitějších zásahů ESFAS na systémové úrovni. Jedná se o ruční aktivace – tlak v HO, ztráta podchlazení, parní únik, uzavření všech RČA, sprchování HO, blokování TQ sprchování a TQ doplňování.

Pokračování Tab. 8

SxF/POx	Název	Popis
SVF_Q_920	Nouzové havarijní monitorování mobilními prostředky	
SVF_Q_991	Zajištění vyhrazené interní komunikace BD/ND s HRS a TPS	
SVF_Q_995	Zajištění alternativní vyhrazené komunikace zál. TPS	
SVF_Q_996	Zajištění řízení a ovládání z AE725/2	
POB_S_501	Udržení integrity hermetické obálky	Konstrukce tvořící hranici HO musí být odolné vůči působícím tlakům a teplotám při projektem uvažovaných haváriích a musí zajistit těsnost hranice HO v požadovaných limitech. Také musí být navrženy na zatížení zkušebním přetlakem a na působení návrhových tlaků a teplot. Stavební konstrukce včetně hermetických průchodek musí zajistit spolehlivé oddělení hermetického prostoru od okolí, a tím bude zamezeno úniku RA látek do okolí.
POB_S_503	Zásoba roztoku H_3BO_3 v GA201 pro HSCHZ	V rámci projektového opatření je zabezpečena zásoba roztoku H_3BO_3 pro TQ a TB 60.
POB_S_506	Zajištění opatření pro shromažďování chladiva z úniků I.O. v GA201	Dispoziční řešení konstrukcí uvnitř HO a spádování podlah musí zajistit svedení uniklého chladiva z I.O. do havarijní jímky GA201 určené pro sběr těchto úniků. Musí být vyhodnoceno riziko ucpání odtokových cest částmi zařízení z HO.
POB_S_516	Zajištění rozvodu vody na sání čerpadel TVD	Konstrukce objektu musí být navržena tak, aby se podílela na zajištění rozvodu vody na sání čerpadel TVD a zásoby TVD, to je zejména zajištěním potřebných prostor (jímek) s TVD. Konstrukce musí být dostatečně těsná, únosná a její deformace, jako odezva na zatížení, musí být maximálně taková, aby nějak neomezovala funkčnost systému.
POB_S_518	Vytvoření opatření pro odvod tepla z TVD do atmosféry pomocí bazénů TVD	Konstrukce stavebního objektu musí být navržena tak, aby se podílela na zajištění odvodu tepla z TVD do atmosféry, to je zejména konstrukčním a dispozičním řešením.
POB_S_529	Stínění ionizujícího záření v Reaktorovně	V návaznosti na požavky technologie a radiační ochrany musí být vybrané části konstrukcí Reaktorovny navrženy také z hlediska stínění ionizujícího záření.
POB_S_532	Zachycení a lokalizace úniků RA látek ze zdrojů, které se nacházejí v Reaktorovně	Stavební konstrukce Reaktorovny musí zajistit spolehlivé oddělení prostoru s možným únikem RA látek od okolí, a tím zamezují šíření RA látek po objektu a do okolí. Dispoziční řešení musí zajistit zachycení možných uniklých RA látek a jejich lokalizaci v předem určeném místě.

Pokračování Tab. 8

SxF/POx	Název	Popis
POB_S.535	Umožnění průchodu médií a energií skrze hranici HO	HO musí být vybavena průchodkami pro vedení potrubí a kabeláže skrz stěnu obálky. Armatury systémů potřebných pro zvládnutí havárie musejí umožnit průchod média v závislosti na stavu bloku. Tyto průchodky musí splňovat požadavky na pevnost a těsnost stejné jako konstrukce HO.
POB_S.536	Stínění ionizujícího záření ve Spojovacích mostech mezi HVB a BAPP	
POB_S.548	Zachycení a odvod RA kapalných látek z HO v normálním a abnormálním provozu	Dispoziční řešení konstrukcí uvnitř HO, spádování podlah a povrchová úprava stěn a podlah musí zajistit zachycení RA kapalných látek uvolněných z instalované technologie a jejich odvedení do určeného místa.
POB_S.554	Zajištění odolnosti HO vůči cliff-edge efektu pro zamezení časnému velkému úniku	Při návrhu konstrukcí na hranici HO, které přenášejí vnitřní havarijní přetlak, musí být v návrhu zahrnuta rezerva bránící náhlému porušení konstrukce při překročení návrhového přetlaku.
POB_S.569	Umožnění transportu a udržení zásoby chladiva pro IVR-In	Hermetická obálka musí svým dispozičním řešením umožnit udržení zásoby chladiva v HO pro účely IVR-In.
POB_S.571	Poskytnutí tras systémem UJ pro ALT prostředek TB 60	Systém UJ poskytuje trasy ALT prostředku TB 60 pro sprchování boxů HCČ při TH. Zároveň zajišťuje integritu těchto tras.
POV_S.702	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v Hermetické obálce	Konstrukce stavebního objektu musí být navržena tak, aby umožňovala umístění všech požadovaných technologických zařízení z hlediska prostorových a výškových dispozic. Musí být dostatečně únosná a její deformace, jako odezva na zatížení technologií, musí být maximálně taková, aby nijak neomezovala funkčnost umístěného zařízení; musí být navržena tak, aby ochránila uvnitř umístěné zařízení před nepříznivými vlivy událostí/zatížení přírodního původu ale i vyvolaných člověkem; musí zajistit umístěným zařízením takové prostředí, ve kterém je schopno zařízení plnit svoji funkci. Musí splňovat legislativní požadavky na dělení na požární úseky, zabránění šíření požáru a zplodin požáru, minimální dobu požadované únosnosti, maximální teplotu konstrukce na vnější straně požáru.
POV_S.703	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v Reaktorovně	
POV_S.708	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v objektu Dieselgenerátorové, kompresorové a čerpací stanice	
POV_S.716	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v Bazénech TVD	
POV_S.718	Vytvoření komínového efektu pro odvod a rozptýl vypuštěných RA látek	
POV_S.730	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v objektu Ventilačních komínů	

Pokračování Tab. 8

SxF/POx	Název	Popis
POV_S.736	Statická podpora HO od Reaktorovny	Nosné konstrukce Reaktorovny tvoří podporu nosných konstrukcí Hermetické obálky a musí být na zatížení přenášena z Hermetické obálky navrženy a posouzeny.
POV_S.749	Umístění a ochrana SKK s vlivem na JB umístěných v Kanálech TVD	Konstrukce stavebního objektu musí umožňovat umístění všech požadovaných technologických zařízení, musí být dostatečně únosná, její deformace nesmí omezovat funkčnost umístěného zařízení, musí chránit uvnitř umístěné zařízení před nepříznivými vlivy událostmi a zatíženími přírodního původu ale i vyvolaných člověkem a musí zajistit vhodné prostředí pro daná zařízení.
SBF_S.034	Lokalizace radioaktivních látek uvnitř HO v průběhu a po odeznění havarijních stavů (RČA)	Oddělovací armatury (RČA) na hranici HO musí být navrženy tak, aby zajistily spolehlivé oddělení hermetického prostoru od okolí, a tím zamezily úniku RA látek do životního prostředí.

6.3 Funkční řetězce

Třetím krokem při tvorbě datového modelu FA DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH je sestavení funkčních řetězců, které jsou grafickým znázorněním funkčních závislostí (vykonávaných a podpůrných SxF/POx) mezi jednotlivými FaSK podílejícími se na zajištění plnění konkrétních TxF/TBV v určité úrovni DiD. Funkční řetězec, resp. jeho grafické zobrazení v softwarovém nástroji HIDRA, se skládá ze záhlaví a vlastního grafického vyjádření funkčních závislostí mezi FaSK.

V záhlaví funkčního řetězce se nachází jeho základní charakteristiky, jako je označení, název, plnění TxF/TBV a úroveň DiD, v níž jsou tyto TxF/TBV plněny. Syntaxe označení funkčního řetězce je následující:

XX-YYY, kde

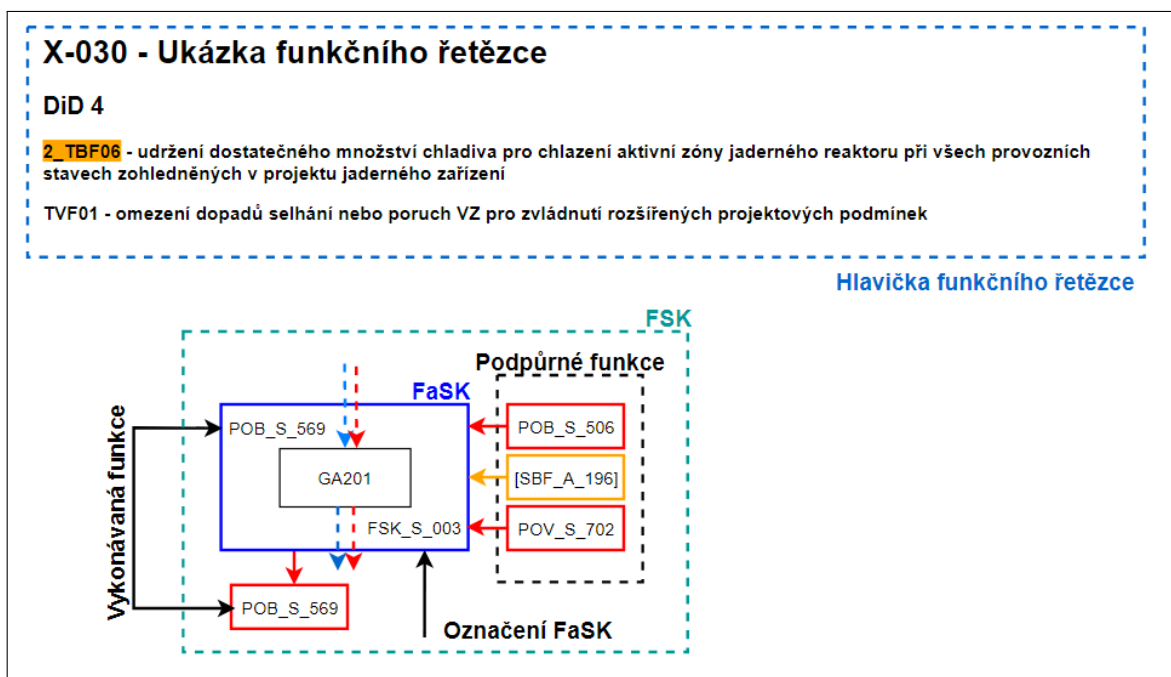
XX ... vyjadřuje plněnou skupinu TxF/TBV, tzv. SUB (Re = reaktivita, Z = zásoba chladiva, O = odvod tepla, U = úniky aktivity z HO, I – integrita fyzických bariér, Pr = zajištění prostředí, F = funkční, E = elektro, Q = SKŘ) a

YYY .. je pořadové číslo funkčního řetězce v daném SUB.

Samotné grafické znázornění funkčních závislostí na funkčních řetězcích se skládá z velkého množství prvků, jejichž terminologie byla vysvětlena v kap. 5. Jde zejména o jednotlivé FaSK, FSK, vykonávané a podpůrné SxF/POx, toky energie a různých médií a informační boxy. Umístění jednotlivých prvků na funkčních řetězcích se řídí pravidly uvedenými v Metodice FA DiD [27] a pro jednodušší pochopení těchto pravidel jsou prezentována na Obr. 10 na následující straně.

Plné šipky na funkčním řetězci značí funkční závislosti a přerušované šipky značí tok energie (červená barva), chladiva (modrá barva) nebo jiných látek jako jsou například plyny nebo nafta (černá barva). Informační boxy značené černým ohraničením se do datového modelu funkčních závislostí nepropisují. Jednotlivé vykonávané a podpůrné SxF/POx se na funkčním řetězci značí barvou respektující náležitost k profesi (viz Tab. 9 na následující straně).

V této diplomové práci jsou řešeny pouze funkční řetězce pro SUB řízení reaktivity,



Obr. 10. Umístění prvků na funkčním řetězci. Plné černé šipky a čárkované obdélníky značí popisované prvky.

Tab. 9. Barevné rozlišení SxF/POx na funkčních řetězcích podle náležitosti k profesím.

Funkční vazba	Profese	Barevné rozlišení
Na zajištění funkční způsobilosti	A	Žlutá
Na stavbu	S	Červená
Na elektrické napájení	E	Zelená
Na řízení	Q	Žltá
Na prostředí	B	Fialová

zásoby chladiva, zajištění integrity fyzických bariér, zajištění odvodu tepla z AZ/TNR a omezení úniků RA látek. Ostatní funkční řetězce byly sjednoceny do SUB podpůrných systémů. Konkrétní TxF/TBV jednotlivých SUB plněné v DiD 4, 5 a příslušné funkční řetězce jsou uvedeny v následujících kap. 6.3.1 – 6.3.6.

6.3.1 Řízení reaktivity

SUB řízení reaktivity je výkonný SUB, protože se podílí na zajištění ZBF1 plněním typových funkcí 1_TBF02 a 1_TBF03. V úrovních DiD 1, 2 je plnění těchto TBF zajišťováno změnou polohy regulačních orgánů a regulací koncentrace kyseliny borité v I.O. V havarijních stavech, tj. v DiD 3a, 3b, se na jejich plnění podílí zejména havarijní systémy chlazení zóny (NTTQ, VTTQ) dodávkou roztoku kyseliny borité do I.O. V úrovních DiD 4, 5 jsou typové funkce 1_TBF02 a 1_TBF03 zajišťovány pouze stálou dodávkou chladiva s roztokem kyseliny borité do I.O. pomocí ALT prostředků a projektem palivové vsázky, resp. projektem danou podkritičností taveniny.

Na dodávkách chladiva s roztokem kyseliny borité do TNR se ze souboru opatření pro zmírňování následků TH podílí pouze ALT prostředek TB 60. Nicméně vlastní

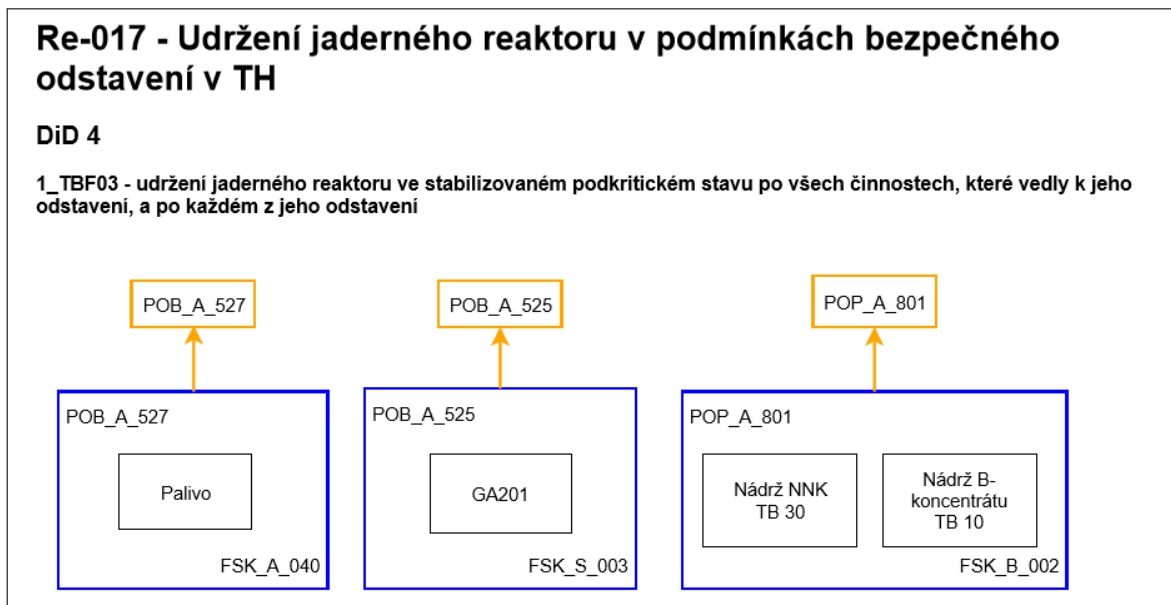
funkce v SUB řízení reaktivity plní nádrže se zásobou roztoku kyseliny borité (nádrže systému TB 10, 30 a havarijní jímka GA201), ze kterých čerpá ALT prostředek TB 60.

Seznam funkčních řetězců v SUB řízení reaktivity, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 10 na následující straně.

Tab. 10. Seznam funkčních řetězců v SUB řízení reaktivity.

Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
Re_017	Udržení jaderného reaktoru v podmínkách bezpečného odstavení v TH	Funkční řetězec popisuje systémy podílející se na udržení jaderného reaktoru v podmínkách bezpečného odstavení při TH.	1_TBF03	4
Re_018	Zabránění nepřijatelných přechodových procesů v TH	Funkční řetězec popisuje systémy podílející se na zabránění nepřijatelných přechodových procesů při TH.	1_TBF02	4, 5

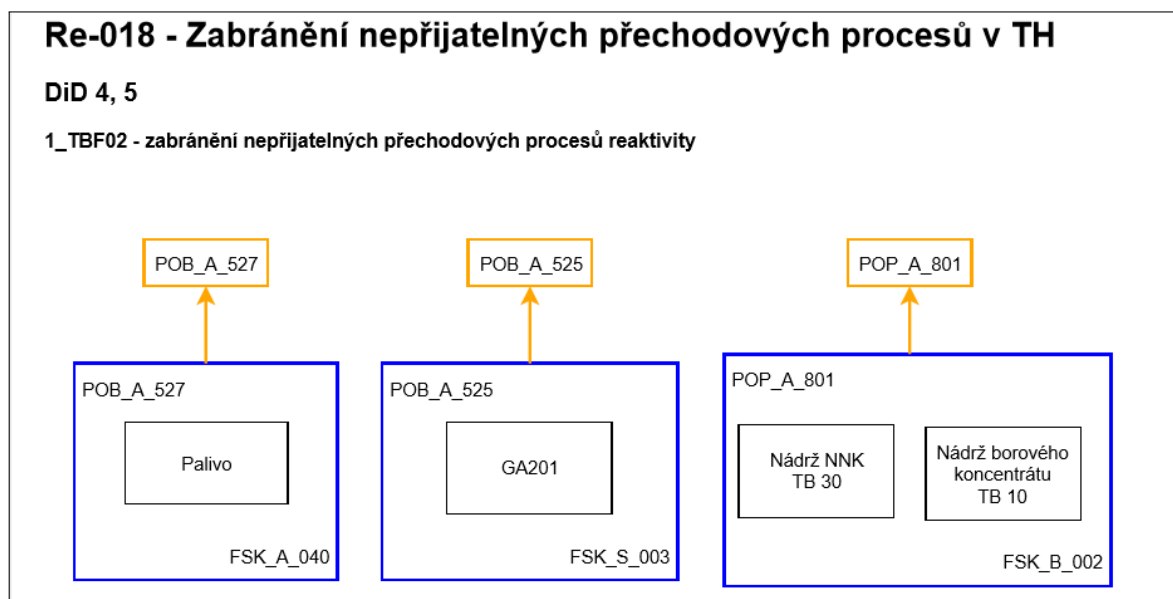
Pro udržení jaderného reaktoru v podmínkách bezpečného odstavení v TH je potřeba zajistit podkritičnost paliva, resp. v DiD 4 již taveniny. Na tom se podílí projektem daná podkritičnost taveniny (POB_A_527) a absorpce neutronů emitovaných ze štěpení na bóru doplňovaného do TNR ALT prostředkem TB 60 z dostupného objemu roztoku kyseliny borité v nádržích borového koncentráту TB 10, 30 (POP_A_801) a z havarijní jímky GA201 (POB_A_525). Tyto funkční závislosti jsou uvedeny na funkčním řetězci Re-017 na Obr. 11.



Obr. 11. Funkční řetězec Re-017 – Udržení jaderného reaktoru v podmínkách bezpečného odstavení v TH.

Ty samé SxF/POx jako na předchozím funkčním řetězci (Re-017) zajišťují i typovou funkci zabránění nepřijatelným přechodovým procesům při TH (1_TBF02). Funkční

závislosti pro plnění této typové funkce jsou uvedeny na funkčním řetězci Re-018 zobrazeném na Obr. 12 na následující straně.



Obr. 12. Funkční řetězec Re-018 – Zabránění nepřijatelným přechodovým procesům v TH.

6.3.2 Zajištění zásoby chladiva

SUB zajištění zásoby chladiva je výkonný SUB, protože se podílí na zajištění ZBF2 plněním typových funkcí/vlastností 2_TBF05, 2_TBF06, 0_TBF38 a TVF01. Na zajištění plnění těchto funkcí v nižších úrovních DiD (DiD 1, 2) se podílí především systém doplňování, odpouštění a regulace kyselinou boritou. V havarijních stavech (DiD 3a, 3b) pak funkci zajišťování zásoby chladiva plní havarijní systém chlazení zóny (NTTQ a VTTQ), který v případě jeho selhání nahrazuje DIV prostředek TB 50. V úrovni DiD 4 není předpokládána funkce systému havarijního chlazení zóny a DIV prostředek TB 50 je považován za překonaný (viz kap. 4.2), proto je funkce doplňování chladiva do TNR plněna ALT prostředkem TB 60.

ALT prostředek TB 60 je součástí souboru opatření pro zmírňování následků TH a jeho hlavní funkcí je dodávka chladiva do TNR pro zaručení úspěšné strategie IVR-In. Vlastní funkci zásoby chladiva v DiD 3b, 4 však plní zejména nádrže bórového kondenzátu TB 10, 30 a havarijní jímka GA201.

Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění zásoby chladiva, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 11.

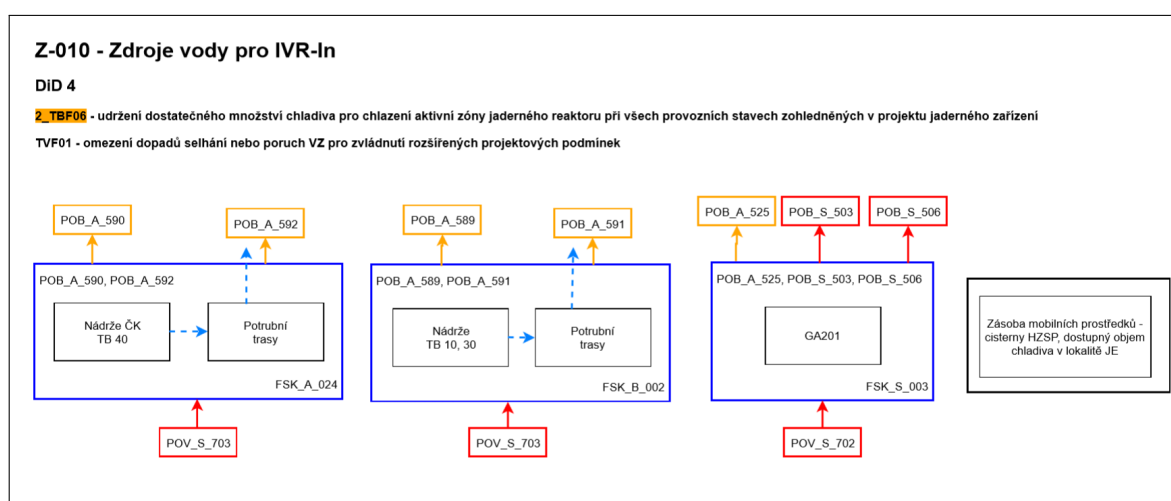
Tab. 11. Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění zásoby chladiva.

Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
Z-010	Zdroje vody pro IVR-In	Funkční řetězec popisuje zásoby chladiva, které je možné použít ALT prostředky pro zaplavení TNR pro úspěšnou realizaci strategie IVR-In.	2_TBF06, TVF01	4

Pokračování Tab. 11

Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
Z-017	Udržení zásoby chladiva ALT (mobilními) prostředky pro odtlakovaný I.O. v DEC B	Funkční řetězec popisuje způsoby dodávky vody pro odtlakovaný reaktor pomocí ALT prostředků (TB 60, mobilní prostředky).	2_TBF06, TVF01	4
Z-019	Udržení zásoby chladiva ALT (mobilními) prostředky pro natlakovaný I.O. v DEC B	Funkční řetězec popisuje způsoby dodávky vody pro natlakovaný reaktor pomocí ALT prostředků (TB 60, mobilní prostředky).	2_TBF06, TVF01	4

V případě, že dojde k selhání ZPP a DIV prostředků doplňování chladiva do I.O., přechází JE (resp. její strojně-jaderná část) do úrovně DiD 4. V této úrovni DiD zajišťuje plnění funkce zajišťování zásoby chladiva ALT prostředek TB 60. Zdrojem chladiva pro tento prostředek je dostupný objem nádrží bórového koncentrátu TB 10, 30 (POB_A_591), čistého kondenzátu (POB_A_592) nebo chladivo v havarijní jímce GA201 (POB_S_503). V případě potřeby je možné využít dodávky chladiva pomocí mobilních prostředků (např. cisterny HZSp, zásoba vody v areálu JE, apod.), které jsou schopny zajistit dodávku chladiva do TNR, havarijní jímky GA201 nebo BSVP napojením na výtlačné potrubí DIV prostředku TB 50. Funkční závislosti pro zajištění zásoby chladiva v úrovni DiD 4 jsou uvedeny na funkčním řetězci Z-010 na Obr. 13.



Obr. 13. Funkční řetězec Z-010 – Zdroje vody pro IVR-In.

Jak již bylo dříve řečeno, dodávka chladiva do TNR z dříve zmíněných nádrží systému TB a havarijní jímky GA201 je v úrovni DiD 4 realizována pomocí ALT prostředku TB 60. Maximální tlak na výtlačku DGČ je 2,5 MPa, proto je ALT prostředek TB 60 schopen dodávky chladiva pouze do odtlakovaného I.O. Z toho důvodu je v případě vzniku TH nezvládnutým SBO nutné nejprve provést úspěšné odtlakování I.O., a poté teprve zahájit dodávku chladiva do TNR. Také proto byl funkční řetězec udržení zásoby chladiva v I.O. v DiD 4 rozdělen na dva funkční řetězce – pro případ vzniku TH v důsledku nezvládnuté LOCA a pro případ vzniku TH v důsledku nezvládnutým SBO.

6.3.3 Zajištění odvodu tepla z AZ/TNR

SUB zajištění odvodu tepla z AZ/TNR je výkonný SUB, protože se podílí na zajištění ZBF2 plnění typových funkcí/vlastností 2_TBF07, 2_TBF08, 0_TBF38 a TVF01 a velmi úzce souvisí se SUB zajištění zásoby chladiva. V normálním a abnormálním provozu, tj. v úrovni DiD 1, 2, je teplo z AZ odváděno nucenou nebo přirozenou cirkulací chladiva a odvodem tepla přes parogenerátor do sekundárního okruhu, případně v režimu dochlazování nucenou cirkulací přes systém NTTQ. V havarijních stavech, tj. v DiD 3a, 3b, se na odvodu tepla z AZ podílí zejména havarijní systém chlazení zóny (NTTQ, VTTQ) a v případě použití metody Feed & Bleed i systém ochrany I.O. od převýšení tlakem nebo DIV prostředek pro odtlakování I.O. V úrovni DiD 4 byla pro odvod tepla z AZ/TNR zvolena strategie IVR-In pro jejíž úspěšnou realizaci je klíčové odtlakování I.O. a doplňování chladiva do TNR ALT prostředkem TB 60.

DIV prostředek pro odtlakování I.O. a ALT prostředek TB 60 jsou součástí souboru opatření pro zmírňování následků TH. DIV prostředek pro odtlakování se podílí na odvodu tepla z AZ/TNR v DiD 3b, kde nahrazuje systém ochrany I.O. od převýšení tlakem při metodě Feed & Bleed. ALT prostředek TB 60 se podílí na odvodu tepla výhradně v úrovni DiD 4.

Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění odvodu tepla, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 12.

Tab. 12. Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění odvodu tepla z AZ/TNR.

Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
O-014	Feed & Bleed – Systém pro odtlakování IO	Funkční řetězec popisuje použití metody Feed & Bleed pomocí DIV prostředku pro odtlakování I.O.	2_TBF08, 2_TBF38	3b
O-037	Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnuté LOCA	Funkční řetězec popisuje odvod tepla z taveniny při NT sekvenci pomocí ALT prostředků (TB 60).	2_TBF07, TVF01	4
O-038	Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnutého SBO	Funkční řetězec popisuje odvod tepla z taveniny při VT sekvenci pomocí ALT prostředků (TB 60).	2_TBF07, TVF01	4

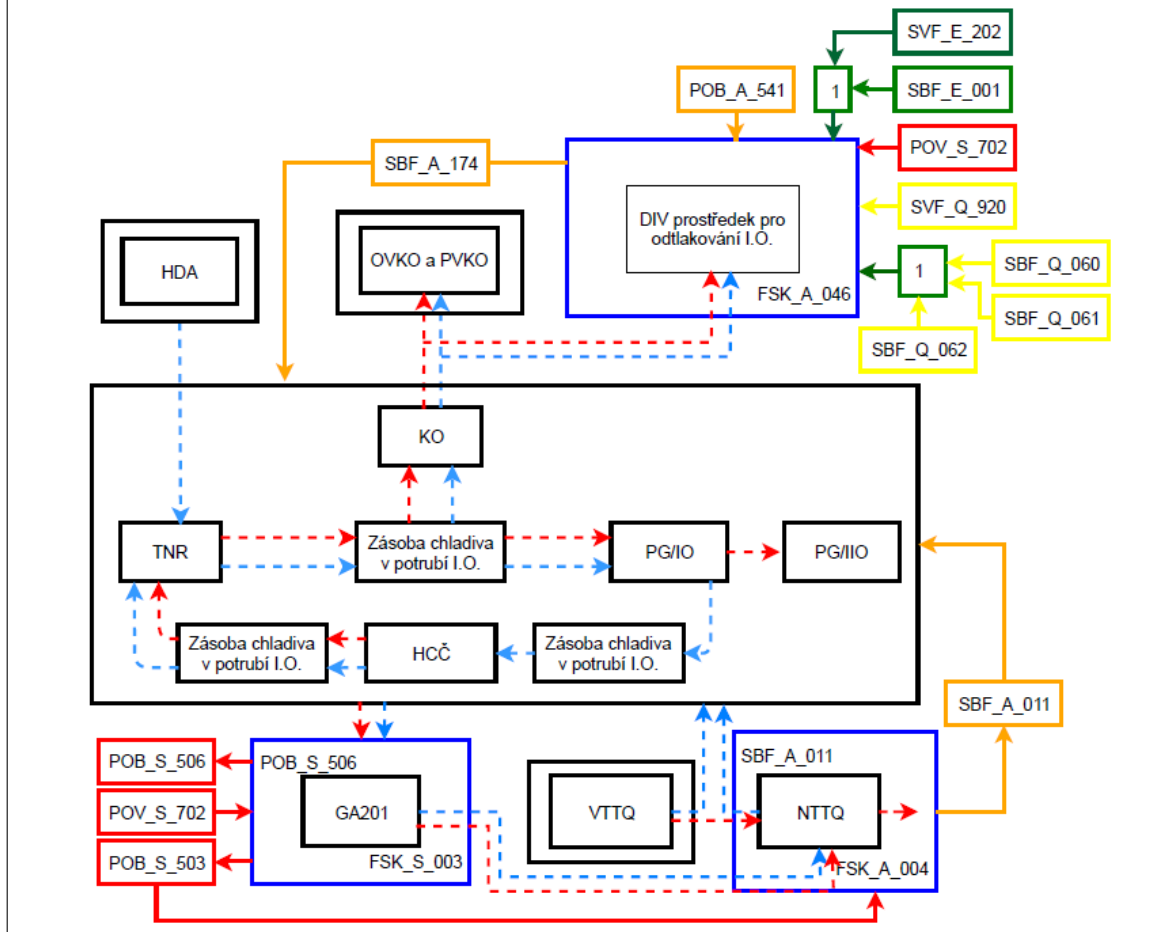
Metoda Feed & Bleed je jednou z metod používaných v havarijních stavech na JE k odvodu tepla z AZ a prevenci před významným tavením paliva. Jde o cílené odpouštění chladiva, resp. páry, z I.O. přes systém ochrany I.O. od převýšení tlakem do barbotážní nádrže (Bleed) za současného doplňování chladiva do I.O. havarijním systémem chlazení zóny (Feed). V případě nedostupnosti systému ochrany I.O. od převýšení tlakem přebírá jeho funkci DIV prostředek pro odtlakování I.O., jehož podpora metody Feed & Bleed je sekundárním plněním funkce SBF_A_174. Funkční závislosti pro odvod tepla z AZ metodou Feed & Bleed pomocí DIV prostředku pro odtlakování I.O. jsou uvedeny na funkčním řetězci O-014 na Obr. 16 na následující straně.

O-014 - Feed & Bleed - Systém pro odtlakování I.O.

DiD 3b

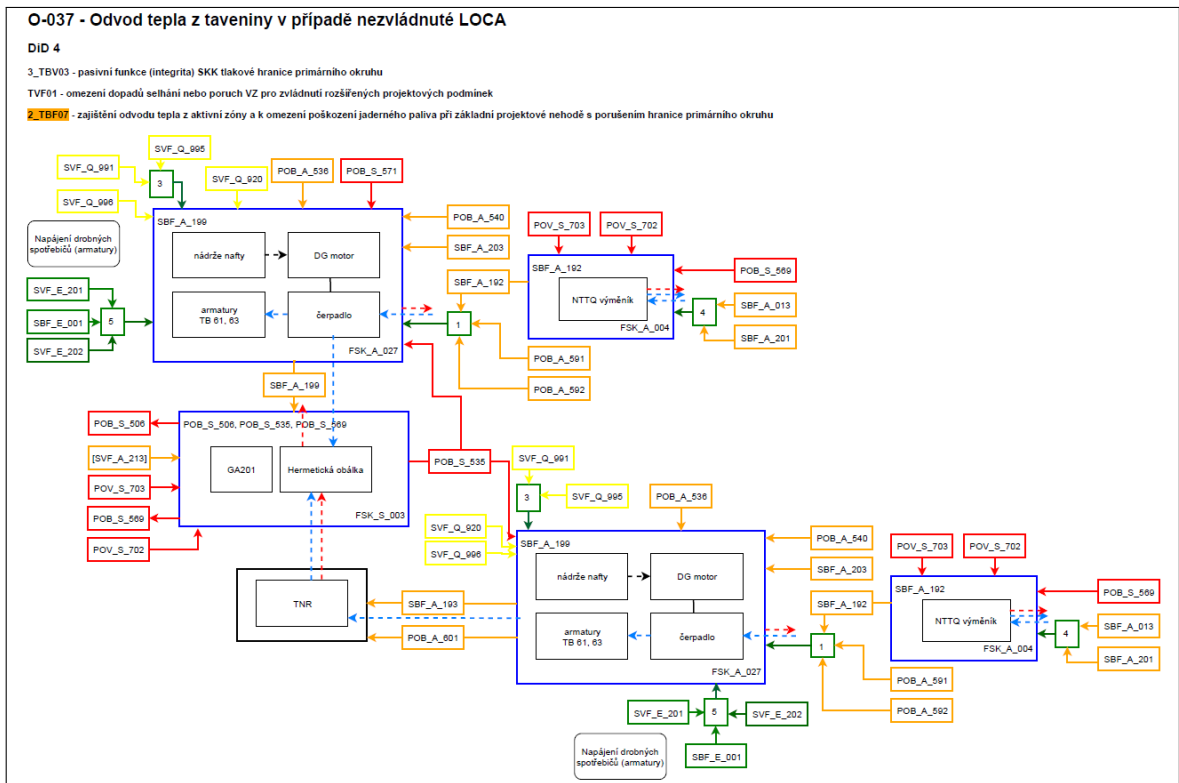
0_TBF38 - nahrazující bezpečnostní funkce vybraných zařízení zařazených do bezpečnostní třídy 2 nebo 3 diverzními prostředky při ztrátě jejich funkce v důsledku poruchy ze společné příčiny

2_TBF08 - nezbytný odvod zbytkového tepla z aktivní zóny v průběhu provozních stavů a při základní projektové nehodě, při které nedošlo k porušení integrity hranice primárního okruhu

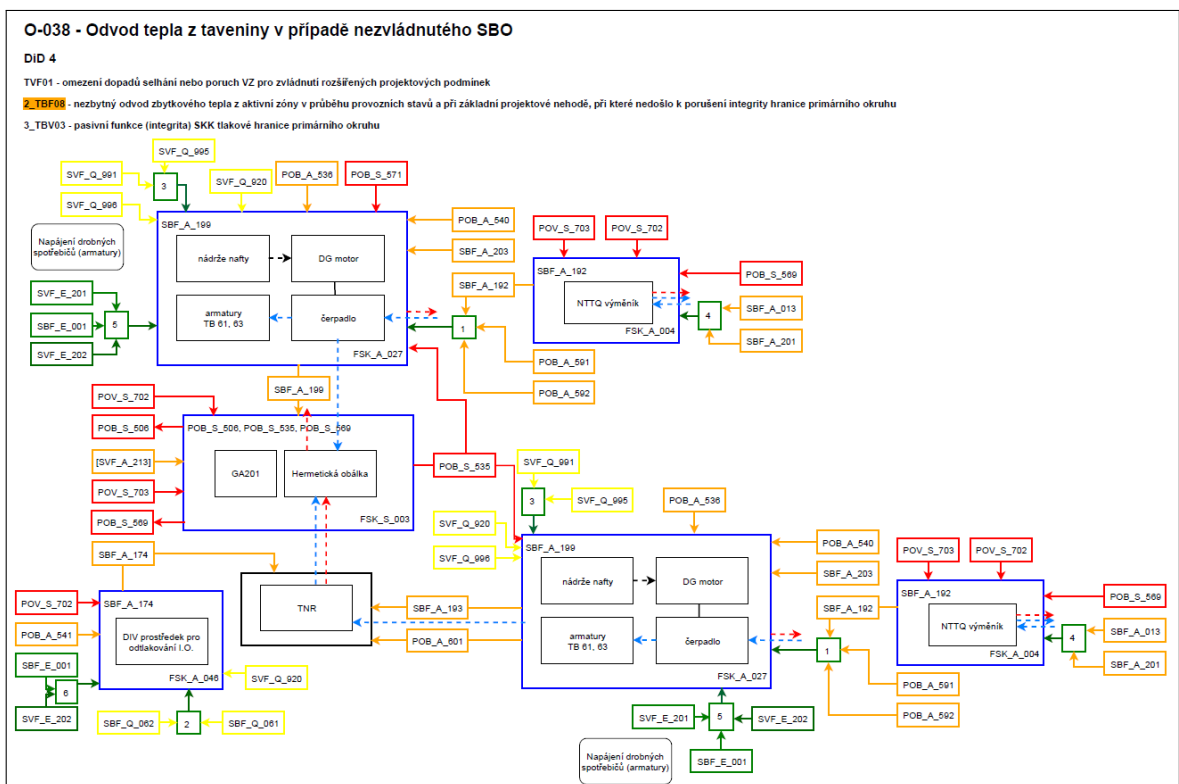


Obr. 16. Funkční řetězec O-014 – Feed & Bleed – Systém pro odtlakování I.O.

V úrovni DiD 4 je odvod tepla z AZ, resp. taveniny, zajišťován ALT prostředkem TB 60 dodávkou chladiva z nádrží bórového koncentráту TB 10, 30 (POB_A.591) a nádrží čistého kondenzátu TB 40 (POB_A.592) nebo havarijní jímky GA201 (POB.S.569). Chladivo v havarijní jímce GA201 musí být před vstupem na sání DGČ nejprve ochlazen v NTTQ výměníku pomocí TVD (SBF_A.193 nebo SBF_A.201). A jak již bylo dříve zmíněno, maximální tlak na výtlaku DGČ je 2,5 MPa, tedy pro správnou funkci ALT prostředku TB 60 je nutné nejprve provést úspěšné odtlakování I.O. Také proto byl funkční řetězec odvodu tepla z AZ/TNR v DiD 4 rozdělen na dva funkční řetězce – pro případ vzniku TH nezvládnutou LOCA a pro případ vzniku TH nezvládnutým SBO. Funkční závislosti pro zajištění odvodu tepla z AZ/TNR v případě nezvládnuté LOCA jsou uvedeny na funkčním řetězci O-037 na Obr. 17 na následující straně. A funkční závislosti pro zajištění odvodu tepla z AZ/TNR v případě nezvládnutého SBO jsou uvedeny na funkčním řetězci O-038 na Obr. 18 na následující straně.



Obr. 17. Funkční řetězec O-037 – Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnuté LOCA.



Obr. 18. Funkční řetězec O-038 – Odvod tepla z taveniny v případě nezvládnutého SBO.

6.3.4 Omezení úniků radioaktivních látek

SUB zajištění zásoby chladiva je výkonný SUB, protože se podílí na zajištění plnění ZBF3 plněním typových funkcí 3_TBF12, 3_TBF13 a 3_TBF29. V normálním a abnormálním stavu, tj. v úrovních DiD 1, 2, zajišťují funkci omezení úniků zejména systémy čištění výpustí a odpadů a systémy podléjící se na zajišťování integrity HO. Ve vyšších úrovních DiD, tj. v úrovních DiD 3a, 3b, je tato funkce zabezpečena zejména zajištěním integrity HO pomocí snižování tlaku uvnitř HO (čímž je předcházeno porušení integrity HO tlakovým namáháním) pomocí sprchového systému HO. V úrovni DiD 4 je funkce omezení úniků RA látek do okolí JE zajištěna integritou HO, likvidací vodíku uvolněného do atmosféry HO (prevence porušení integrity HO hořením vodíku) a odvodem vzdušiny z HO přes filtroventilační zařízení do atmosféry.

PAR určené pro likvidaci vodíku produkovaného při TH a ALT prostředek FCVS jsou součástí souboru opatření pro zmírňování následků TH. Funkce obou prostředků je předpokládána až v úrovni DiD 4.

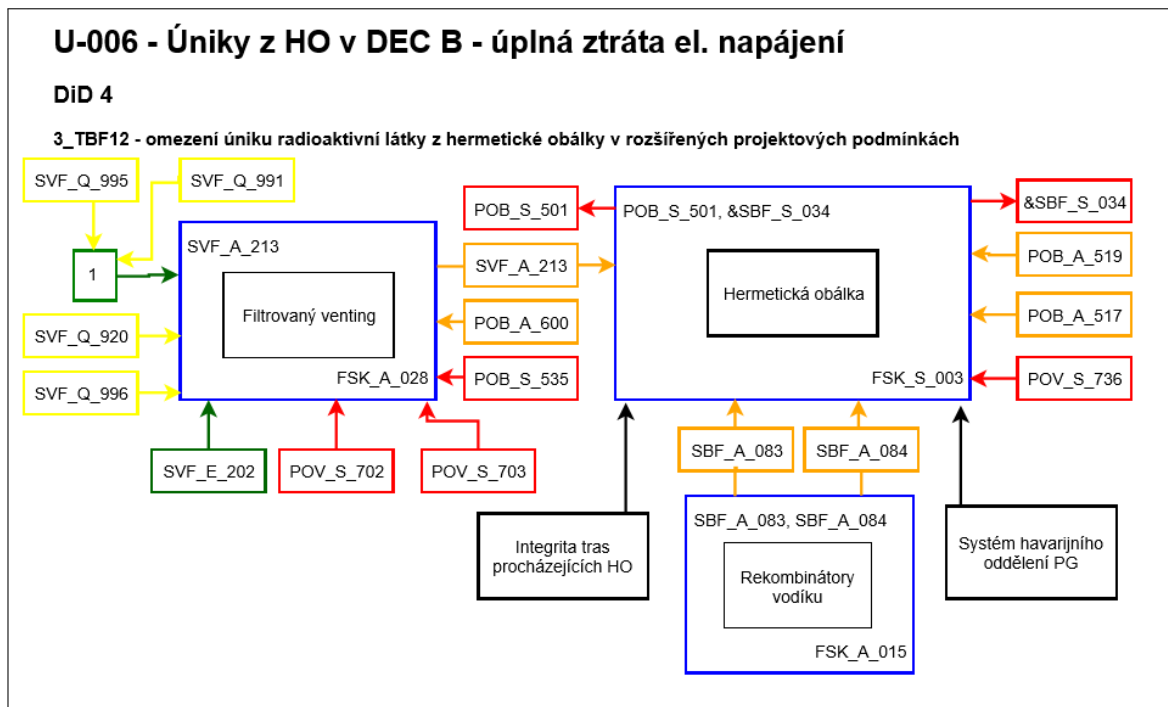
Seznam funkčních řetězců v SUB omezení úniků RA látek, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 13.

Tab. 13. Seznam funkčních řetězců v SUB omezení úniků RA látek.

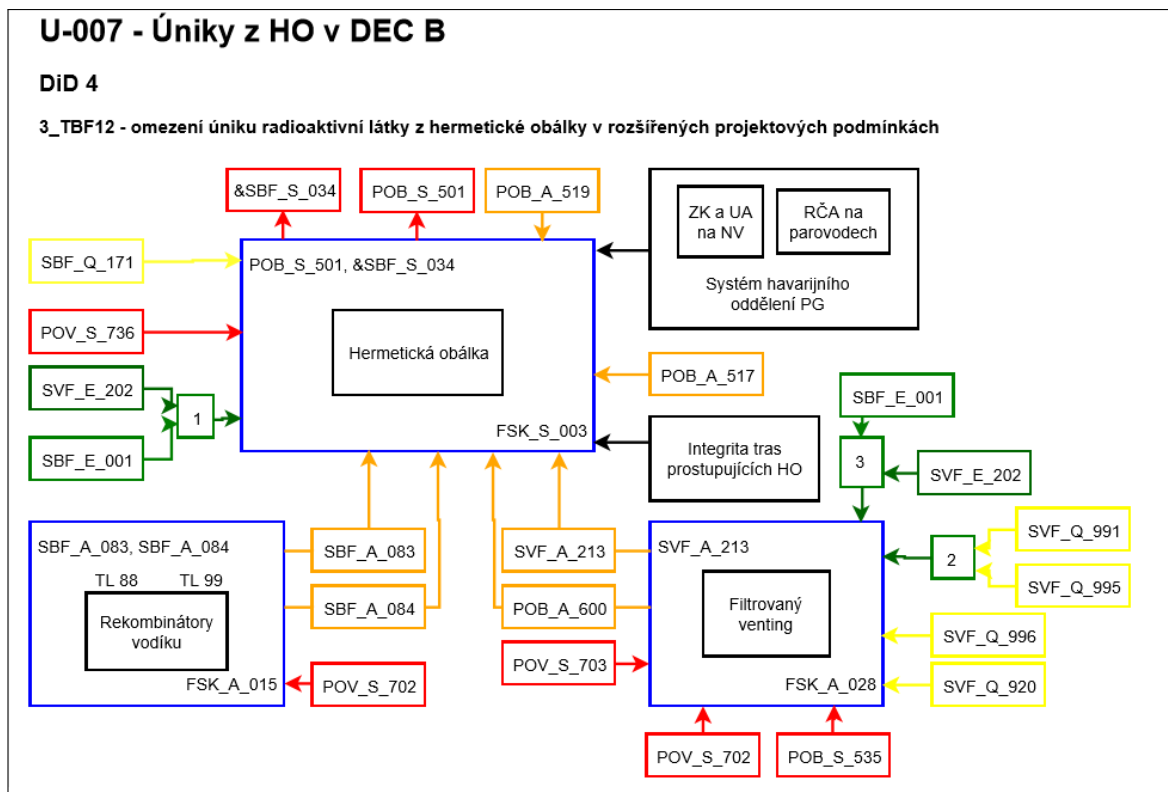
Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
U-006	Úniky z HO v DEC B – úplná ztráta el. napájení	Funkční řetězec popisuje způsoby omezení úniků RA látek z HO, při úplné ztrátě elektrického napájení.	3_TBF12	4
U-007	Úniky z HO v DEC B	Funkční řetězec popisuje způsoby omezení úniků RA látek z HO v podmínkách DEC B (TH).	3_TBF12	4
U-008	Úniky z HO v DiD 5	Funkční řetězec popisuje způsoby omezení úniků RA látek z HO v úrovni DiD 5. Nejsou požadavky na úplnou těsnost HO, ale nenastává úplná ztráta integrity HO.	3_TBF12	5
U-032	Filtrovaný venting	Funkční řetězec popisuje odvod vzdušiny z HO ALT prostředkem FCVS.	3_TBF12	4

Ze souboru opatření pro zmírňování následků TH se v úrovni DiD 4 podílí na plnění funkce omezení úniků RA látek do okolí JE zejména ALT prostředek FCVS a systém likvidace vodíku. ALT prostředek FCVS zajišťuje omezení úniku RA látek odvodem vzdušiny z HO přes filtroventilační zařízení (SVF_A.213) a integritou tras (POB_A.600) A PAR se podílí na zajištění integrity plněním funkce likvidace vodíku v atmosféře HO. Vzhledem k tomu, že nelze rozlišit, zda funkci likvidace vodíku plní PAR určené pro DBA nebo DEC, uvažuje se v DEC B funkce obou skupin (SBF_A.083 a SBF_A.084). Funkční závislosti pro omezení úniků z HO v DEC B při úplné ztrátě elektrického

napájení jsou uvedeny na funkčním řetězci U-006 na Obr. 19 a funkční závislosti pro omezení úniků z HO v DEC B jsou uvedeny na funkčním řetězci U-007 na Obr. 20.

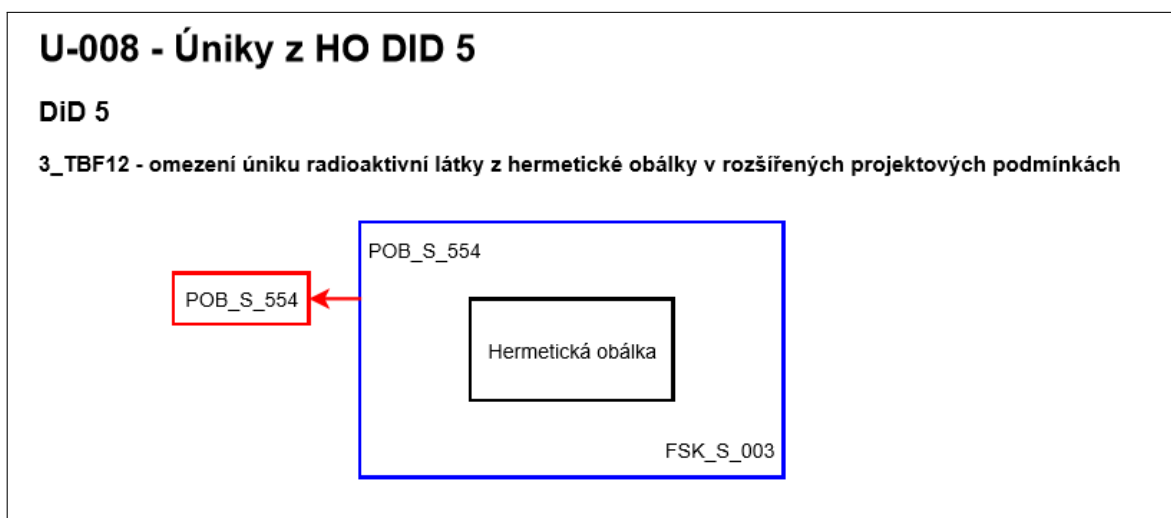


Obr. 19. Funkční řetězec U-006 – Únik z HO v DEC B – úplná ztráta el. napájení.



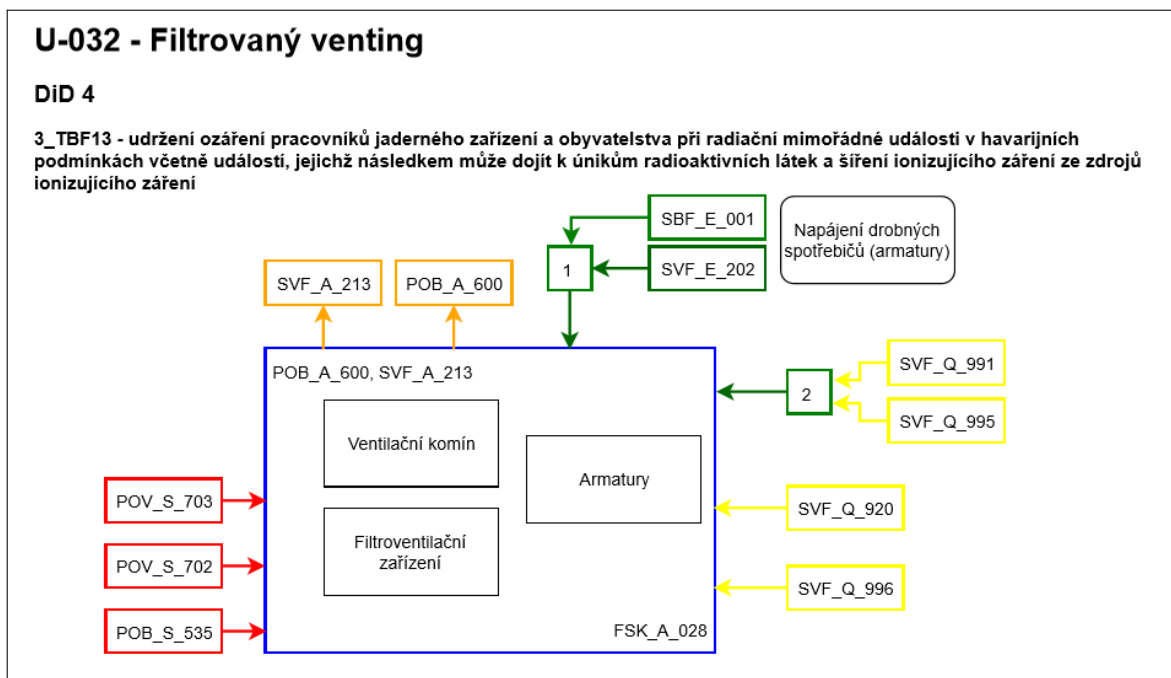
Obr. 20. Funkční řetězec U-007 – Úniky z HO v DEC B.

Jak již bylo řečeno v kap. 2, do úrovně DiD 5 nemůže přejít žádný systém a ačkoliv již v úrovni DiD 5 není zajištěna integrita HO, je požadována alespoň její odolnost vůči cliff-edge efektu (POB_S_554). Funkční závislosti pro omezení úniků z HO v DiD 5 jsou uvedeny na funkčním řetězci U-008 na Obr. 21.



Obr. 21. Funkční řetězec U-008 – Úniky z HO v DiD 5.

V případě, že selže ZPP a DIV prostředek pro snižování tlaku v HO, přebírá jejich funkci ALT prostředek FCVS. Na funkčním řetězci U-032 na Obr. 22 jsou uvedeny všechny podpůrné funkce potřebné pro zajištění správné funkce ALT prostředku FCVS.



Obr. 22. Funkční řetězec U-032 – Filtrovaný venting.

6.3.5 Zajištění integrity fyzických bariér

SUB zajištění zásoby chladiva je poslední výkonný SUB uvažovaný v této diplomové práci. O výkonný SUB jde proto, že se podílí na zajištění plnění ZBF3 plněním typových funkcí 3_TBV02, 3_TBV03 a 3_TBV04. Nicméně v DiD 4, 5 se předpokládá plnění pouze integrity HO, tj. typové funkce 3_TBV04, a integrity TNR, tj. typové funkce 3_TBV03. SUB zajištění integrity fyzických bariér velmi úzce souvisí s výkonným SUB omezení úniků RA látek do okolí JE.

V nižších úrovních DiD 1, 2 je požadováno zajištění integrity všech fyzických bariér, kdy je integrita poslední fyzické bariéry zaručena integritou stavby a všech tras procházejících skrze HO. Ve vyšších úrovních DiD, tj. v úrovních DiD 3a, 3b, je integrita HO zaručena snižováním tlaku v HO sprchovým systémem a integritou tras procházejících stěnou HO. V případě selhání sprchového systému jeho funkci přebírá DIV systém snižování tlaku HO, případně ALT prostředek FCVS a integrita potrubních tras procházejících stěnou HO a JE přechází do úrovně DiD 4. V této úrovni je požadováno zachování už jen poslední fyzické bariéry – integrity HO.

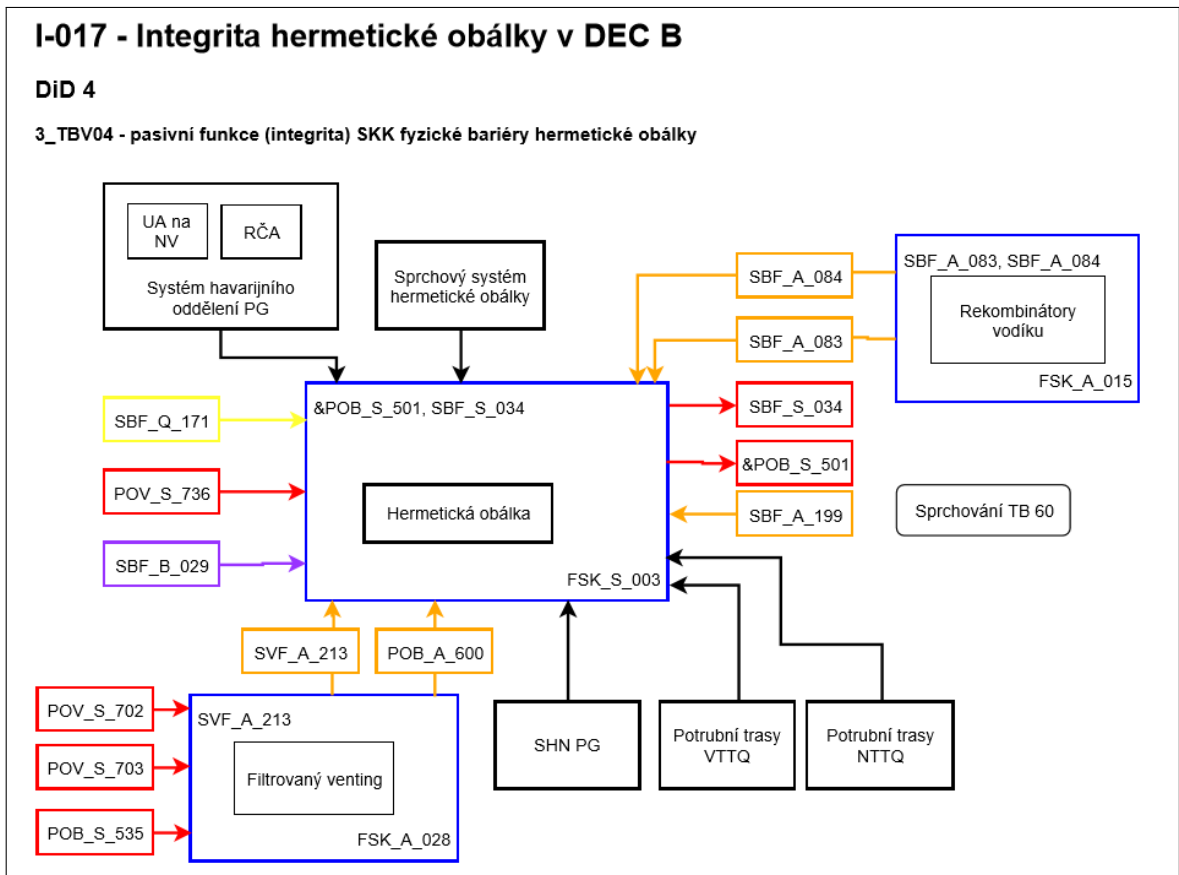
DIV a ALT prostředek snižování tlaku v HO jsou součástí souboru opatření pro zmírňování následků TH, proto jsou v této diplomové práci řešeny pouze funkční řetězce, na jejichž plnění se podílejí tyto zmíněné prostředky.

Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění integrity fyzických bariér, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 14.

Tab. 14. Seznam funkčních řetězců v SUB zajištění integrity fyzických bariér.

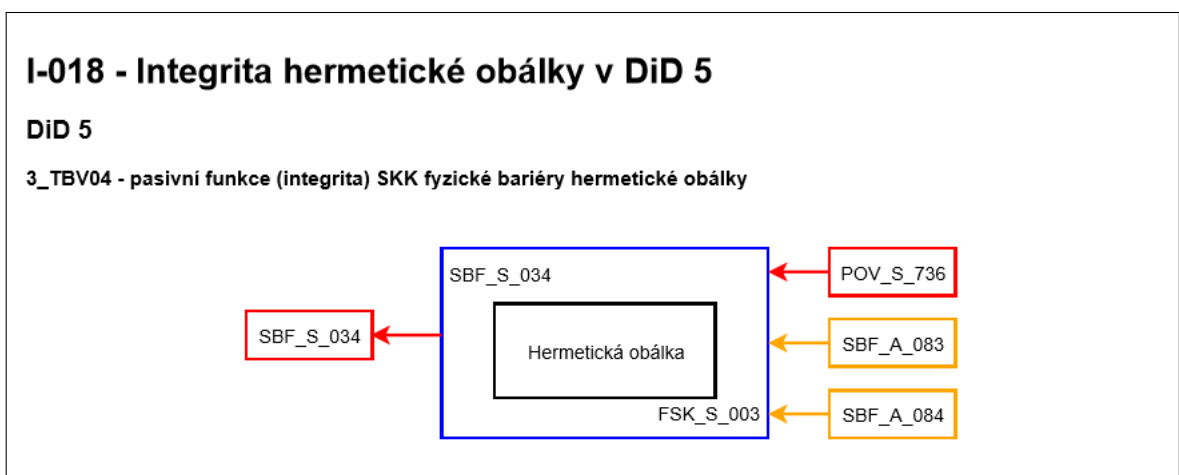
Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
I-017	Integrita hermetické obálky v DEC B	Funkční řetězec popisuje zajištění integrity HO jako poslední bariéry proti šíření RA látek ve stavech DEC B.	3_TBV04	4
I-018	Integrita hermetické obálky v DiD 5	Funkční řetězec popisuje zajištění integrity HO jako poslední bariéry proti šíření RA látek v DiD 5 – zamezení poškození HO vedoucích k celkové ztrátě integrity mající za následek velké nebo časné úniky RA látek do okolí.	3_TBV04	5

V úrovni DiD 4 je integrita HO zajištěna integritou potrubních tras procházejících stěnou HO, statickou podporou HO od Reaktorovny (POV_S.736), DIV prostředkem pro snižování tlaku v HO (sekundární plnění funkce SBF_A.199), likvidací vodíku v atmosféře HO (SBF_A.083 a SBF_A.084) a ALT prostředkem FCVS. Vzhledem k tomu, že potrubní trasy odvodu vzdušiny z HO vedou skrze stěnu HO, podílí se tento prostředek na plnění typové funkce 3_TBV04 zajištěním integrity potrubních tras (POB_S.600) a vlastní funkcí odvodu vzdušiny z HO (SBF_A.213). Funkční závislosti pro zajištění integrity HO v DEC B jsou uvedeny na funkčním řetězci I-017 na Obr. 23 na následující straně.



Obr. 23. Funkční řetězec I-017 – Integrita hermetické obálky v DEC B

V úrovni DiD 5 již došlo k porušení integrity HO a v tomto případě je hlavním cílem udržet stabilitu stavebních konstrukcí hermetické obálky, aby mohly systémy podléající se na zajišťování ZBF1 a ZBF2 plnit svou funkci. Funkční závislosti pro zajištění integrity HO v DiD 5 jsou uvedeny na funkčním řetězci I-018 na Obr. 24.



Obr. 24. Funkční řetězec I-018 – Integrita hermetického obálky v DiD 5

6.3.6 Podpůrné systémy

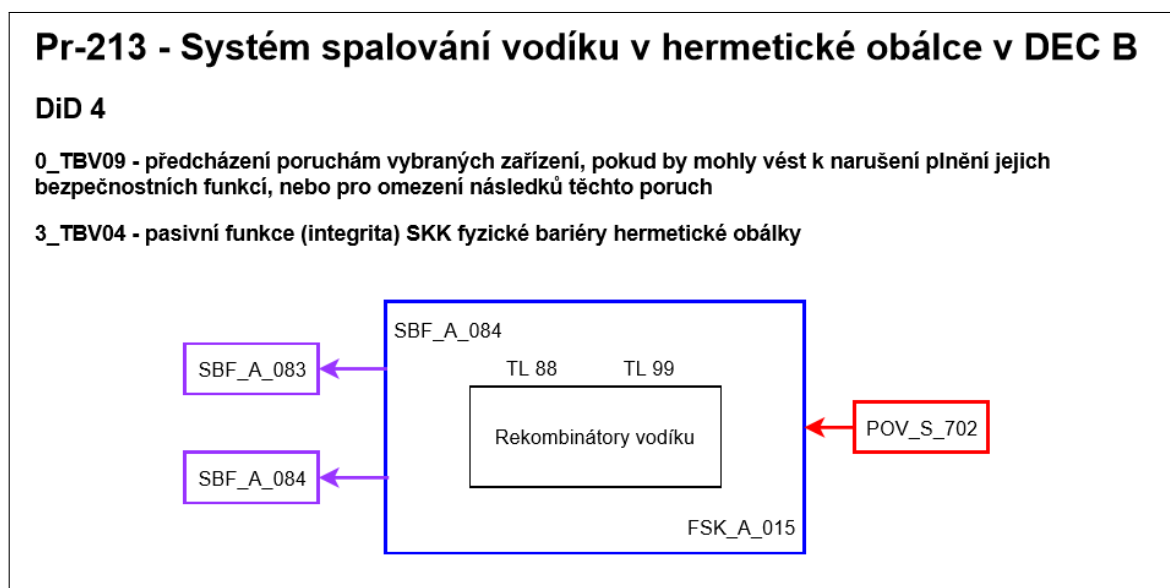
Posledním SUB řešeným v této diplomové práci je SUB podpůrných systémů. Jde o podpůrný SUB vytvořený pouze pro potřeby této diplomové práce a zahrnuje všechny systémy plnící podpůrné funkce pro zajištění správné funkce souboru opatření pro zmírňování následků TH na ETE. Mezi podpůrné systémy patří i systém likvidace vodíku v HO a DIV prostředek VF 90, které jsou součástí souboru opatření pro zmírňování následků TH a podílí se na plnění typových funkcí 0_TBVO9, 0_TBF20, 0_TBF38, 2_TBF09 a 3_TBV04.

Seznam funkčních řetězců v SUB podpůrných systémů, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 15.

Tab. 15. Seznam vybraných funkčních řetězců v SUB podpůrných systémů.

Označení	Název	Popis	Plněné TxF/TBV	DiD
Pr-213	Systém spalování vodíku v hermetické obálce – DEC B	Zajišťuje pasivní autokatalytické spalování vodíku v atmosféře HO v důsledku TH.	0_TBVO9, 3_TBV04	3b
O-055	Odvod tepla z NTTQ výměníku TVD v DEC B	Funkční řetězec popisuje možné způsoby odvodu tepla z média přivedeného z havarijní jímky GA201 přes NTTQ výměníky v DiD 4.	0_TBF20, 2_TBF09, 0_TBF38	4

Vzhledem k tomu, že je nemožné rozlišit, zda v DiD 4 je funkce likvidace vodíku v atmosféře HO plněna systémem likvidace vodíku v DBA (TL 99) nebo systémem likvidace vodíku v DEC (TL 88), je v DiD 4 uvažována funkce obou systémů. Funkční závislosti pro likvidaci vodíku v atmosféře HO v DEC B jsou uvedeny na funkčním řetězci Pr-213 na Obr. 25.



Obr. 25. Funkční řetězec Pr-213 – Systém spalování vodíku v hermetické obálce v DEC B.

Linie DiD jsou množiny funkčních řetězců, které se podílejí na plnění společných typových funkcí. Z důvodu hodnocení nezávislosti a robustnosti jsou linie DiD rozděleny na linie výkonné a podpůrné v závislosti na tom, na kterém SUB se podílejí. Všechny zmíněné charakteristiky se odrážejí i v označení linií DiD, které obsahuje mimo jiné i označení příslušného SUB a jeho typ. Označení linií DiD se řídí podle následující syntaxe:

LXXX_Y_Z, kde

XXX .. je pořadové číslo funkčního řetězce v daném SUB,

Y je vyjádření SUB (Re = reaktivita, Z = zásoba chladiva, O = odvod tepla, U = úniky aktivity z HO, I = integrita fyzických bariér, E = elektro, F = funkční, B = TVD, Pr = zajištění prostředí a Q = SKŘ a

Z je označení výkonné (V) nebo podpůrné (P) linie DiD.

Na rozdíl od úrovní DiD, které jsou určovány stavem JE, vyjadřují linie DiD vlastnosti a technická řešení SKK, která zajišťují nebo přispívají k robustnosti a míře nezávislosti úrovní DiD. Projekt JE ke každé úrovni DiD a pro každou SUB přiřazuje minimálně jednu konkrétní linii DiD v případech, kde je požadováno plnění TxF/TBV. Volba a použití konkrétní linie DiD pak závisí zejména na režimech práce SKK dané profese, na funkci přímo podporující ochranu fyzických bariér a na specifikaci PIU, resp. hrozby, a jejich mechanismů působení (lokální, globální) a intenzitě jejich účinku.

Seznam linií, na jejichž zajištění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH, je uvedený v Tab. 16.

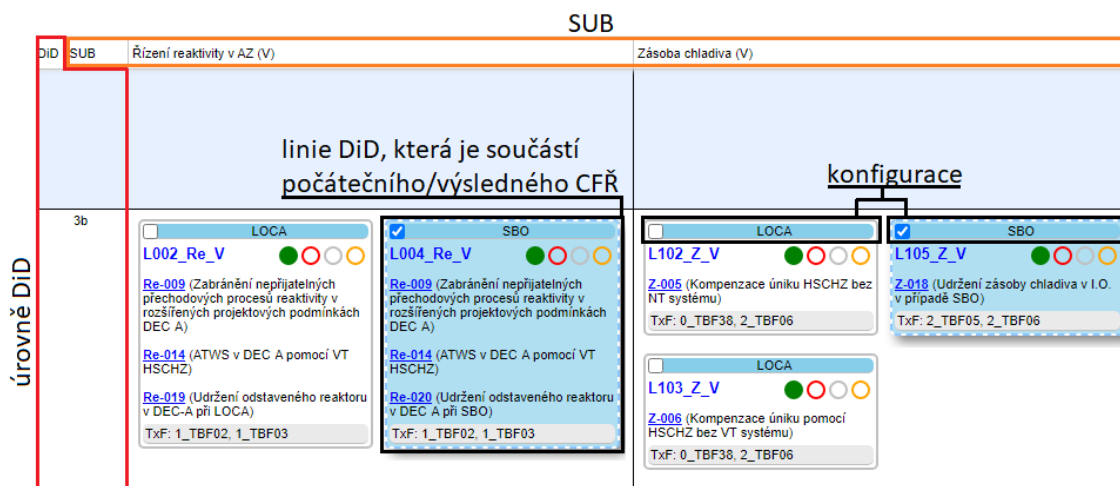
Tab. 16. Seznam linií DiD, na jejichž zajištění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH.

DiD	SUB	Linie DiD	Funkční řetězce
4	Odvod tepla z AZ	L207_O_V	O-037
4	Řízení reaktivity v AZ	L005_Re_V	Re-017, Re-018
5	Řízení reaktivity v AZ	L006_Re_V	Re-018
4	Zásoba chladiva	L106_Z_V	Z-010, Z-017
4	Zásoba chladiva	L107_Z_V	Z-010, Z-019
3b	Odvod tepla z AZ	L206_O_V	O-014
4	Odvod tepla z AZ	L208_O_V	O-038
4	Omezení úniků Ra látek	L304_U_V	U-007, U-030. U-032
4	Omezení úniků Ra látek	L305_U_V	U-006, U-030. U-032
5	Omezení úniků Ra látek	L306_U_V	U-008, U-030
4	Fyzikální bariéry JZ s reaktorem	L407_I_V	I-017
5	Fyzikální bariéry JZ s reaktorem	L408_I_V	I-018
4	Podpůrné systémy	L703_B_P	O-055
4	Podpůrné systémy	L803_Pr_P	Pr-032, Pr-213, Pr-325

Po sestavení všech linií DiD jsou tyto linie zaneseny do mapy funkcí. Mapa funkcí je grafické zpracování závislostí mezi úrovněmi DiD a v nich zobrazených liniích DiD ve dvou možných přehledech – mapa funkcí seskupená dle SUB a mapa funkcí seskupená dle TxF/TBV. Mapa funkcí seskupená podle SUB slouží k tvorbě celkových funkčních řetězců (CFŘ) pro potřeby hodnocení robustnosti a úplnosti souboru projektových východisek a požadavků. Mapa funkcí seskupená dle TxF/TBV je ve výsledku pouze jiným zobrazením informací uvedených v mapě funkcí seskupené dle SUB. Proto se

dále v této diplomové práci termín mapa funkcí odkazuje na mapu funkcí seskupenou dle SUB.

Jednotlivé linie DiD mohou být do mapy funkcí zanášeny v různých konfiguracích. Pro potřeby této diplomové práce byly použity dvě konfigurace – LOCA (TH vzniklá v důsledku nezvládnuté LOCA) a SBO (TH vzniklá v důsledku nezvládnutého SBO). Tyto konfigurace dělí jednotlivé buňky mapy funkcí vertikálně a pokud je v dané úrovni DiD projektem aplikováno více linií DiD, je příslušná buňka mapy funkcí dělena horizontálně. Pro lepší přehlednost je vertikální a horizontální dělení buněk mapy funkcí zobrazeno na Obr. 27.



Obr. 27. Výřez mapy funkcí s vertikálním a horizontálním dělením buněk mapy funkcí.

6.5 Definice hrozeb

Posledním krokem při tvorbě datového modelu FA DiD, důležitým pro hodnocení robustnosti, souboru opatření pro zmírňování následků TH je definování dvou hrozeb a odolností jednotlivých FaSK a SxF/POx vůči nim. Vzhledem k tomu, že se tato diplomová práce zabývá FA DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH na ETE, budou v rámci hodnocení robustnosti uvažovány dvě hrozby kopírující postulované scénáře pro vznik TH na ETE (viz kap. 4). Tyto hrozby jsou:

- TH v důsledku nezvládnuté LOCA havárie (nízkotlaká sekvence) a
- TH v důsledku nezvládnutého SBO (vysokotlaká sekvence).

Obě vybrané hrozby působí na SxF/POx prostřednictvím mechanismů, které pro případ TH tvoří okrajové podmínky TOkr_009 pro nízkotlakou sekvenci a TOkr_013 pro vysokotlakou sekvenci.

Odolnost souboru opatření pro zmírňování následků TH vůči těmto mechanismům není řešena prostřednictvím Provisions, nýbrž inženýrským hodnocením, zda daná hrozba konkrétní FaSK nebo SxF/POx vyřadí nebo ne. Tyto odolnosti jsou zanášeny do softwarového nástroje HIDRA v záložce „Inženýrské hodnocení – Odolnosti FaSK a SxF/POx“ a jejich seznam je uvedený v Tab. 17 na následující straně.

Správná funkce souboru opatření pro zmírňování následků TH pak musí zajistit, že v případě vzniku TH nedojde k porušení poslední fyzické bariéry a dojde k přechodu bloku do stabilizovaného a následně bezpečného stavu v úrovni DiD 4.

Tab. 17. Odolnost FaSK a jejich SxF/POx na mechanismy hodnocených hrozeb.

SxF	Popis SxF	TOkr_009 – NT sekvence	TOkr_013 – VT sekvence
		Aplikovat Ano/Ne	Aplikovat Ano/Ne
FSK_A_001 – Primární okruh			
POB_A_501	Integrita I.O.	Ano	Ne
POB_A_503	Zásoba chladiva v I.O.	Ano	Ne
POB_A_536	Napojení systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti na I.O.	Ne	Ne
FSK_A_003 – Vysokotlaký systém havarijního chlazení			
POB_A_517	Integrita vysokotlakých potrubních tras mimo HO	Ne	Ne
FSK_A_004 – Nízkotlaký systém havarijního chlazení			
POB_A_519	Integrita nízkotlakých potrubních tras mimo HO	Ne	Ne
POB_A_599	Využití tras systému TQ pro doplňování vody do GA201 a I.O. mobilními prostředky	Ne	Ne
SBF_A_192	Chlazení média z GA201 pomocí výměníků HSCHZ	Ne	Ne
FSK_A_005 – Pasivní systém havarijního chlazení AZ			
POB_A_540	Napojení NTTQ na AZ	Ne	Ne
FSK_A_009 – Systém ochrany prim. okruhu od převýšení tlaku			
POB_A_541	Poskytnutí tras systémem ochrany I.O. od převýšení tlakem pro systém odtlakování I.O.	Ne	Ne
FSK_A_013 – Systém technické vody důležité vč. technologie CHNR			
SBF_A_013	Odvod tepla z bezpečnostních systémů pomocí TVD	Ne	Ne
FSK_A_015 – Systém spalování vodíku v hermetické obálce			
SBF_A_083	Spalování vodíku v HO při hav. situacích (DBA, DEC A a DEC B)	Ne	Ne
SBF_A_084	Spalování vodíku v HO při těžké havárii (DEC B)	Ne	Ne
FSK_A_024 – Systém doplňování čistého kondenzátu			
POB_A_590	Integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 40 do TB 50	Ne	Ne
POB_A_592	Zásoba chladiva pro TB 50, 60	Ne	Ne
FSK_A_027 – Zaplavení AZ v TNR a dlouhodobý odvod tepla z KTMT			
POB_A_601	Udržení integrity tras systému ALT prostředků pro doplňování chladiva do TNR	Ne	Ne
SBF_A_193	Doplňování média do AZ systémem TB 60 přes bezpečnostní systémy	Ne	Ne
SBF_A_199	Sprchování boxů HCČ pro dlouhodobý odvod tepla z HO	Ne	Ne

Pokračování Tab. 17

		TOkr_009 – NT sekvence	TOkr_013 – VT sekvence
SxF	Popis SxF	Aplikovat Ano/Ne	Aplikovat Ano/Ne
SBF_A.201	Diverzní odvod tepla z výměníků HSCHZ pomocí systému VF 90 (MČS)	Ne	Ne
FSK_A_028 – Filtrovaný venting			
POB_A.600	Integrita tras FCVS mimo HO	Ne	Ne
SVF_A.213	Filtrovaný venting	Ne	Ne
FSK_A_040 – Palivový systém			
POB_A.526	Integrita pokrytí jaderného paliva	Ano	Ano
POB_A.527	Tavenina palivového systému zajišťuje zabránění dosažení opětovné kritičnosti	Ne	Ne
POB_A.552	Udržení reaktoru v odstaveném stavu pomocí klastrů v dolní koncové poloze	Ne	Ne
POB_A.579	Umožnění funkce mechanického systému odstavení reaktoru	Ne	Ne
POB_A.588	Záporná zpětná vazba paliva	Ne	Ne
SBF_A.005	Mechanické odstavení reaktoru	Ne	Ne
FSK_A_046 – Diverzní prostředky pro odtlakování I.O.			
POB_A.512	Udržení integrity trasy diverzních prostředků pro odtlakování I.O. při TH spadající do tlakového okruhu reaktoru	Ne	Ne
SBF_A.174	Odtlakování I.O. při DEC A a TH (DEC B)	Ne	Ne
FSK_B_002 – Systém nádrží a reagentů			
POB_A.589	Integrita potrubních tras na sání z nádrží TB 10, 30 do TB 50	Ne	Ne
POB_A.591	Zásoba chladiva pro TB 50, 60	Ne	Ne
POP_A.801	Zásoba roztoku H3B03 v nádržích TB pro těžké havárie	Ne	Ne
FSK_B_008 – Nouzové prostředky pro SBO			
SBF_A.194	Doplňování media do TNR systémem TB 50	Ano	Ano
SBF_A.196	Doplňování media do GA201 systémem TB 50	Ne	Ne
SVF_Q.920	Nouzové havarijní monitorování mobilními prostředky	Ne	Ne
FSK_B_055 – Systém TL 10 chlazení prostorů havarijních systémů			
SBF_B.053	Odvod tepelných ztrát od technologického zařízení v místnostech havarijních systémů TQ	Ne	Ne
FSK_B_058 – Systém UV 40 chlazení průchodek			
SBF_B.029	Odvod tepelných ztrát od technologických průchodek na hranici HO	Ne	Ne
FSK_B_077 – Systém UV 55 přívod vzduchu do blokové dozorny			
SBF_B.018	Zajištění bezpečného prostředí pro personál v BD v případě výskytu RA látek a látek nebezpečných pro lidské zdraví v okolí JE	Ne	Ne
FSK_E_001 – SZN 1, 2, 3 I. kategorie			

Pokračování Tab. 17

		TOkr_009 – NT sekvence	TOkr_013 – VT sekvence
SxF	Popis SxF	Aplikovat Ano/Ne	Aplikovat Ano/Ne
SBF_E.001	Dodávka elektrické energie pro spotřebiče důležitosti Ia	Ne	Ano
FSK_E.002 – SZN 1, 2, 3 II. kategorie			
SBF_E.021	Dodávka elektrické energie pro spotřebiče SZN II. kategorie vyžadujících napájení v DEC A (SBO)	Ne	Ano
SVF_E.201	Dodávka elektrické energie z mDG	Ne	Ne
FSK_Q.002 – Systém pro spouštění ESF (ESFAS)			
SBF_Q.153	Izolace HO	Ne	Ne
SBF_Q.157	Spuštění TQ doplňování (TQ needed)	Ne	Ne
SBF_Q.171	Ruční spouštění zásahů ESFAS	Ne	Ne
SBF_Q.174	Vykonání povelů z ručního řízení z BD/ND na bezpečnostní AČ a poskytnutí informací (ded. 1E)	Ne	Ne
FSK_Q.004 – Pohavarijní monitorovací systém (PAMS)			
SBF_Q.701	Pohavarijní monitorování dle RG 1.97, rev. 3, kat. 1	Ne	Ne
SBF_Q.702	Pohavarijní monitorování dle RG 1.97, rev. 3, kat. 2	Ne	Ne
SBF_Q.703	Pohavarijní monitorování dle RG 1.97, rev. 3, kat. 3	Ne	Ne
FSK_Q.016 – Zařízení blokové a nouzové dozorny			
SBF_Q.060	Přímo přiřazené 1E řízení a monitorování (dedicated 1E)	Ne	Ne
SBF_Q.061	Pevně propojené řízení z ND – fixwired control (FWC)	Ne	Ne
SBF_Q.062	Diverzní manuální řízení z BD (DMC)	Ne	Ne
FSK_Q.022 – Komunikační prostředky			
SVF_Q.991	Zajištění vyhrazené interní komunikace BD/ND s HRS a TPS	Ne	Ne
SVF_Q.995	Zajištění alternativní vyhrazené komunikace záložního TPS	Ne	Ne
FSK_Q.023 – Zařízení elektrodozorny AE725/2			
SVF_Q.996	Zajištění řízení a ovládání z AE725/2	Ne	Ne
FSK_S.002 – Reaktorovny			
POB_S.529	Stínění ionizujícího záření v Reaktorovně	Ne	Ne
POB_S.532	Zachycení a lokalizace úniků RA látek ze zdrojů, které se nacházejí v Reaktorovně	Ne	Ne
POV_S.703	Umístění a ochrana SKK s vlivem na jadernou bezpečnost umístěných v Reaktorovně	Ne	Ne
POV_S.736	Statická podpora HO od Reaktorovny	Ne	Ne
FSK_S.003 – Hermetické obálky			
POB_A.525	Nádrž GA201 obsahuje předepsanou koncentraci H ₃ BO ₃	Ne	Ne
POB_S.503	Zásoba roztoku H ₃ BO ₃ v GA201 pro NTTQ	Ne	Ne

Pokračování Tab. 17

		TOkr_009 – NT sekvence	TOkr_013 – VT sekvence
SxF	Popis SxF	Aplikovat Ano/Ne	Aplikovat Ano/Ne
POB_S.506	Zajištění opatření pro shromažďování chladiva z úniků I.O. v GA201	Ne	Ne
POB_S.535	Umožnění průchodu médií a energií skrze hranici HO	Ne	Ne
POB_S.548	Zachycení a odvod RA kapalných látek v HO v normálním a abnormálním provozu	Ne	Ne
POB_S.554	Zajištění odolnosti HO vůči cliff-edge efektu pro zamezení časnému velkému úniku	Ne	Ne
POB_S.568	Vytvoření nádrží pro manipulaci s aktivním zařízením a materiálem	Ne	Ne
POB_S.569	Umožnění transportu a udržení zásoby chladiva pro IVR	Ne	Ne
POV_S.702	Umístění a ochrana SKK s vlivem na jadernou bezpečnost umístěných v HO	Ne	Ne
SBF_S.034	Lokalizace RA látek uvnitř HO v průběhu a po odeznění havarijních stavů (RČA)	Ne	Ne
FSK_S.006 – Objekty DGS			
POB_S.516	Zajištění rozvodu vody na sání čerpadel TVD	Ne	Ne
POV_S.708	Umístění a ochrana SKK s vlivem na jadernou bezpečnost umístěných v objektu Dieslgenerátorové, kompresorové a čerpací stanice	Ne	Ne
POV_S.758	Umožnění pohybu osob a transport materiálu pro plnění činností s vlivem na jadernou bezpečnost v Dieslgenerátorové, kompresorové a čerpací stanice	Ne	Ne
FSK_S.011 – Bazény TVD			
POB_S.518	Vytvoření opatření pro odvod tepla z TVD do atmosféry pomocí bazénů TVD	Ne	Ne
POV_S.716	Umístění a ochrana SKK s vlivem na jadernou bezpečnost umístěných v bazénech TVD	Ne	Ne
FSK_S.027 – Mobilní prostředky			
SBF_A.203	Doplňování nafty do ALT (mobilních) prostředků v dlouhodobé fázi TH HZSp	Ne	Ne
SVF_A.211	Alternativní doplňování vody do GA201 mobilními prostředky	Ne	Ne
SVF_E.202	Dodávka el. energie z mobilních el. centrál HZS	Ne	Ne
FSK_S.031 – Kanály TVD			
POV_S.749	Umístění a ochrana SKK s vlivem na jadernou bezpečnost umístěných v Kanálech TVD	Ne	Ne
FSK_S.033 – Systém protipožární ochrany			
POB_S.571	Poskytnutí tras systémem UJ pro ALT prostředek TB 60	Ne	Ne

7 Hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti

Cílem této diplomové práce je provést hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti v úrovních DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH za použití metody FA DiD pro lokalitu ETE. Nástroje pro provedení těchto hodnocení jsou implementovány v softwarovém nástroji HIDRA a postupy pro provedení jednotlivých hodnocení respektují pokyny uvedené v dokumentu Metodika FA DiD [27].

7.1 Úplnost

Účelem hodnocení úplnosti (komplexnosti) souboru projektových požadavků je ověření správnosti a kompletnosti dříve sestaveného datového modelu, projektových východisek a požadavků a vzájemných vazeb. Potvrzení úplnosti datového modelu je klíčové před dalším inženýrským hodnocením. Vlastní hodnocení úplnosti je pak provedeno pomocí automatických a manuálních kontrol, které jsou implementovány v softwarovém nástroji HIDRA, a řeší správnost datového modelu v softwarovém nástroji HIDRA a formální správnost dat převedených do datového modelu.

7.1.1 Postup hodnocení

Kontrola úplnosti (komplexnosti) souboru projektových opatření a východisek zanesených do datového modelu probíhá ve čtyřech krocích – kontrola plnění TxF/TBV v požadovaných úrovních DiD, kontrola linií DiD a funkčních řetězců a kontrola FaSK a jejich SxF/POx.

Kontrola plnění TxF/TBV v požadovaných úrovních DiD

Vstupy:

seznam TxF/TBV v softwarovém nástroji HIDRA, aktuální tabulka s požadavky na plnění TxF/TBV v jednotlivých úrovních DiD (Tab. 2) a mapa funkcí

Proces 1:

Manuální porovnání prvních vstupních podkladů (seznam SxF/POx, Tab. 2 a mapy funkcí) vůči sobě – názvy TxF/TBV, požadované úrovně DiD

nástroj v HIDRA: číselník „Typové funkce“

Výstup procesu 1: Ověřený číselník TxF/TBV v softwarovém nástroji.

Proces 2:

Automatické zjištění, zda pro všechny TxF/TBV z číselníků ve všech požadovaných úrovních DiD existuje alespoň jeden funkční řetězec, který je zařazen do linie DiD v požadované úrovni DiD.

nástroj v HIDRA: přehled „Kontrolní přehled TxF“

Výstup procesu 2: Ověření, že pro všechny TxF/TBV z číselníků ve všech požadovaných úrovních DiD existuje alespoň jeden funkční řetězec, který je zařazen do linie DiD v požadované úrovni DiD. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Kontrola linií DiD a funkčních řetězců

Vstupy:

seznam linií DiD, seznam funkčních řetězců a mapa funkcí seskupená dle SUB, vše v softwarovém nástroji HIDRA

Proces 1:

Pro každý funkční řetězec zkontrolovat, že je použit alespoň v jedné linii DiD.

nástroj v HIDRA: přehled „Přehled linií DiD a jejich funkčních řetězců“

Výstup procesu 1: Ověření, že neexistuje funkční řetězec, který není v žádné linii DiD. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Proces 2:

Pro každou linii DiD zkontrolovat, že je umístěna na mapě funkcí seskupená dle SUB.

nástroj v HIDRA: přehled „Přehled linií DiD v mapě funkcí“

Výstup procesu 2: Ověření, že neexistuje linie DiD, která není použita v mapě funkcí seskupené dle SUB. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Proces 3:

Ověřit, že pro danou linii DiD v dané úrovni DiD jsou pro všechny její přiřazené funkční řetězce, respektive jejich SxF/POx, společné úrovně DiD. A dále, že jsou linie DiD správně.

nástroj v HIDRA: přehled „Nesoulad DiD u funkčních řetězců vs DiD v mapě funkcí“

Výstup procesu 3: Ověření, že linie DiD se skládají z kompatibilních funkčních řetězců (stejná úroveň DiD), a ověření, že linie DiD jsou správně umístěny v mapě funkcí v souladu s jejich funkčními řetězci. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Kontrola FaSK a jejich SxF/POx

Vstupy:

přehledová tabulka se seznamy FaSK a SxF/POx

Proces 1:

Automatická kontrola – všechny FaSK jsou použity alespoň na jednom funkčním řetězci.

nástroj v HIDRA: přehled „Přehled FaSK na funkčních řetězcích“

Výstup procesu 1: Ověření, že neexistuje FaSK, který není použit alespoň na jednom funkčním řetězci. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Proces 2:

Automatická kontrola – všechny SxF/POx jsou poskytovány nějakou FaSK.

nástroj v HIDRA: číselník „Specifické funkce/Projektová opatření“

Výstup procesu 2: Ověření, že neexistuje SxF/POx, která není vykonávaná nějakou FaSK. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Proces 3:

Automatická kontrola – že každá SxF/POx je použita alespoň na jednom funkčním řetězci.

nástroj v HIDRA: přehled „Přehled SxF/POx na funkčních řetězcích“

Výstup procesu 3: Ověření, že neexistuje SxF/POx, která není využita na alespoň jednom funkčním řetězci. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

Proces 4:

Automatický výpis a jeho manuální kontrola, že žádná SBF/POB není podmíněna SPF/POP (podmíněno DiD).

nástroj v HIDRA: přehled „Přehled linií DiD a jejich FR“

Výstup procesu 4: Ověření, že neexistuje SBF/POB, která je podmíněna SPF/POP. V případě, že toto nebude platit, je nutno doplnit o inženýrské hodnocení. Přípustné pro funkce v „OR“ nebo funkce v DiD 1, 2. V případě nesouladu bude provedena úprava dat v datovém modelu FA DiD.

7.1.2 Vyhodnocení úplnosti

Kontrola plnění TxF/TBV v požadovaných úrovních DiD

Proces 1:

Bylo provedeno manuální porovnání vstupních podkladů pro zpracování datového modelu FA DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH na ETE a byla shledána shoda s požadavky plnění TxF/TBV v příslušných úrovních DiD podle požadavků v Tab. 2.

Proces 2:

V rámci procesu 2 byla provedena automatická kontrola plnění TxF/TBV ve všech požadovaných úrovních DiD, kdy pro každou TxF/TBV požadovanou v dané úrovni DiD existuje alespoň jedna linie DiD tvořená funkčními řetězci. Výstup kontroly z softwarového nástroje HIDRA je uvedený v Tab. 18 na následující straně. Z automatické kontroly plyne, že některé TxF/TBV nejsou v úrovních DiD 1-3a plněny, což je v pořádku, protože soubor opatření pro zmírňování následků TH plní své funkce až v úrovních DiD 4, 5 a výjimečně i v úrovni DiD 3b.

Tab. 18. Výstup kontroly plnění TxF/TBV ze softwarového nástroje HIDRA.

Označení	Požadavek na plnění v úrovni DiD					
	1	2	3a	3b	4	5
1.TBF02						
1.TBF03						
2.TBF05						
2.TBF06						
2.TBF07						
2.TBF08						
2.TBF09						
3.TBF12						
3.TBF13						
3.TBF29						
3.TBV02						
3.TBV03						
3.TBV04						
0.TBF19						
0.TBF20						

Označení	Požadavek na plnění v úrovni DiD					
	1	2	3a	3b	4	5
0.TBF34						
0.TBF35						
0.TBF21						
0.TBF30						
0.TBF31						
0.TBF32						
0.TBF33						
0.TBF36						
0.TBF37						
0.TBF38						
0.TBF41						
0.TBV05						
0.TBV09						
TVF01						
TVF02						

Kontrola linií DiD a funkčních řetězců

V rámci procesů 1–3 byly provedeny náležitě kontroly a nebyly identifikovány žádné položky k nápravě, proto nevznikl ani požadavek na úpravu dat v softwarovém nástroji HIDRA.

Kontrola FaSK a jejich SxF/POx

V rámci procesů 1–4 byly provedeny náležitě kontroly a nebyly identifikovány žádné položky k nápravě, proto nevznikl ani požadavek na úpravu dat v softwarovém nástroji.

7.2 Robustnost

Účelem provedení hodnocení robustnosti je ověření odolnosti navrhovaného souboru opatření pro zmírňování následků TH na vysokotlakou a nízkotlakou sekvenci TH. K tomuto hodnocení je použit dříve sestavený datový model v softwarovém nástroji HIDRA, který byl pro potřeby sestavení celkových funkčních řetězců (CFŘ) rozšířen o linie DiD v podpůrném SUB z profesí elektro, SKŘ, stavba, zajištění prostředí a odvod tepla z bezpečnostních systémů.

Hodnocení robustnosti je vlastním výstupem inženýrského hodnocení:

- Automatické vyhodnocení hrozeb – porovnání intenzity mechanismu hrozby s požadavkem na odolnost.
- Inženýrské hodnocení robustnosti
 - Konstrukce počátečního CFŘ zajišťujícího plnění všech požadovaných bezpečnostních, případně provozních, funkcí.
 - Aplikace hrozeb – jednoduché nebo kombinované hrozby a okrajové podmínky na model funkčních vazeb.

- Vyhodnocení funkčností jednotlivých FaSK po aplikaci hrozby.
- Prokázání možnosti konstrukce nového CFŘ zajišťujícího plnění všech požadovaných bezpečnostních funkcí po aplikaci hrozby s využití dostupných FaSK, které odolaly hrozbě.
- Uvedení maximální dosažené úrovně DiD odpovídající hrozbě a posouzení, zda odpovídá projektovému předpokladu pro danou PIU/hrozbu.

7.2.1 Postup hodnocení

Vstupy:

úplnost modelu (viz kontrola v kap. 7.1), mapa funkcí a definované odolnosti vůči mechanismům hodnocených hrozeb

Proces 1:

Vytvoření hrozeb pomocí mechanismů, resp. okrajových podmínek

nástroj v HIDRA: „Hrozby a vyhodnocení“

Výstup procesu 2: Uložená hrozba v softwarovém nástroji HIDRA

Proces 2:

1. Sestavit počáteční CFŘ – vybere se v mapě funkcí a je zvýrazněn světle modrou barvou/orámováním).
2. Aplikace hrozby (kombinace mechanismů) na mapu funkcí.
3. Softwarové vyhodnocení hrozeb pomocí tzv. semaforu:



červená – nefunkční linie zasažená hrozbou neschopná plnit SxF/POx (nedostatečná odolnost), zelená – funkční linie nezasazená hrozbou (odolná), šedá – linie nezasazené hrozbou, které ztratily podpůrnou funkci v důsledku aplikované hrozby, oranžová – značí problémy v datovém modelu.

nástroj v HIDRA: „Mapa funkcí – Aplikovat hrozbu“

Výstup procesu 2: Uložený PCFŘ v softwarovém nástroji HIDRA a mapa funkcí (červeno-zeleno-šedivá).

Proces 3:

- Provedení inženýrského hodnocení spočívajícího v sestavení výsledného CFŘ (VCFŘ) zvolením dostupných linií DiD na základě výsledků z procesu 2.
- Kontrola plnění požadovaných TxF/TBV odpovídajících vybrané úrovni DiD po aplikaci hrozby. Vyhodnocení nejvyšší dosažené úrovně DiD, resp. robustnosti projektu/linií DiD.
- Vyhodnocení rezervy odolnosti FaSK a SxF/POx pro hodnocenou hrozbu.

nástroj v HIDRA: „Mapa funkcí“

Výstup procesu 3: Uložený VCFŘ v softwarovém nástroji HIDRA a uložená mapa funkcí.

7.2.2 Vyhodnocení robustnosti

Hodnocení robustnosti souboru opatření pro zmírňování následků TH bylo provedeno v softwarovém nástroji HIDRA, kde byla pro všechny FaSK a jejich vykonávané i podpůrné SxF/POx určena aplikovatelnost mechanismů dvou hodnocených hrozeb na sestavené PCFŘ pro LOCA (viz VCFŘ z [3]) a pro SBO. Vyhodnocení robustností pro obě řešené hrozby je uvedeno níže.

TH vzniklá v důsledku nevládnuté LOCA havárie (nízkotlaká sekvence)

Jak již bylo dříve řečeno, vznik TH na ETE je velmi málo pravděpodobný a je téměř nemožné nalézt sekvenci událostí, které by vedly k TH. Proto byly po dohodě se SÚJB postulovány dva scénáře vzniku TH. Jedním z těchto scénářů je i vznik TH v důsledku nevládnuté LOCA havárie (nízkotlaká sekvence).

Při TH dochází k přechodu JE jako celku do úrovně DiD 4. Z toho důvodu není předpokládána aktivní funkce ZPP a DIV prostředků používaných v nižších úrovních DiD, ale pro správnou funkci souboru opatření pro zmírňování následků TH je požadována integrita potrubních tras a dostupnost zdrojů chladiva. V této diplomové práci se nepředpokládá působení vnějších a vnitřních vlivů, které by měly další negativní dopad na SKK a ani není uvažováno časové hledisko dostupnosti některých funkcí plněných ZPP, DIV nebo ALT prostředky.

Po aplikaci hrozby nízkotlaké sekvence na mapu funkcí došlo k vyhodnocení dostupnosti linií DiD pomocí výše zmíněného semaforu a v návaznosti na tento semafor byl sestaven VCFŘ pro nízkotlakou sekvenci TH (viz Příloha A – Výsledný CFŘ v mapě funkcí pro nízkotlakou sekvenci). Tento VCFŘ zajišťuje plnění všech požadovaných TxF/TBV s nejvyšší dosaženou úrovní bloku v úrovni DiD 4, a to i přestože je v semaforu u některých linií DiD vyhodnocena nedostupnost některých podpůrných linií DiD (šedá barva), ale vždy jde o nedostupnost jedné z podpůrných funkcí v logickém spojení „OR“, proto nebylo potřeba upravit vlastní datový model.

V následující Tab. 19 je uveden přehled přechodu mezi úrovněmi DiD v rámci uvažovaných výkonných a podpůrných SUB pro stav JE s implementovaným souborem opatření pro zmírňování následků TH i s uvažováním aktuálního stavu JE.

Tab. 19. Přechod mezi úrovněmi DiD z PCFŘ do VCFŘ v rámci uvažovaných SUB a částí SUB podpůrných systémů při nízkotlaké sekvenci.

Název SUB	Druh SUB	Úroveň DiD		
		PCFŘ	VCFŘ	VCFŘ aktuální stav
Řízení reaktivity v AZ	výkonný	3a	4	4
Zásoba chladiva	výkonný	3a	4	není k dispozici
Odvod tepla z AZ	výkonný	3a	4	není k dispozici
Omezení úniků RA látek	výkonný	3a	4	4
Fyzikální bariéry JZ s reaktorem	výkonný	3a	4	4
Elektrické napájení	podpůrný	3a	1	1
Zajištění funkčních schopností	podpůrný	3a	4	4
Odvod tepla pomocí TVD	podpůrný	3a	1	1
Zajištění prostředí	podpůrný	3a	4	4
SKŘ	podpůrný	3a	4	4

Jak je zřejmé z Tab. 19, nebylo možné nalézt VCFŘ po aplikaci hrozby nízkotlaké sekvence na aktuální stav JE, protože neexistují dostupné linie DiD v SUB zajištění zásoby chladiva a odvodu tepla z AZ/TNR. V SUB omezení úniků RA látek, zajištění fyzikálních bariér a odvodu tepla pomocí TVD sice použitelné linie DiD nalezeny byly, ale v případě nedostupnosti některých SKK (např. čerpací stanice TVD) dojde k jejich selhání.

TH vzniklá v důsledku nezvládnutého SBO (vysokotlaká sekvence)

Hrozba vysokotlaké sekvence TH je druhým postulovaným scénářem vzniku TH na ETE. Hlavní rozdíl mezi zmírňováním následků nízkotlaké a vysokotlaké sekvence spočívá v potřebě úspěšného odtlakování I.O. na začátku vysokotlaké sekvence. Další postup je u obou sekvencí víceméně podobný. Tato potřeba počátečního snížení tlaku v I.O. je prezentována i v jednotlivých liniích DiD, resp. v jejich konfiguracích.

Stejně jako u předchozího případu nízkotlaké sekvence dochází u vysokotlaké sekvence k přechodu JE jako celku do úrovně DiD 4 a v této diplomové práci není předpokládáno působení vnějších a vnitřních vlivů, ani kombinace s jinými hrozbami (např. výpadkem TVD, apod.), které by měly další negativní dopad na SKK a ani není uvažováno časové hledisko dostupnosti některých funkcí plněných ZPP, DIV nebo ALT prostředky.

Po aplikaci hrozby vysokotlaké sekvence na mapu funkcí došlo, stejně jako v předchozím případě, k vyhodnocení dostupnosti linií DiD pomocí semaforu a k sestavení VCFŘ pro vysokotlakou sekvenci (viz Příloha B – Výsledný CFŘ v mapě funkcí pro vysokotlakou sekvenci). Tento VCFŘ zajišťuje plnění všech požadovaných TxF/TBV s nejvyšší dosaženou úrovní bloku v úrovni DiD 4 a i v tomto případě je semafor u některých linií DiD šedý, což je způsobeno tím, že některé podpůrné funkce byly přímo vyřazené hrozbou, ale na funkčním řetězci jsou v logické spojení „OR“.

V následující Tab. 20 je uveden přehled přechodu mezi úrovněmi DiD v rámci uvažovaných výkonných a podpůrných SUB pro stav JE s implementovaným souborem opatření pro zmírňování následků TH i s uvažováním aktuálního stavu JE.

Tab. 20. Přechod mezi úrovněmi DiD z PCFŘ do VCFŘ v rámci uvažovaných SUB a částí SUB podpůrných systémů při vysokotlaké sekvenci.

Název SUB	Druh SUB	Úroveň DiD		
		PCFŘ	VCFŘ	VCFŘ aktuální stav
Řízení reaktivity v AZ	výkonný	3b	4	4
Zásoba chladiva	výkonný	3b	4	není k dispozici
Odvod tepla z AZ	výkonný	3b	4	není k dispozici
Omezení úniků RA látek	výkonný	3b	4	4
Fyzikální bariéry JZ s reaktorem	výkonný	3b	4	4
Elektrické napájení	podpůrný	3b	4	4
Zajištění funkčních schopností	podpůrný	3b	4	4
Odvod tepla pomocí TVD	podpůrný	3b	1	1
Zajištění prostředí	podpůrný	3b	4	4
SKŘ	podpůrný	3b	4	4

V případě sestavení VCFŘ při uvažování současného stavu JE pro případ vysokotlaké sekvence se vyskytly stejné problémy jako v případě nízkotlaké sekvence.

7.3 Nezávislost

Provedení hodnocení nezávislosti úrovní DiD pro soubor opatření pro zmírňování následků TH je součástí vyhodnocení a objasnění míry fyzické a funkční nezávislosti mezi úrovněmi DiD požadované SÚJB v rámci podmínky A4 [2]. Jeho účelem je prokázat vzájemnou nezávislost a zálohovatelnost jednotlivých linií DiD pro plnění typových funkcí v dílcích SUB v jednotlivých úrovních DiD. Tímto hodnocením je prověřována zejména fyzická závislost/nezávislost FaSK v liniích DiD v jednotlivých SUB a také fyzická závislost/nezávislost linií DiD v daném SUB navzájem. Zároveň je potřeba zmínit, že v rámci tohoto hodnocení nejsou hodnoceny linie DiD v různých konfiguracích.

Hodnocení nezávislosti linií DiD je provedena pro každou SUB zvlášť a hodnocení je uvedeno s použitím odstupňovaného přístupu z pohledu potřebné míry nezávislosti od největší k nejnižší, který na základě důležitosti stanovuje priority určitých dvojic:

Priorita 1 – závislost DiD 4 na prostředcích linií z předchozích úrovní DiD,

Priorita 2 – dvojice linií DiD v jedné úrovni DiD nebo závislost linií z DiD 5 na těch z DiD 3b.

Vlastní kontrola nezávislosti linií DiD v daných SUB plněných souborem opatření pro zmírňování následků TH zanesených do datového modelu v softwarovém nástroji HIDRA probíhá v následujících krocích:

1. S využitím mapy funkcí dojde k vytvoření dvojic linií DiD zajišťujících plnění SUB v úrovních DiD.
2. Analýza použitých FaSK, jejich plněných SxF/POx a požadovaných podpůrných SxF/POx pro všechny linie DiD ve vytvořených dvojicích linií DiD pomocí přehledů v rámci softwarového nástroje HIDRA.
3. Srovnání použitých FaSK v dané dvojici linií DiD. V případě, že výsledek srovnání prokáže využití různých FaSK v obou hodnocených liniích DiD, je prokázána nezávislost linií DiD z pohledu společných FaSK.
4. Pokud jsou v obou liniích DiD použité stejné FaSK, budou porovnány jejich plněné SxF/POx a bude provedeno inženýrské hodnocení, které posoudí nezávislost linií DiD z hlediska prostředků vykonávajících jednotlivé SxF/POx.
5. Pro každou z linií DiD v dané dvojici bude vypsán seznam podpůrných SxF/POx. Porovnáním seznamu budou identifikovány společné SxF/POx, pokud budou pro porovnávané linie DiD společné podpůrné SxF/POx, jde v principu o linie DiD závislé. V tomto případě bude provedeno inženýrské posouzení přijatelnosti identifikované závislosti.

Z výše popsaného hodnocení závislosti/nezávislosti linií DiD mohou vyplynout různé stupně závislosti dvojic linií DiD. Tyto stupně nezávislosti jsou:

1. Fyzicky a funkčně nezávislé – plně nezávislé dvojice linií DiD po straně FaSK, vykonávaných SxF/POx i podpůrných SxF/POx,
2. Fyzicky nezávislé – nezávislé dvojice linií DiD po straně FaSK a vykonávaných SxF/POx, ale mají společné některé podpůrné SxF/POx:

- a. společné jen podpůrné POx,
 - b. společné podpůrné SxF nebo SxF i POx,
3. Funkčně nezávislé – závislé dvojice linií DiD po straně FaSK, ale daný FaSK vykonává různé, na sobě nezávislé, SxF/POx a
 4. Plně závislé – závislé dvojice linií DiD po straně FaSK a vykonávaných SxF/POx.

Vzhledem k tomu, že původní projekt ETE nebyl navržen na zmírňování následků TH, využívají dodatečně navržené prostředky zdrojů chladiwa a potrubních tras ZPP a DIV prostředků. Z těchto důvodů je možné předpokládat, že z hodnocení nezávislosti linií DiD, na jejichž plnění se soubor opatření zmírňování následků TH podílí, vyplyne stupeň závislosti linií DiD 5 a výjimečně stupeň 3.

7.3.1 Postup hodnocení

Vstupy:

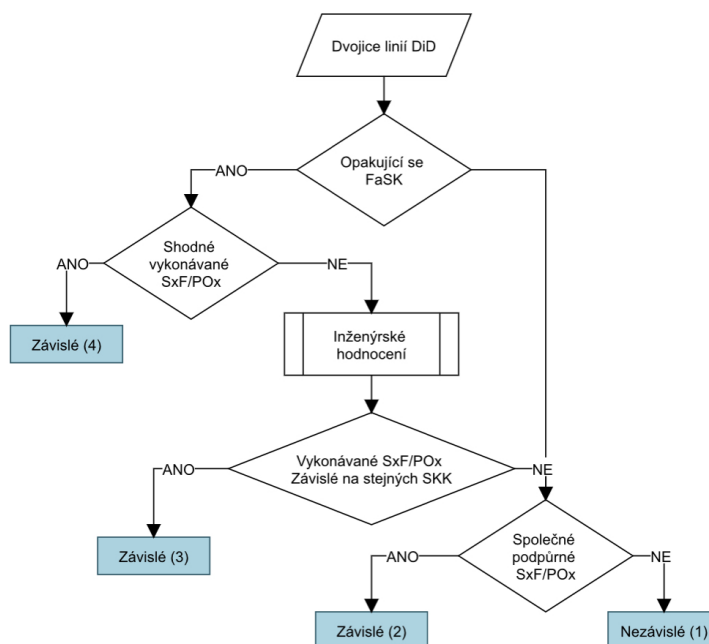
seznam linií DiD, informace o SxF/POx pro jednotlivé funkční řetězce v liniích DiD a informace o podpůrných funkcích jednotlivých FaSK pro jednotlivé funkční řetězce v liniích DiD

Proces:

1. Tvorba dvojice porovnávaných linií DiD v daném SUB dle výše uvedených pravidel.
2. Pro každou z linií DiD porovnat jejich použité FaSK.
3. Pokud nebudou společné FaSK, linie může být nezávislá, proto je nutno prověřit závislost z pohledu podpůrných funkcí (viz bod 6).
4. Pro každou z linií DiD porovnat vykonávané SxF/POx u společných FaSK.
5. Pokud nebudou shodné FaSK a vykonávané SxF/POx – linie DiD jsou funkčně nezávislé (stupeň 1 a 2), pokud budou shodné FaSK a vykonávané SxF/POx – linie DiD jsou funkčně závislé (stupeň 3 a 4).
6. Pro všechny FaSK jsou porovnány požadované podpůrné SxF/POx.
7. Na základě výsledku porovnání z bodu 3, 4 a 6 je linie zařazena do příslušného stupně závislosti (viz schéma na Obr. 28).
8. Závěrečné inženýrské hodnocení nezávislosti zohlední i úrovně DiD dané linie (sdílené DiD 1 a 2 – malý problém, sdílené DiD 2 a 3 – velký problém).

Výstupy procesu:

- Vytvořený seznam porovnávaných dvojic linií DiD (pro každý sloupec mapy funkcí, tj. SUB u TxF/TBV),
- Výsledky z porovnávání vybraných dvojic – priority, stupně nezávislosti, výpis společných FaSK, vykonávaných a podpůrných SxF/POx a
- Závěrečná zpráva pro jednotlivé TxF/TBV kombinující výsledky z bodu 1–3 výstupu.



Obr. 28. Schéma procesu hodnocení nezávislosti linií DiD.

7.3.2 Vyhodnocení úplnosti

Hodnocení závislosti, resp. nezávislosti, linií DiD bylo provedeno automatickým hodnocením v softwarovém nástroji HIDRA (přehled „*Nezávislost DiD – seznam dvojic linií*“). Toto hodnocení pak bylo doplněno inženýrským hodnocením uvedeným níže. U většiny hodnocených dvojic linií DiD byl naplněn předpoklad plné závislosti, výjimku tvořily dvojice linií DiD v SUB řízení reaktivity.

Výstup hodnocení nezávislosti výkonných linií DiD, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH exportovaný z softwarového nástroje HIDRA, je uvedený v Příloze C – Hodnocení nezávislosti linií DiD.

Priorita 1 – závislost DiD 4 na prostředcích linií z předchozích úrovní DiD

Jako neshody s prioritou 1 bylo hodnoceno přibližně 70 % všech hodnocených linií DiD, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH. To je způsobeno tím, že prostředky pro zmírňování následků TH využívají zdroje chladiva, stavební konstrukce a potrubní trasy stávajících ZPP a DIV prostředků pro doplňování chladiva, snižování tlaku v I.O. a dalších, které fungují v úrovních DiD 1–3b.

Priorita 2 – dvojice linií DiD v jedné úrovni DiD nebo závislost linií z DiD 5 na těch z DiD 3b

Jako neshody s prioritou 2 bylo hodnoceno přibližně 30 % všech hodnocených linií DiD, na jejichž plnění se podílí soubor opatření pro zmírňování následků TH. Ve všech případech jde o závislost linií DiD z úrovně DiD 5 na těch z úrovně DiD 3b. Pro řešení TH je totiž předpokládáno využití provozuschopných systémů navržených pro práci v úrovni DiD 3b včetně jejich podpůrných systémů pro zajištění plnění TBF.

8 Závěr

Tato diplomová práce popisuje hodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky pro soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín. První část této diplomové práce popisuje problematiku ochrany do hloubky, základní fenomenologii těžkých havárií, obecné přístupy ke zmírňování následků těžkých havárií a konkrétní přístupy a prostředky zvolené pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín. Druhá část se věnuje popisu metody Funkčních analýz ochrany do hloubky, sestavování datového modelu a vlastnímu vyhodnocení úplnosti, robustnosti a nezávislosti.

Je potřeba zdůraznit, že datový model byl sestaven pro soubor opatření pro zmírňování těžkých havárií navržený pro implementaci v Jaderné elektrárně Temelín, který však není v současné době realizován – v některých případech není navržen ani koncepční návrh (např. diverzní prostředek pro odtlakování). Proto je v případě, že se bude budoucí řešení souboru opatření pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín odlišné od toho, které je hodnoceno v této diplomové práci, bude potřeba aktualizovat datový model a provést nové hodnocení.

Provedené hodnocení úplnosti mělo odhalit případné chyby v sestaveném datovém modelu. Z žádného z dílčích procesů hodnocení úplnosti nevyšly požadavky na úpravu ani doplnění sestaveného datového modelu. Z toho důvodu je možné říci, že hodnocení úplnosti bylo úspěšné, proto bylo možné použít sestavený datový model pro hodnocení robustnosti a nezávislosti v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky.

Hodnocení robustnosti bylo provedeno pro stav s implementovaným navrženým souborem opatření pro zmírňování následků těžkých havárií Jaderné elektrárny Temelín i pro aktuální fyzický stav bloku. Při hodnocení robustnosti stavu bloku s navrženým souborem opatření pro zmírňování následků těžkých havárií byly nalezeny výsledné celkové funkční řetězce pro plnění požadovaných typových funkcí. Proto je možné říci, že navržená strategie zmírňování následků těžkých havárií bude úspěšná. Při hodnocení robustnosti aktuálního fyzického stavu bloku nebylo možné nalézt výsledné celkové funkční řetězce zejména v SUB odvodu tepla a zajištění zásoby chladiva. Proto v případě, že by došlo k těžké havárii při současném stavu bloku, je velmi pravděpodobné, že by došlo k protavení tlakové nádoby reaktoru, případně i hermetické obálky a následně k velkému úniku radioaktivních látek do atmosféry.

Posledním hodnocením, které bylo v rámci této diplomové práce provedeno, bylo hodnocení nezávislosti linií ochrany do hloubky v jednotlivých úrovních ochrany do hloubky. Výstupem tohoto hodnocení bylo, že navržený soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií na Jaderné elektrárně Temelín je plně závislý na prostředcích používaných v nižších úrovních ochrany do hloubky, zejména pak na nízkotlakém systému havarijního doplňování a systému ochrany primárního okruhu od převýšení tlakem. Tato závislost je důsledkem toho, že navržený soubor opatření je do projektu implementován dodatečně a nebylo technicky možné, aby navržený soubor opatření pro zmírňování následků těžkých havárií byl zcela nezávislý na prostředcích z nižších úrovní ochrany do hloubky.

V návaznosti na provedená hodnocení je možné říci, že pro zajištění úspěšného zmírnění následků těžké havárie na Jaderné elektrárně Temelín je nutné implementovat nezávislé prostředky pro zmírňování následků těžkých havárií. Ať prostředky popsané v této diplomové práci nebo podobné.

Literatura

- [1] *Zákon 263/2016 ze dne 14. července 2016, atomový zákon* [online]. In: *Sbírka zákonů*, částka 102. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf>
- [2] *Rozhodnutí č.j. SÚJB/OHJB/4932/2016: Povolení žadateli k provozu jaderného zařízení - 1.bloku Jaderné elektrárny Dukovany* [online]. 30.3.2016 [cit. 2020-09-27]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/rozhodnuti/Povoleni_LTO_EDU1.pdf
- [3] HINTERHOLZINGEROVÁ, L. *Hodnocení úplnosti, nezávislosti a robustnosti havarijních systémů v úrovních ochrany do hloubky v rámci Funkčních Analýz ochrany do hloubky (FA DiD) ETE*. Diplomová práce, FS ČVUT Praha, 2020.
- [4] ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT: NUCLEAR ENERGY AGENCY. *Implementation of Defence in Depth at Nuclear Power Plants* [online]. NEA No. 7248. OECD NEA, 2016 [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/nsd/pubs/2016/7248-did-npp.pdf>
- [5] MISAK, J. *Strategy of Defence in Depth and IAEA Guidance on Screening of Comprehensiveness of Defense in Depth*, interní prezentace. ÚJV Řež, a.s. Praha, 2015.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Safety of Nuclear Power Plants: Design* [online]. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev.1). International Atomic Energy Agency, Vídeň, Rakousko, 2016 [cit. 2019-06-23]. ISSN 1020-525X. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf>
- [7] *Vyhláška ze dne 26. září 2017, o požadavcích na projekt jaderného zařízení* [online]. In: *Sbírka zákonů*, částka 112. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/329_2017.pdf
- [8] ČEZ–ETE. *Předprovozní bezpečnostní zpráva Elektrárna Temelín*, interní dokument ČEZ, a. s.
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *IAEA safety glossary – 2018 edition* [online]. International Atomic Energy Agency, Vídeň, Rakousko, 2019 [cit. 2019-09-24]. ISBN 978–92–0–104718–2. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1830_web.pdf
- [10] *Severe accident* [online]. United States Nuclear Regulatory Commission, 2019 [cit. 2019-09-24]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/severe-accident.html>
- [11] ČEZ, a.s. *Výukové materiály pro přípravu personálu JE – těžké havárie (Modul 2)*, interní dokumenty ČEZ, a.s.
- [12] DUSPIVA, J. *Težké havárie* [prezentace v rámci předmětu Jaderná bezpečnost]. Ústav jaderného výzkumu Řež, 2011.

- [13] KATZER, M. *Návrh řízení pro havarijní chlazení tlakové nádoby reaktoru* [online]. Diplomová práce, EÚ FSI VUT v Brně, 2013 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66956
- [14] MATEJOVIC, P., BARNAK, M., BACHRATY, M., BERKY, R. *Assessment of In-vessel Corium Retention for VVER-440/V213* [online]. 2010 [cit. 2019-06-01]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/026/48026401.pdf
- [15] ZVONAREV, Y. *Analytical and Experimental Studies for Core Catcher Development* [online]. NRC Kurchatov Institute, 2013 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/psa_eps/vver-core-catcher
- [16] *Vyhláška ze dne 25. května 2017, o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona* [online]. In: *Sbírka zákonů*, částka 56. Dostupný také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/162_2017.pdf
- [17] *Vyhláška ze dne 23. ledna 2017, o zajišťování jaderné bezpečnosti jaderného zařízení* [online]. In: *Sbírka zákonů*, částka 7. [cit. 2020-06-01]. Dostupný také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/21_2017.pdf
- [18] *Vyhláška ze dne 17. října 2016, o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události* [online]. In: *Sbírka zákonů*, částka 5613. Dostupný také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/359_2016.pdf
- [19] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Po fukušimský Národní Akční Plán (NACP) na posílení jaderné bezpečnosti jaderných zařízení v České republice* [online]. SÚJB, Praha, 2019 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/Cesky_NAcP_Rev4_final.pdf
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Severe of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, SSR-2/2 (Rev. 1)* [online]. IAEA Specific Safety Requirements. International Atomic Energy Agency, Vídeň, Rakousko, 2016 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1716web-18398071.pdf>
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, SSG-54* [online]. IAEA Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency, Vídeň, Rakousko, 2019 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1834_web.pdf
- [22] ČEZ, a.s. *Zátěžové testy JE – ČEZ, a.s.: Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Temelín*, interní dokument ČEZ, a.s. 2011.
- [23] ÚJV ŘEŽ: DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. *Celoelektrárenská/bloková projektová východiska*, interní dokument. Praha, 2019.
- [24] ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. *Úvodní projekt: Dodatečné prostředky pro doplňování I.O. a dlouhodobý odvod tepla z kontejnmentu VVER 1000 ETE*. ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA, Praha, 2018.

- [25] ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. *Technická zpráva: Technické řešení pasivního systému zaplavení ŠR a dlouhodobá dodávka chladiva do ŠR*. ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA, Praha, 2015.
- [26] ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. *Technická zpráva: Studie koncepční části ventingu*. ÚJV ŘEŽ a. s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA, Praha, 2018.
- [27] ÚJV ŘEŽ, a.s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. *Metodika FA DiD*, ÚJV ŘEŽ, a.s., DIVIZE ENERGOPROJEKT PRAHA. Praha, 2019.
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Assessment of Defence in Depth for Nuclear Power Plants, SRS No. 46* [online]. IAEA Safety Report Series. International Atomic Energy Agency, Vídeň, Rakousko, 2005 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1218_web.pdf

Seznam příloh

- Příloha A – Výsledný CFŘ v mapě funkcí pro nízkotlakou sekvenci
Příloha B – Výsledný CFŘ v mapě funkcí pro vysokotlakou sekvenci
Příloha C – Hodnocení nezávislosti linií DiD