

Posouzení rizik selhání lidského činitele v rámci provozu jaderné elektrárny

Bc. Maryana Royik

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta logistiky a krizového řízení

Ústav krizového řízení

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Maryana Royik
Osobní číslo:	L23655
Studijní program:	N1032A020002 Bezpečnost společnosti
Specializace:	Rizikové inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Posouzení rizik selhání lidského činitele v rámci provozu jaderné elektrárny

Zásady pro vypracování

- Provedte literární rešerši zkoumané problematiky z domácích a zahraničních zdrojů.
- Identifikujte a analyzujte rizika selhání lidského činitele v rámci provozu jaderné elektrárny.
- Zpracujte metodickou příručku zaměřenou na prevenci rizik spojených s lidským činitelem v jaderné energetice.
- Vyhodnotte teoretické a praktické přínosy diplomové práce.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Human Factors Engineering in Design of Nuclear Power Plants*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-51, IAEA, Vienna (2019).
2. SKŘEHOT, P.A. *Identifikace zdrojů nebezpečí a vyhodnocení rizik*. Edice Řízení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v zodpovědné firmě. Personální a sociálně právní kartotéka. 2016, č. 12. ISSN 1211-9482.
3. NEUGEBAUER, Tomáš. *Vyhledávání a vyhodnocení rizik v praxi*. 3. vydání. Praha: Wolters Kluwert, 2018. ISBN 978807552-0722.
4. URBANČÍK, Libor. *Jaderná bezpečnost: na půdorysu atomového zákona*. Učební texty vysokých škol. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-214-4971-8.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-3 (Rev.1). IAEA, Vienna (2024). ISBN 978-92-0-130623-4

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. et Ing. Jiří Konečný, Ph.D.**
Ústav krizového řízení

Datum zadání diplomové práce: **6. června 2025**

Termín odevzdání diplomové práce: **4. srpna 2025**

L.S.

prof. Ing. Zuzana Tučková, Ph.D.
děkanka

Ing. et Ing. Jiří Konečný, Ph.D.
ředitel ústavu

V Uherském Hradišti dne 6. června 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

V Uherském Hradišti, dne 04.08.2025

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá posouzením rizik selhání lidského činitele v rámci provozu jaderné elektrárny. Cílem práce je zpracovat metodickou příručku zaměřenou na výpočet pravděpodobností rizik spojených s lidským činitelem. Teoretický základ vychází ze zásad literární rešerše a zabývá se oblastí legislativy, základních pojmů, PSA, lidského faktoru a metodami hodnocení lidského činitele. V praktické části dochází k výpočtu jedné z lidských chyb pomocí programu pro kvantifikaci pravděpodobnosti lidských chyb HRA Calculator. Výsledkem diplomové práce je metodická příručka, která může být využita jako nástroj na kvantifikaci pravděpodobnosti rizik spojených s lidským činitelem pro pracovníky ČEZ, a.s. zabývající touto problematikou a postup k výpočtům spojených s lidským činitelem.

Klíčová slova: lidský faktor, PSA analýza, HRA Calculator, metodická příručka, jaderná elektrárna

ABSTRACT

The thesis deals with the assessment of the risks of human failure in the operation of a nuclear power plant. The aim of the work is to develop a methodological guide aimed at calculating the probability of risks associated with the human factor. The theoretical basis is based on the principles of literature search and deals with the areas of legislation, basic concepts, PSA, human factor and human factor assessment methods. The practical part includes the calculation of one of the human errors using the human error probability quantification program HRA Calculator. The result of the work is a methodological manual that can be used as a tool for quantifying the probability of human factor risks for employees of ČEZ, a.s. dealing with this issue, and a procedure for calculating the human factor.

Keywords: human factors, PSA analysis, HRA Calculator, methodological guide, nuclear power plant

Ráda bych vyjádřila vřelé poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. et Ing. Jiřímu Konečnému Ing. et Ing. Ph.D. za pomoc a poskytnutí veškerých odborných rad. Velké poděkování patří také zaměstnancům ČEZ, a.s., v odvětví analýzy lidských rizik PSA v oblasti jaderné bezpečnosti, kteří mi předali potřebné odborné a praktické informace, Věnovali svůj drahocenný čas a vždy jsem se na mě mohla s čímkoli obrátit. Nejvíce si vážím podpory mé rodiny a přátel, kteří stáli při mně v každé situaci.

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 LEGISLATIVA	14
2 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	15
2.1 NEBEZPEČÍ	15
2.2 BEZPEČNOST	15
2.3 HODNOCENÍ JADERNÉ BEZPEČNOSTI.....	15
2.3.1 Deterministický přístup	15
2.3.2 Pravděpodobnostní přístup.....	16
2.4 INICIAČNÍ UDÁLOSTI.....	16
2.5 RADIAČNÍ MIMOŘÁDNÁ UDÁLOST	17
3 PSA	18
3.1 PROGRAM „LIVING PSA“	18
3.2 POPIS PROVOZU JADERNÉ ELEKTRÁRNY	19
3.3 CÍLE A ÚČEL PSA	20
3.4 PRINCIPY KONSTRUKCE MODELU PSA 1. ÚROVNĚ PRO JE.....	22
4 LIDSKÝ FAKTOR.....	32
4.1 SPOLEHLIVOST LIDSKÉHO ČINITELE.....	33
4.1.1 Faktory ovlivňující (lidský) výkon.....	34
4.1.2 Metriky chybovosti lidského činitele	34
4.1.3 Klasifikace lidských chyb	34
KLASIFIKACE CHYB V PROVOZU	35
4.2 METODY HODNOCENÍ LIDSKÉHO ČINITELE	36
4.3 APLIKACE METOD HODNOCENÍ LIDSKÉHO ČINITELE V JADERNÉ ENERGETICE	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
5 SOUČASNÝ STAV ZPRACOVÁNÍ ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI LIDSKÉHO ČINITELE NA JE DUKOVANY	45
6 VÝBĚR UDÁLOSTI A VÝPOČET.....	48
6.1 POPIS SCÉNÁŘE VYBRANÉ CHYBY	49
6.2 PROVEDENÍ ANALÝZY V SOFTWARE HRA CALCULATOR PRO VYBRANOU INICIAČNÍ UDÁLOST	52
6.2.1 Vložení nové události HFE do HRA Calculator	52
6.2.2 Příznaky.....	53
6.2.3 Postupy a školení.....	53
6.2.4 Popis scénáře v programu HRA Calculator	54
6.2.5 Rozhovor s operátorem	55
6.2.6 Požadovaný počet personálu	58

6.2.7	Časové okno	59
6.2.8	Výpočty kognitivní fáze (Rozhodovací stromy)	61
6.2.9	Opravy kognitivní chyby	69
6.2.10	Faktory ovlivňující lidský výkon	70
6.2.11	Stres při provádění.....	71
6.2.12	THERP analýza	71
6.2.13	Náprava chyby provedení.....	74
6.3	VÝSLEDEK VÝPOČTU	75
7	METODICKÁ PŘÍRUČKA	77
	ZÁVĚR.....	97
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ	103
	SEZNAM TABULEK.....	105
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	106
	SEZNAM PŘÍLOH.....	111

ÚVOD

Žijeme v době, kdy je kladen stále větší důraz na bezpečnost, zejména v oblastech, kde se vyžadují vysoké standardy ochrany, jako je jaderná energetika. I když roste snaha o automatizaci určitých úkonů a nahrazování lidského faktoru stroji, ne všechny činnosti lze snadno nahradit automaty nebo počítači. Lidský faktor tedy i nadále hraje významnou roli ve všech procesech.

Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu lidských chyb v oblasti jaderné bezpečnosti pomocí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PSA). Cílem PSA je identifikovat potenciální rizika a selhání, která mohou vyplynout mimo jiné i z lidských chyb. Vzhledem k modernizaci a zvyšujícím se nárokům na provoz se analýzy lidského faktoru v jaderné bezpečnosti stává nejen důležitou, ale i nezbytnou.

Je třeba si uvědomit, že posouzení lidského činitele jako systému je složité, neboť člověk není stroj. Na jeho chování a rozhodování mají vliv různé vjemy a okolní prostředí.

Tato diplomová práce je rozdělená do dvou hlavních částí. V teoretické části se zaměřuje na literární rešerši, která se zabývá oblastí legislativy, základních pojmů, PSA, lidského faktoru a metodami hodnocení lidského činitele. V praktické části bude proveden prvotní výpočet jedné z lidských chyb pomocí softwaru HRA Calculator.

Výstupem této práce by mělo být vypracování metodické příručky, jako návod pro personál skupiny ČEZ, a.s., který se zabývá výpočty a hodnocením lidských chyb ve studii PSA pomocí softwaru HRA Calculator. Tato metodická příručka by měla mít dopad na implementaci tohoto softwaru na obě jaderné elektrárny a měla by být používána, jako praktický návod pro hodnocení všech lidských chyb v PSA.

CÍL A METODY PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je zpracovat metodickou příručku zaměřenou na praktické použití programu pro kvantifikaci pravděpodobnosti lidských chyb. Zpracování literární rešerše k oblasti lidského faktoru a metody hodnocení lidského činitele lze považovat za sekundární cíl práce. Analýza spolehlivosti lidského faktoru je součástí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti. Tato problematika bude rozebrána v celé diplomové práci.

Po rozhovoru s personálem ČEZ, a.s., bylo zjištěno, že dosud byly analýzy týkající se jaderné elektrárny v rámci hodnocení bezpečnosti zpracovávány společností ÚJV Řež, a.s. jako součást pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PSA). Společnost ČEZ a.s. plánuje provádět tyto analýzy interně a přecházet na používání softwarového nástroje pro hodnocení lidských chyb HRA Calculator, vyvinutý americkým výzkumným ústavem EPRI.

Cílem této diplomové práce bude pro potřeby ČEZ, a.s., provést prvotní výpočet v programu HRA Calculator, jako testování jeho použitelnosti v praxi. Prvotní výpočet v HRA Calculatoru se bude opírat o předchozí výpočet zpracovaný společností ÚJV Řež, a.s., pro tuto konkrétní událost, s cílem zajistit kontinuitu a srovnatelnost výsledků. Na závěr bude provedeno vyhodnocení výsledku výpočtu pomocí stromů událostí a stromů poruchových stavů. Na základě prvotního výpočtu v HRA Calculatoru, bude dále vypracována metodická příručka, která bude sloužit jako návod pro personál oddělení PSA jaderné elektrárny. Implementace metodické příručky bude pro obě jaderné elektrárny v České republice.

Postup této práce byl řešen s kvalifikovaným personálem jaderné elektrárny Dukovany a Temelín, kteří se touto problematikou zabývají.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LEGISLATIVA

Jaderná bezpečnost (*dále jen „JB“*), jaderných zařízení je zajišťována dle legislativních předpisů, nařízení, norem a opatření, a to především zákonem č. 263/2016 Sb. ze dne 14. července 2016, atomovým zákonem a vyhláškami č. 21/2017 Sb., č. 162/2017 Sb. č. 329/2017 Sb. a č. 359/2016 Sb. (Česko. Atomový zákon, 2016).

JB je dle Atomového zákona definována jako „stav a schopnost jaderného zařízení (*dále jen „JZ“*) a fyzických osob obsluhujících JZ zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štepné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních (*dále jen „RA“*) látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí (*dále jen „ŽP“*) a omezit následky nehod“ (Česko. Atomový zákon, 2016).

Cílem je poté dosáhnout náležitých provozních podmínek, haváriím a jejich případné následky zmírňovat. Zásadní je také chránit pracovníky a obyvatelstvo před riziky ionizujícího záření pocházejícího z JZ. JB patří mezi nejvíce regulované oblasti z pozice státu a mezinárodního hlediska. Zajištění JB je postaveno na funkčním systému řízení, kvalifikovaném personálu a kvalitních technologiích (© Skupina ČEZ, a.s., 2025).

Hodnocení JB je stanoveno vyhláškou č. 162/2017 Sb. která se týká požadavků na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona. Tato vyhláška stanovuje pravidla provádění hodnocení bezpečnosti a jednotlivých typů hodnocení a lhůty, v nichž jsou hodnocení prováděna, dále způsob dokumentování hodnocení bezpečnosti a způsob využití hodnocení bezpečnosti.

Dle výše uvedené vyhlášky je hodnocení JB provozu JE rozděleno do dvou základních přístupů. Mezi tyto přístupy je zařazeno deterministické a pravděpodobností hodnocení bezpečnosti. Tyto přístupy hodnotí JB z odlišných hledisek, ale při komplexním pohledu na JB se nutně doplňují (Česko. Atomový zákon, 2016).

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (*dále jen „IAEA“*) je spojována s podporou bezpečnosti jaderných technologií a zajištěním jejich bezpečného a odpovědného využívání. Bezpečnostní návody IAEA jsou poskytovány členským státům, jako rámec a pokyny v oblastech, jako jsou JB, ochrana před radiací a nakládání s odpady. Tyto návody jsou využívány k implementaci norem a osvědčených praktik, čímž je zajištěna ochrana zdraví lidí a životního prostředí. V ČR jsou využívány pro tuto problematiku Bezpečnostní návody Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (*dále jen „SÚJB“*), které vychází z návodu IAEA. (© IAEA, 2025).

2 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Zde je vysvětleno několik základních důležitých pojmů, které se vážou k této problematice.

2.1 Nebezpečí

Nebezpečí je vlastností látky nebo fyzikálního či biologického jevu/děje/faktoru, která může způsobit neočekávané negativní jevy. Tyto negativní jevy mohou být zdrojem ohrožení zdraví a životů lidí, způsobovat materiální škody nebo poškozovat ŽP. Tato vlastnost nemusí být na první pohled zjevná. Může být vyvolána situací nebo činností, kdy je člověk vystaven působení dané vlastnosti látky, a při které může dojít k poranění člověka nebo poškození zdraví, anebo k jejich kombinaci (Bernatík, 2016).

Podobně je tato problematika popisována i u Neugebauera (2018), kde se jedná o nějaký zdroj, situaci nebo činnost s potenciálem způsobit vznik poranění člověka, poškození zdraví nebo ŽP.

2.2 Bezpečnost

Je termín využíván ve všech oblastech potřebných k zajištění ochrany zdraví člověka a k prevenci škod na majetku. V podmínkách jaderných elektráren je nezbytné plnit požadavky na JB, radiační ochranu, technickou bezpečnost, monitorování radiační situace, dále zvládání radiační mimořádné události (*dále jen „RMU“*) a na zabezpečení (Bezpečnostní návody SÚJB, 2021).

2.3 Hodnocení jaderné bezpečnosti

Jsou známy dva způsoby hodnocení JB.

2.3.1 Deterministický přístup

Tímto způsobem musí být prokazována přijatelnost důsledků odezvy JZ a jeho systémů, konstrukcí, komponent a pracovníků na IU z pohledu JB, radiační ochrany, technické bezpečnost a zvládání *RMU*. Deterministickým hodnocením je posuzována schopnost JZ zajistit plnění principů bezpečného využívání jaderné energie. Dále je posuzována odolnost, spolehlivost a účinnost bezpečnostních systémů a dalších systémů, konstrukcí a komponent, které mají vliv na JB v podmínkách, pro které jsou určeny, a schopnost pracovníků zajistit plnění základních bezpečnostních funkcí JZ. Deterministické hodnocení musí být náležitě dokumentováno a uváděno v bezpečnostních zprávách (Česko. Atomový zákon, 2016).

2.3.2 Pravděpodobnostní přístup

Tento přístup by měl být využíván pro hodnocení bezpečnosti ke stanovení priorit, a to zejména při plánování opatření, při zvyšování úrovně JB, radiační ochrany ale také při zvládání radiační mimořádné události a jejího zabezpečení. Tímto způsobem se dále hodnotí celkové riziko, které je představováno jaderným zařízením (Česko. Atomový zákon, 2016).

Pravděpodobnostní přístup hodnotí pravděpodobnost nebo frekvenci (obvykle jen počet událostí za rok) dané nežádoucí události. Ta je v pravděpodobnostním hodnocení JB definovaná jako poškození paliva. Po celou dobu životního cyklu JZ je nutné provádět průběžné hodnocení bezpečnosti současného stavu (Česko. Atomový zákon, 2016).

Metoda pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (*Probabilistic Safety Assessment*, dále jen „PSA“), která je hlavním rámcem této práce, hodnotí úroveň bezpečnosti oceněním rizika provozu JZ ve formě kombinace četnosti výskytu a velikosti následků všech možných havarijních scénářů (Česko. Atomový zákon, 2016).

2.4 Iniciační události

Iniciační událost (dále jen „IU“) je dle atomového zákona definována jako odchylka od normálních podmínek provozu JZ. Její rozvoj může vést k abnormálnímu provozu nebo k havarijním událostem. Také se dá říci, že se jedná o náhodnou, ale předpokládanou událost. Je zahrnutá do projektové dokumentace a zohledňuje se při návrhu bezpečnostních systémů JZ (Česko. Atomový zákon, 2016).

Dle bezpečnostního návodu JB-1.7 Státního úřadu pro jadernou bezpečnost se IU vztahují k různým provozním režimům jaderné elektrárny (dále jen „JE“), zejména k provozu na výkon, odstavení reaktoru, skladování paliva, zpracování a skladování radioaktivních odpadů a manipulace s jaderným palivem (Bezpečnostní návody SÚJB, 2010).

Při interních IU dochází k selhání systému vlastní poruchou, nebo k této poruše může dojít v důsledku chybné lidské činnosti. Může se jednat například o prasknutí potrubí, falešné zapůsobení signálů, selhání komponent a systémů. Externí IU jsou důsledkem vnějších vlivů. Mezi tyto události jsou řazeny vnější požáry, záplavy, letící předměty, člověkem způsobené události v okolí JE, jako jsou výbuchy plynovodu, chemických skladů, průmyslová činnost, transport nebezpečných látek a přírodními jevy způsobené události zemětřesení, tornáda, extrémní klimatické jevy (Bezpečnostní návody SÚJB, 2010).

2.5 Radiační mimořádná událost

Radiační mimořádná událost představuje událost, která přímo vede nebo by mohla vést k překročení limitů ozáření, a došlo by tak k odchýlení od žádoucího stavu. U této události je nutné zajistit opatření, která by zabránila překročení limitu ozáření nebo zhoršování situace z pohledu zajištění radiační ochrany. RMU je dělena do tří stupňů. Prvním z nich je situace, kterou lze zvládnout silami a prostředky obsluhy a pracovníků na směně, kdy došlo ke vzniku RMU. Druhým stupněm je radiační nehoda RMU. Tato událost je nezvládnutelná silami a prostředky obsluhy nebo pracovníků na aktuální směně. Jedná se o situaci, kde RMU při činnosti pracovníků vznikla nebo vzniká v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje a nevyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo (Česko. Atomový zákon, 2016).

Nejhorším scénářem je radiační havárie RMU. Situace není možné zvládnout silami a prostředky obsluhy a pracovníků na aktuální směně. Oproti radiační nehodě RMU se jedná o situaci, kde RMU při činnosti pracovníků vznikla nebo vzniká v důsledku nálezu, zneužití nebo ztráty radionuklidového zdroje a vyžaduje zavedení neodkladných ochranných opatření pro obyvatelstvo (Česko. Atomový zákon, 2016).

Frekvence výskytu poškození paliva v AZ

Core Damage Frequency (*dále jen „CDF“*) je frekvence poškození aktivní zóny (*dále jen „AZ“*) reaktoru. Lze ji vyjádřit jako počet událostí za rok (IAEA TECDOC SERIES, 2016).

Frekvence výskytu velkého časného úniku RA látek z kontejnmentu JE

Large Early Release Frequency (*dále jen „LERF“*) je frekvencí velkých časných úniků. Vyjadřuje četnost velkého a rychlého úniku RA látek do okolí (IAEA TECDOC SERIES, 2016).

Lidská chyba

„Lidská chyba je charakterizovaná nežádoucím nebo chybným stavem systému, jehož součástí je interakce člověk-stroj. Tato interakce přináší potřebu mentální nebo fyzické aktivity jedince a vede k situaci, kdy nejsou zcela nebo zčásti splněny požadavky systému (nebo jeho části)“ (Sträter, 2005).

V této definici je člověk jako součást systému, a tak vždy nese určitý podíl na příčině nežádoucího nebo chybného stavu systému.

3 PSA

Cílem analýzy rizik je poskytnout metodický přístup k identifikaci havarijních scénářů, které navazují na široké spektrum iniciačních událostí. Smyslem provádění PSA je ukázat všechny významné přispěvatele k riziku JZ a ohodnotit tak i celkový projekt (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti PSA je analytickou metodou hodnocení bezpečnosti JE. Zmíněné by mělo umožnit modelování všech havarijních sekvencí, které mohou vést k poškození paliva v AZ. Tomu předchází vznik IU, stanovení všech kombinací selhání bezpečnostních systému či lidského faktoru a také účinky na obyvatelstvo. (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

PSA dokáže jako jediná číselně vyjádřit nejistoty a neurčitosti obsažené v číselných odhadech rizika plynoucích z provozu JZ i průmyslových zařízení.

PSA nám tedy dokáže odpovědět na tyto otázky (Mladý, 2000):

CO MŮŽE SELHAT? → RIZIKOVÉ SCÉNÁŘE

JAK JE TO PRAVDĚPODOBNÉ? → PRAVDĚPODOBNOST/ČETNOST

CO JE DŮSLEDKEM? → NÁSLEDKY

PSA umožňuje popis a model skutečného aktuálního stavu zvoleného JZ. Aktuálnost PSA je řešená v programu „Living PSA“, který odpovídá za aktualizaci stavu JZ, v návaznosti např. na některé změny v projektu, aktualizaci vnitřních předpisů či návodů pro zvládání těžkých havárií.

3.1 Program „Living PSA“

Během provozu JE jsou často prováděny úpravy projektu bezpečnostních systémů nebo způsobu provozu zařízení. Tyto úpravy mohou ovlivnit úroveň rizika. Během provozu zařízení se získávají další statistická data o frekvencích IU a pravděpodobnostech selhání komponentů. Nové informace a sofistikované metody mohou měnit některé předpoklady analýzy a odhady rizika, které PSA poskytuje. PSA by mělo být průběžně aktualizováno, aby zůstalo relevantní pro rozhodovací proces. PSA, které je pravidelně aktualizováno je označováno jako „Living PSA“. Při aktualizaci by měly být zohledněny změny projektu a provozu zařízení, nové technické informace a specifická data získaná z provozu elektrárny (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Data by měla být sbírána po celou dobu životnosti zařízení pro kontrolu a aktualizaci analýzy. Tato data by měla zahrnovat provozní zkušenosti, jako jsou IU, selhání komponentů a výkonnost člověka. Výsledky analýzy by měly být pravidelně přehodnocovány za základě nových dat (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Rozvoj „Living PSA“ by měl být podporován, aby usnadnil rozhodovací proces během běžného provozu zařízení. „Living PSA“. Může významně přispět k vyhodnocení změn v riziku spojených s úpravami zařízení (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

PSA by mělo být udržováno během celého životního cyklu JE, a také proto, aby byly zajištěny správné podklady i z praxe. Stav PSA by měl být kontrolován v pravidelných intervalech, a to s cílem ověřit, zda splňuje požadované cíle. Pokud by se objevily změny, které mají vliv na model PSA či jeho výsledky, je nutné provést aktualizaci, a to nejpozději do jednoho roku. Pokud tak nenastane, je doporučeno provést revizi PSA po pěti letech (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

3.2 Popis provozu jaderné elektrárny

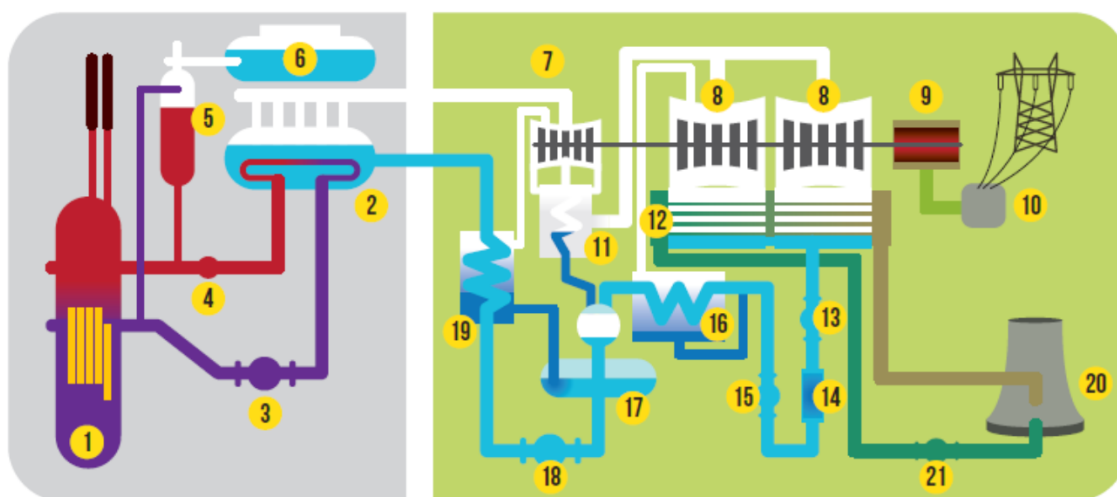
Princip jaderné elektrárny viz Obrázek 1, je založen na přeměně tepelné energie, získané štěpením jaderného paliva v reaktoru, na energii mechanickou vznikající roztočením turbín, a následně na energii elektrickou. Proces přeměny energie od vzniku tepla až po výrobu elektrické energie se uskutečňuje ve třech navzájem oddělených okruzích (Havarijní příručka, 2025).

Prvním z okruhů je primární okruh (*dále jen „I.O.“*), také nazývaný jaderný. Hlavním kolem I.O. je vytvoření tepelné energie v reaktoru a její odvedení do parogenerátoru, kde dochází k předání energie do sekundárního okruhu. I.O. je tvořen reaktorem, ve kterém je generována tepelná energie, ta je předána do vody a pomocí hlavních cirkulačních čerpadel (*dále jen „HCČ“*) je přepravována do parogenerátoru dále jen (*dále jen „PG“*), které hermeticky oddělují primární a sekundární okruh (Havarijní příručka, 2025).

Druhým okruhem je okruh sekundární, nazývaný jako nejaderný. Hlavním účelem sekundárního okruhu je přeměna vody na páru, využívanou pro roztáčení turbíny, která roztáčí elektrický generátor zajišťující výrobu elektrické energie. Sekundární okruh je tvořen parogenerátorem, ve kterém dochází k přeměně vody na páru. Ta je pomocí parovodu rozvedená k jednotlivým turbínám a zajišťuje jejich roztočení. Rotační pohyb je využit v elektrickém generátoru k výrobě elektrické energie. Pára, která předala svoji energii

v turbíně je následně svedená do kondenzátorů páry. Sekundární okruh je velmi rozsáhlý a ke správnému provozu je zapotřebí mnoha pomocných okruhů (Havarijní příručka, 2025).

Třetím okruhem je okruh chladicí vody, nazývaný jako terciální. Účelem tohoto okruhu je zajistit odvedení zbytkového tepla z páry, která vykonala práci při roztáčení turbín. K odvodu zbytkového tepla je využívána voda, která odebere teplo z páry v kondenzátorech a následně je ochlazena v chladicích věžích (Havarijní příručka, 2025).



Obrázek 1 Schéma JE Dukovany

(Zdroj: Havarijní příručka, 2025)

Poznámka: Primární okruh: 1. reaktor, 2. parogenerátor, 3. hlavní cirkulační čerpadlo, 4. hlavní uzavírací armatury, 5. kompenzátor objemu, 6. barbotážní nádrž.

Sekundární okruh: 7. vysokotlaký díl turbíny, 8. nízkotlaký díl turbíny, 9. generátor, 10. transformátor, 11. separátor přihřívav, 12. kondenzátor, 13. kondenzátní čerpadlo 1. stupně, 14. bloková úpravna vody, 15. kondenzátní čerpadlo 2. stupně, 16. ohřívač nízkotlaké regenerace, 17. napájecí nádrž, 18. napájecí čerpadlo, 19. ohřívač vysokotlaké regenerace.

Terciální okruh: 20. chladicí věž, 21. čerpadla cirkulační chladicí vody.

3.3 Cíle a účel PSA

Hlavní výhodou PSA analýzy je získat znalostí z bezpečnosti provozu JE, od první fáze jejího projektování, způsobu jejího provozu až po účinky na okolní prostředí, včetně další identifikace nejvýznamnějších příspěvků k riziku. PSA dokáže srovnávat alternativní řešení navrhovaná pro snížení rizika (Mladý, 2000):

Mezi tři základní cíle patří:

- 1. analyzovat úroveň bezpečnosti jaderného zařízení a identifikovat nevhodnější oblasti pro její zlepšení (snížení rizika),**
- 2. analyzovat úroveň bezpečnosti a porovnat ji s explicitními či implicitními kritérii,**
- 3. analyzovat úroveň bezpečnosti s cílem podpory provozu jaderného zařízení.**

První obecný cíl se zabývá rozšířením znalostí a lepšího pochopení problémů, které ovlivňují bezpečnost JZ. Díky tomu je možné identifikovat bezpečnostní problémy JZ a určit vhodné oblasti ke zlepšení stávajícího stavu.

Druhý obecný cíl porovnává už hodnocené bezpečnostní úrovně bloku s požadovanými kritérii. Tato kritéria mohou být definována explicitně (pevně stanovená) nebo implicitně, a to tak že se provádí porovnání již s existujícími „bezpečnostně vyhovujícími“ typy zařízení, nebo návrhy.

Třetí obecný cíl se zaměřuje poskytováním informací, které by mohly být užitečné pro podporu provozu JZ, modelu a kritérii jak pro monitorování provozní spolehlivosti zařízení, tak pro poznatky sloužící k optimalizaci řízení havarijních událostí (Mladý, 2000).

PSA by mělo být provedeno pro všechna JZ, kde je součástí jaderný reaktor (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010):

- **PSA úroveň 1** - hodnotí pravděpodobnost nebo četnost poškození paliva v AZ reaktoru nebo v bazénu vyhořelého paliva. Jedná se o hodnocení kombinace iniciačních událostí a poruch zařízení, nebo lidských chyb v JE. Za nežádoucí stav JE a následek různých havarijních scénářů se považuje převážně tavení anebo vážné poškození paliva. Úroveň 1 PSA poskytuje náhledy na silné a slabé stránky systému a procedur souvisejících s bezpečností, které jsou v současnosti zavedeny nebo plánovány, aby bylo zabráněno poškození AZ.
- **PSA úroveň 2** - v rámci analýzy, je hodnocen chronologicky průběh sekvencí poškození AZ identifikovaných v analýze úrovně 1 PSA, včetně kvantitativního posouzení jevů vyplývajících ze závažného poškození jaderného paliva. Úroveň 2 PSA identifikuje způsoby, jakými mohou být spojeny úniky radioaktivního materiálu z paliva s úniky do ŽP. Dále jsou odhadovány frekvence, velikosti a další relevantní charakteristiky úniku radioaktivního materiálu do prostředí. Tato analýzy

poskytuje dodatečné náhledy na relativní důležitost opatření pro prevenci nehod a zmírnění jejich následků a fyzických bariér pro uvolnění radioaktivního materiálu do prostředí např. kontejnmentu.

- **PSA úroveň 3** - jsou odhadovány veřejné zdravotní a další společenské důsledky, jako je kontaminace půdy nebo potravin z nehodových sekvencí, které vedou k úniku radioaktivity do ŽP. Tím je dokončeno celkové posouzení rizik celého JZ.

3.4 Principy konstrukce modelu PSA 1. úrovně pro JE

Prvním krokem by mělo být vymezení přístupu a metodologie pro PSA 1. úrovně. Tento přístup by měl být schopen modelovat poruchové sekvence vycházející z IU a identifikovat kombinace selhání bezpečnostních a podpůrných systémů a lidských chyb, které by mohly vést k poškození AZ. Obvykle je používána kombinace stromů událostí a stromu poruchových stavů, přičemž složitost je určována preferencemi týmů a vlastnostmi softwaru (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Jako běžně praktikovaný přístup je používána kombinace událostních a poruchových stromů, známá jako přístup propojení stromu poruchových stavů. Stromy událostí zachycují charakteristiky nehod začínajících IU, zatímco stromy poruchových stavů jsou využívány k modelování selhání bezpečnostních a podpůrných systémů (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Analýza PSA 1 úrovně se dá rozdělit na pět větších úloh a ty jsou následující:

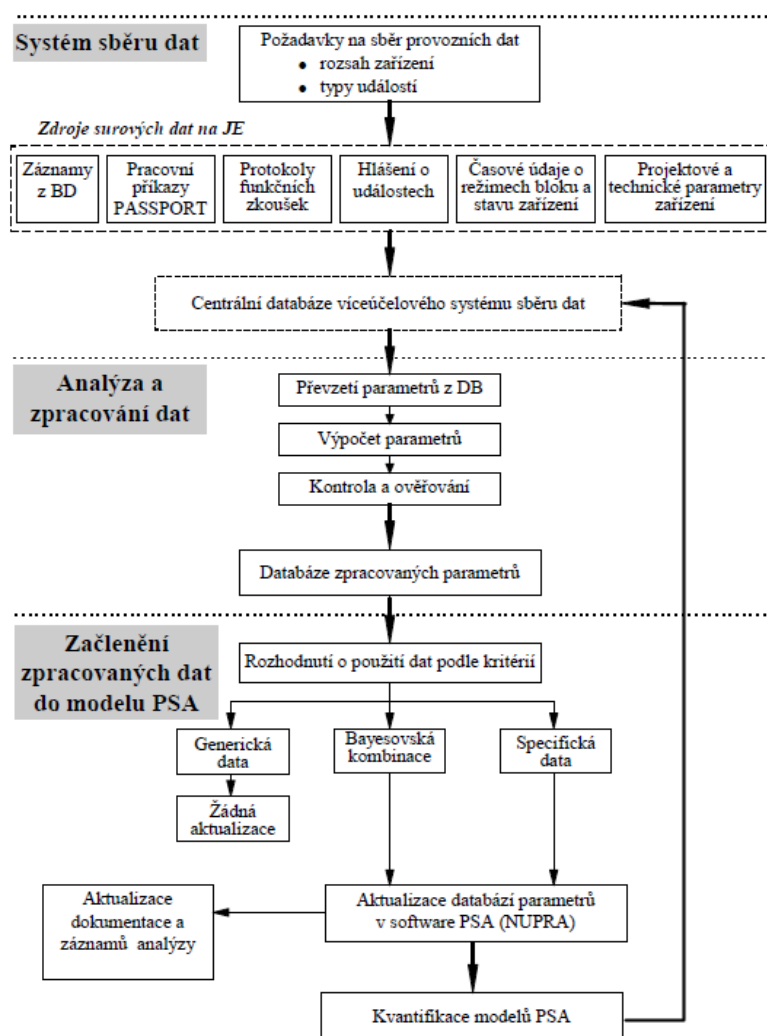
1. Identifikace IU havárií
2. Modelování možných havarijních sekvencí
3. Modelování systémů
4. Analýza dat a parametrických modelů
5. Kvantifikace havarijních sekvencí

Jako poslední krok, který není zahrnut v těchto pěti úkolech, musí být provedeny dokumentace, prezentace a implementace výsledků analýz (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Velkou předností PSA je, že je poskytován explicitní rámec pro analýzu neurčitosti při hodnocení rizika. V PSA je důležité, aby byla provedena identifikaci zdrojů neurčitosti a dále, aby bylo těmto neurčitostem porozuměno, jaký mají vliv právě na model PSA a jeho

výsledky a to: identifikace IU havárií, analýza možných IU (výběr a seskupení), analýza možných havarijních sekvencí, analýza systémů, analýza závislostí, analýza poruch se společnou příčinou, analýza selhání lidského činitele, analýza dat a parametrických modelů, kvantifikace PSA modelu, citlivostní studie a analýza důležitosti a neurčitosti (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Schéma procesu konstrukce modelu PSA je znázorněno viz Obrázek 2.



Obrázek 2 Schéma procesů sběru, analýzy, a použití dat v PSA

(zdroj: Mladý, 2000)

Analýza možných iniciačních událostí

Pro určení IU je doporučován dle (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010) systematický postup, jenž je řešen v PSA 1. úrovni:

- a) analytické metody, jako jsou studie nebezpečí a provozuschopnosti nebo analýzy způsobů poruch a jejich následků, jsou součástí všech bezpečnostních systémů, aby byly určeny, zda jejich poruchy mohou vést k iniciačním událostem,
- b) deduktivní analýzy, využívány k identifikaci základních poruch nebo jejich kombinací, ty mohou způsobit narušení běžného provozu a vést k IU,
- c) seznamy IU pro PSA 1. úrovně podobných elektráren jsou porovnávány s existujícími bezpečnostními normami,
- d) IU jsou definovány na základě analýzy provozních zkušeností,
- e) Deterministické analýzy projektových nehod a analýzy přesahující rámec těchto nehod jsou revidovány v bezpečnostních zprávách.

Dle (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018) musí být vytvořen seznam IU, které mohou potenciálně vést k poškození paliva v aktivní zóně, a to jak přímo, nebo v důsledku selhání zařízení, které zajišťuje jednu nebo více bezpečnostních funkcí, nebo také selhání lidského faktoru. Vytváření seznamu je systematický proces, při kterém se využívají: již sestavené seznamy IU, z předchozích analýz PSA, IU, které již byly analyzovány v Předprovozní bezpečnostní zprávě, analýza informací o vyskytujících se IU na dané JE, nebo na dalších JE, které jsou založené na stejném či podobném projektu, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis – Analýza způsobů a následků poruch, dále jen „FMEA“*) nebo HAZOP (*Hazard and Operability Study – Analýzy rizik a provozuschopnosti, dále jen „HAZOP“*), nebo další podobné analýzy, deduktivní metodou, kde se dají vysledovat selhání, která mohou vést ke ztrátě bezpečnostní funkce.

Analýza možných havarijních sekvencí

Mezi další významné kroky patří stanovení odezvy bloku na každou vybranou skupinu IU. Bezpečnostní funkce, které musí být zajištěny, závisí na typu reaktoru. Odezva bloku se poté modeluje stromem událostí a rozvojem jednotlivých havarijních sekvencí, kde je bráno v úvahu úspěšné zpracování zařízení, ale také i jeho selhání. Koncové stavy sekvencí mohou být buď úspěšné vychlazení reaktoru do bezpečného stavu, nebo poškození paliva (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

PSA by měla obsahovat všechny stavy, které mohou v daném typu JE nastat. Tyto typy událostí zahrnují: zvýšený odvod tepla z reaktoru (například roztržení parovodů), snížení odvod tepla z reaktoru (*například ztráta dodávky napájecí vody do parogenerátoru, dále jen*

„PG“), omezení průtoků primárního chladiva (například HCČ), nežádoucí změny reaktivity (například neřízené vysouvání řídicí tyče, vystřelení řídicí tyče, neřízené snižování koncentrace kyseliny borité v chladivu I.O.), zvyšování objemu chladiva v primárním okruhu, veškeré provozní události, které mohou způsobit havarijní sekvenci, rychlé odstavení reaktoru, ztráta napájení z vnější sítě a ztráta podpůrných systémů (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Analýza systémů

V PSA je dalším krokem modelování selhání zařízení, obvykle je tento krok prováděn pomocí stromů poruchových stavů. Stromy poruchových stavů jsou rozvíjeny pomocí logických hradel až po úroveň primárních událostí, např. selhání komponent (čerpadel, armatur, rozvaděčů atd.) a to z důvodů plánované nebo neplánované údržby nebo testů, poruch tzv. společnou příčinou, selhání provozního personálu (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Analýza závislosti

Zpracování analýzy závislosti musí být věnována zvýšená pozornost, protože patří mezi jedny z hlavních příspěvovatelů k celkovému riziku provozu bloku. Dle (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010) existují čtyři typy závislostí, se kterými se můžeme setkat:

1. **funkční závislosti**, jako jsou sdílení určitých komponent, společných spouštěcích systémů, společných zařízení zabezpečujících izolaci nebo společných podpůrných systémů (napájení, systém kontroly řízení, ventilace, chlazení atd.),
2. **fyzikální závislosti** způsobené vznikem IU, které mohou vést k selhání zařízení bezpečnostních systémů, mohou nastat tlakové rázy v potrubí, vlivem tryskajícího media nebo vlivem okolního prostředí,
3. **závislosti způsobené lidskými zásahy** ve spojení s chybami provozního personálu, kteří mohou přispět k IU, nebo jí způsobit například při opravách, plánované údržbě atd.,
4. **závislosti vzniklé selháním komponent v důsledku nedostatků v projektu**, chyb při výrobě, montáži, a v důsledku špatného provozování.

Analýza událostí se společnou příčinou

Události, které jsou spojeny s příčinou jsou analyzovány jako závislé poruchy, u nichž je možné, že dojde k selhání více komponent současně. V (IAEA SAFETY STANDARDS,

2010) je řečeno, že tyto poruchy jsou způsobeny nedostatky v projektu, při výrobě a montáži, nebo nesprávným provozováním. Měly by být identifikovány a začleněny do modelu PSA 1. úrovně pro poruchy se společnou příčinou.

Analýza selhání lidského činitele

Dle (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010) by pravděpodobnosti lidských chyb měly být odvozeny specificky pro jednotlivé scénáře a měly by odrážet faktory, které mohou ovlivnit výkonnost operátorů, včetně úrovně stresu, času dostupného pro provedení úkolu, dostupnosti provozních postupů, úrovně poskytnutého školení, okolních podmínek atd. Tyto faktory jsou často nazývané jako faktory ovlivňující výkon (*Performance Shaping Factors*, dále jen „PSF“), a měly by být identifikovány podobnou analýzou. Metoda použitá pro odvození pravděpodobnosti lidských chyb by měla být v souladu se standardními metodami používanými v analýzách úrovně 1 PSA. Kvantitativní popisy by měly být vypracovány pro každou z klíčových interakcí člověka. Tyto popisy by měly specifikovat všechny významné aspekty, spojené s činností personálu zařízení a obvykle by měly zahrnovat: časování akce, relevantní provozní postupy zařízení, prostředí ve kterém je akce prováděná, provozní struktury týmu, účinek předchozích akcí na aktuální činnost, informace dostupné operátorům, školení, které absolvovali, apod.

Modelování specifických interakcí člověka by mělo být ověřeno pomocí vhodných technik. Pozorování výkonnosti operátorů a interakcí člověka v simulačních cvičeních poskytne užitečné informace na podporu analýzy lidské spolehlivosti (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Je uznáváno, že pravděpodobnosti lidských chyb budou také ovlivněny kulturou bezpečnosti v provozu. V současnosti však neexistuje dohodnutý způsob, jak toto zohlednit při hodnocení lidských chyb (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

V PSA modelu je důležité hned na začátku identifikovat selhání provozního personálu, která mohou vést k selhání úspěšné odezvy bloku na IU a tato selhání zahrnout do modelu. Právě lidská selhání bývají velkým přispěvovatelem k celkovému riziku. (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Analýza dat a parametrických modelů

Nejvhodnější jsou data, která jsou získána z provozu analyzované JE. Pokud není historie provozu dostatečně bohatá pro tvorbu vlastních poruchových dat specifických pro danou JE, používají se tzv. generická data, která jsou výsledkem sběru událostí na velkém počtu JE za

relativně dlouhé období. Při použití generických dat se preferují data z JE nebo podobného typu, jako je analyzovaná JE (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Kvantifikace PSA modelu

Kvantifikací modelu PSA se rozumí výpočet CDF pro danou oblast provozu (plný výkon, odstávkové stavy, poškození paliva mimo AZ). Výpočet probíhá přes stromy událostí, kam se do větví se selháním jednotlivých prvků odezvy na IU (selhání havarijních systémů, lidské chyby) dosazují řešení vrcholových hradel příslušných stromů poruch. Součet frekvencí koncových stavů všech příslušných stromů událostí s příznakem Core Damage (*dále jen „CD“*) je pak vlastní CDF (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Vlastní řešení CDF se skládá z velkého počtu (až desítky tisíc) tzv. minimálních kritických řezů (*dále jen „MKŘ“*). Každý MKŘ popisuje vývoj jednoho konkrétního havarijního scénáře od IU přes poruchy nebo nedostupnost zasahujících zařízení nebo lidské chyby až ke konečnému poškození paliva (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Citlivostní studie a analýza důležitosti a neurčitosti

V každé analýze PSA se objevují potenciálně významné nejistoty několika typů: nejistoty vyplývající z neúplnosti modelu PSA nebo jeho částí (nelze zahrnout úplně všechny havarijní scénáře, které by se mohly vyskytnout), nejistoty související s použitými modely, které byly v PSA přijaty a nejistoty související s parametry použitými v PSA (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Při aplikaci PSA musí být všechny nejistoty zváženy a posouzen jejich vliv na získané výsledky. U Citlivostních studií je cílem stanovit citlivost výsledků PSA 1. úrovně na použité předpoklady a hodnoty odvozené od spolehlivostních parametrů, s prioritním zaměřením na ty předpoklady a data, které mají vysokou mírou neurčitosti a současně mohou mít vliv na výsledky PSA (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Analýza důležitosti má za účel zjistit důležitost havarijních scénářů, IU, funkcí systémů, způsobu poruch systému a základní události, tj. poruch zařízení, lidských omylů atd. (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Dá se rozdělit do dvou skupin dle (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018):

- kvalitativní důležitosti,
- kvantitativní důležitosti.

Mezi kvalitativní důležitosti patří důležité příspěvky k četnosti poškození AZ (CDF), které vyplývají z logické struktury modelu PSA a způsobu kvantifikace. Kvantitativní důležitosti a jejich příspěvky k četnosti poškození AZ jsou odvozené od kvantitativních výsledků PSA. Používají se odhadované pravděpodobnosti, jako například: poruchy systémů, četnost havarijních scénářů anebo výsledná hodnota CDF (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

V analýzách PSA 1. úrovně dle (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010) jsou využívány tyto ukazatele:

- ukazatel „FUSSEL-VESELY“ – je definován jako relativní příspěvek dané události k celkové četnosti nežádoucích událostí AZ. Ukazatel F-V pro danou událost (i) je vypočten jako poměr součtu frekvencí MKŘ, v nichž se vyskytuje událost (i), a celkové CDF, tedy:

$$FV = \frac{Fi}{F}, \quad (1)$$

kde F_i je součet frekvencí (riziko) MKŘ, které obsahují událost i, F je součet frekvencí všech MKŘ (celkové riziko). Rozsah procentuální hodnoty FV je od 0 do 1 (0 % až 100 %).

- ukazatel snížení rizika (Risk Reduction Worth) – udává snížení hodnoty četnosti poškození AZ, pokud by zařízení bylo úplně spolehlivé,
- ukazatel vzrůstu rizika (Risk Achievement Worth) – udává zvýšení hodnoty četnosti poškození AZ, pokud by zařízení selhalo s úplnou jistotou,
- ukazatel Birnbauma – ukazatel rychlosti změny četnosti poškození AZ v závislosti na změně pravděpodobnosti výskytu události.

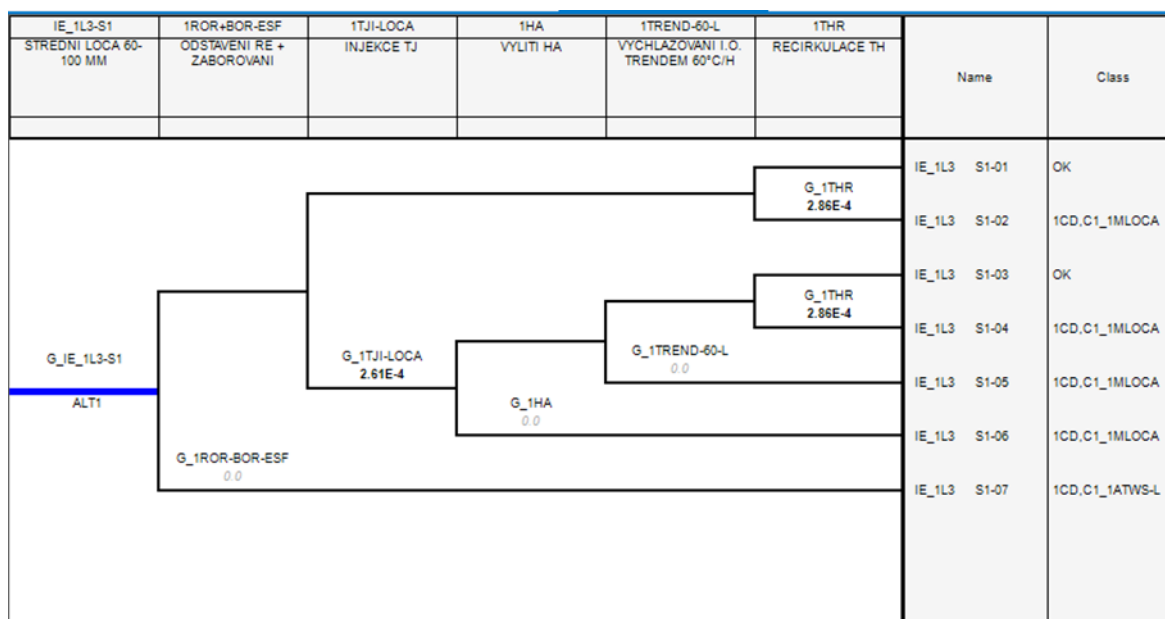
Ukazatele důležitosti poskytují také poznatky ve formě priorit, jak co nejvíce snížit riziko, dále také důležitost nápravných opatření a v neposlední řadě zlepšování projektového řešení nebo způsobu provozování JE (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Stromy událostí

Technika stromů událostí (*Event Tree Analysis*, dále jen „ETA“) se v literatuře uvádí jako vhodná metoda pro posuzování spolehlivosti, ale také se využívá pro studie analýzy rizika a bezpečnosti. Analýza stromů událostí je induktivní postup modelování možných výstupů, které by mohly vyplývat z dané IU. Je to metoda zobrazení informací o možných průbězích

havarijních sekvencí pro danou IU. Pomocí stromů události jsou identifikovány sekvence událostí, které mohou nastat, a posuzuje se, jak různé faktory (včetně lidského faktoru) ovlivňují průběh a výsledky těchto scénářů (Česká společnost pro jakost, 2015).

Příklad stromu událostí pro střední únik 80-100 mm z primárního potrubí viz Obrázek 3.



Obrázek 3 Strom událostí pro střední únik

(zdroj: EDU, 2024)

Stromy poruchových stavů

Metoda stromů poruchových stavů (*Fault Tree Analysis*, dále jen „FTA“) je deduktivní metodou. FTA má podobu logického diagramu, který znázorňuje logické vztahy mezi potenciální vrcholovou událostí (kořen stromu) a příčinami vzniku tohoto jevu. FTA se zabývá identifikací a analýzou podmínek a faktorů, které způsobují nebo mohou způsobit definovanou nežádoucí událost, či mohou přispět k jejímu výskytu. Kombinace analýz ETA a FTA je někdy nazývaná také jako analýza vztahu příčina-následek (Česká společnost pro jakost, 2015).

Příklad stromu poruch viz Obrázek 4.

1	Ověř odstavení reaktoru: • Proveden RTS - svítí • Všechny HRK - dolní poloha • Neutronový výkon - klesá	Odstav reaktor. <u>Pokud nelze</u> reaktor odstavit žádným tlačítkem z BD nebo ND, <u>pak</u> zkus vypnout vypínače RTS pomocí přepínačů Test 1,2,3 RTS LoPA(B) na panelu B6.
2	Ověř odstavení obou turbín: a. Všechny RZV obou turbín - uzavřeny b. Zajisti bezpečný doběh TG a proved' činnosti dle PR-002	a. Odstav obě turbíny. <u>Pokud nelze</u> uzavřít RZV, <u>pak</u> uzavři přehradní armatury k TG. <u>Pokud</u> TG stále <u>není</u> odstavena, <u>pak</u> zavři RČA na parovodech.
3	Havarijní doplňování bóru do I.O: a. Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení c_b v I.O b. Tlak v KO < 14,4 MPa c. Tlak v KO < 13,81 MPa d. Průtok aspoň jednoho TJ čerpadla do I.O > 35 m³/h	b. Zabezpeč otevření PVKO. <u>Až bude</u> tlak v KO < 13,55 MPa, <u>pak</u> zkus zavřít PVKO. c. Zabezpeč otevření OVKO. <u>Až bude</u> tlak v I.O < 13,28 MPa, <u>pak</u> zavři OVKO. d. <u>Pokud nelze</u> zabezpečit průtok aspoň jednoho TJ čerpadla do I.O > 35 m³/h, <u>pak</u> nastav trasy systémů TK/TB a zahaj dávkování roztoku 40 g H₃BO₃ systémem doplňování maximálním průtokem. <u>Pokud nelze</u>, <u>pak</u> proved' následující: 1. Odstav všechna HCC. 2. Uzavři přívod ucpávkové vody na

Obrázek 5 Ukázka havarijního předpisu

(Zdroj: Havarijní postup FR-S.1, 2022)

4 LIDSKÝ FAKTOR

Lidský faktor hraje klíčovou roli ve všech aspektech bezpečného provozu složitých technologií. Při hodnocení bezpečnosti provozu jsou zkoumány přístupy k lidskému faktoru, jeho propojení s provozní praxí a kulturou bezpečnosti, aby byl minimalizován jeho negativní dopad na rizika. Hodnocení je zaměřeno na široké spektrum témat spojených s projevy lidského faktoru, jako jsou například: zásadní činnosti obsluhy, které mají přímý dopad na bezpečnost provozu a pro které je třeba vytvořit vhodné podmínky, faktory ovlivňující správné a spolehlivé provedení plánované i neplánované údržby, a to jak interní obsluhou, tak externími dodavateli, řízení kompetencí a podmínek pro výkon všech provozních funkcí, včetně výběru a školení obsluhy, ergonomické aspekty interakce mezi člověkem a strojem, kvalitu a srozumitelnost procedurálních postupů (Česká společnost pro jakost, 2013).

Teorie lidských faktorů, která je aplikovaná na řídicí místnosti se projevuje především v těchto oblastech: ergonomický návrh řídicích místností, tvorba pracovních a bezpečnostních postupů, simulace rizikových úkolů a mimořádných situací, dále trénink pracovníků a předpověď lidského výkonu v řídicí místnosti (Česká společnost pro jakost, 2013).

Dále existuje řada specifických témat spojených s lidským faktorem, která se soustředí na vytváření podmínek pro kvalitní a bezpečný výkon pracovníků. Mezi klíčové faktory patří školení a rozvoj zaměstnanců, efektivní rozdělení funkcí a odpovědnosti nebo tvorba uživatelsky přívětivého prostředí pro interakci obsluhy se zařízením, a to jak v běžném, tak v nouzovém provozu (Procházková, 2020).

Při krizových situacích je nezbytné, aby lidé byli samostatní a dostali tak sebe i ostatní na bezpečné místo. Lidská samostatnost se zvyšuje, když znají obsah varovacích instrukcí a vědí, jak se chovat při krizových situacích. Efektivitu varovacích instrukcí ovlivňuje mnoho faktorů, jako jsou například: osobní charakteristiky, způsob zpracování informace člověkem, chování člověka, sociální vlivy, nepřímé informace a mnoho dalšího. Ke zranitelnosti systémů přispívají i sociální aspekty (Procházková, 2006).

Analýzy provozní historie složitých technologií ukazují na důležitost zpětné vazby a trendů posilujících bezpečnost, zejména v období zvýšené nestability nebo změn v provozu. Problémy spojené s lidským faktorem jsou postupně identifikovány a řešeny s cílem minimalizovat jejich opakování. Bezprostřední opatření často zahrnují zvýšení

kvality školení, zlepšení postupů nebo optimalizaci ergonomických podmínek (Procházková, 2020).

Mezi klíčové faktory, které mohou negativně ovlivnit stabilitu procesu, jsou zařazeny například dlouhodobá pracovní zátěž, využívání externích organizací pro údržbu nebo časté změny v technologii a organizaci práce. Tyto faktory mohou přispět ke snížení bezpečnosti a spolehlivosti provozu (Procházková, 2020).

Lidský faktor významně ovlivňuje všechny aspekty bezpečnosti JE. Je tedy důležitým prvkem kultury bezpečnosti dané elektrárny. Pomocí revizí by měl být přezkoumán stav lidského faktoru, aby mohlo být určeno, zda jsou přijaty dobré předpisy a nepřispívají tam další neviditelná rizika. Revize by měla zahrnovat personál, výcvik, otázky týkající se personálu, styl postupů a vztah člověka a stroje. Měla by být provedená s asistencí příslušných kvalifikovaných specialistů. Vzhledem k obtížnostem spojeným s prováděním objektivní revize toho, co je podstatné ve vlastním lidském chování, se může v organizaci provozovatele rozhodnout, zda nechat provádění specifických částí na externí konzultanty nebo experty z jaderného provozu (Bezpečnostní návody SÚJB, 2020).

Způsob pravděpodobnostního hodnocení některých aspektů týkajících se člověka s technologií může být intuitivní (např. jediným expertním odhadem) nebo metodický. Lidský faktor hraje klíčovou roli v bezpečnosti jaderných elektráren. Přestože jsou moderní jaderná zařízení navržena s vysokým stupněm bezpečnostních opatření a automatizací, lidská činnost stále významně ovlivňuje jejich provoz. Analýza lidského faktoru v PSA umožňuje kvantifikovat pravděpodobnost lidské chyby (*Human Error Probability*, dále jen „*HEP*“) a identifikovat kritická místa v provozu JE (Bezpečnostní návody SÚJB, 2020).

4.1 Spolehlivost lidského činitele

Vliv lidského faktoru je neoddiskutovatelnou součástí operací řízení a údržby všech typů průmyslových aktivit. Lidé jsou schopni zajistit bezpečnost procesů přijmutím předběžných opatření a při porušení normálních nebo požadovaných dějů mohou jednat reaktivně. Dokáží přijmou opatření k nápravě dějů nebo i k zmírnění následků nežádoucích jevů (Česká společnost pro jakost, 2011).

Ovšem samotný člověk je také vlastním zdrojem chyb a často se jedná právě o lidskou prvotní příčinu, nebo také svými zásahy mohou urychlit průběh události a zhoršit tak možné negativní následky. Proto je nutné neustále posuzovat riziko spojené s lidským činitelem,

jeho chybami a hledat cesty k redukci zranitelnosti systémů a následků lidských chyb. A právě toto jsou hlavní cíle analýzy spolehlivosti lidského činitele (*Human Reliability Analysis, dále jen „HRA“*), (Česká společnost pro jakost, 2011).

Struktura a náplň dokumentace, která má vyhovět tomuto cíli, by měla vyhovovat reprezentativnímu souboru požadavků, respektovanému v PSA komunitě i mezi uživateli výsledků, závěrů a doporučení PSA studií. Takový soubor požadavků lze pro HRA (i další oblasti PSA) odvodit například ze souboru doporučení IAEA.

4.1.1 Faktory ovlivňující (lidský) výkon

Jsou označovány také zkratkou PSF, jak je blíže popsáno v kapitole 3.4. Jsou to charakteristiky vnějšího prostředí, úkolů a lidí, které vyplývají z individuální výkonnosti. Jsou děleny na vnější a vnitřní prostředí. Vnější vlivy spolu s individualitou jedince mohou být zařazeny do různých tříd, tak aby posuzování spolehlivosti lidského činitele zahrnovalo škálu nejrozličnějších vlivů. Tyto faktory mohou zvýšit nebo snížit pravděpodobnost chyb. Mezi běžné PSF patří například dostupný čas, stres, zkušenosti, složitost úkolu, ergonomie, pracovní postupy, způsobilost k výkonu a pracovní prostředí (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

4.1.2 Metriky chybovosti lidského činitele

Pravděpodobnost lidské chyby (HEP)

Lze vypočítat dle vzorce:

$$HEP = \frac{POČET\ NASTALÝCH\ CHYB}{POČET\ PŘÍLEŽITOSTI\ K\ CHYBĚ} \quad (2)$$

Odhad pravděpodobnosti úspěšného provedení dané úlohy člověkem (*Human success probability, dále jen „HSP“*) se dá odvodit:

$$HSP = 1 - HEP \quad (3)$$

4.1.3 Klasifikace lidských chyb

Lidské chyby (*Human Error, dále jen „HE“*) vznikají působením několika faktorů. Mezi tyto faktory mohou být zahrnuty emocionální stavy, obtížnost prováděného úkolu, podmínky při práci, různé rušivé elementy atd. Musí být sledovány následky a podmínky, jaké mohou nastat vlivem lidské chyby, a je nutné je ošetřit nebo jim předcházet.

Klasifikace chyb v provozu podle (Swaina a Guttmana, 1983):

chyby vynechání (error of omission) – chyby v důsledků nevykonání požadovaného úkolu. Důvodem může být zapomenutí nebo neuvědomění si, že má příslušný pracovník něco provést,

chyby provedení (error of commission) – zde jsou akce provedené nesprávným způsobem. Může se jednat například o nesprávné pořadí provedení, načasování, náhrady a akce, které nejsou v havarijním předpisu.

Jednotlivé chyby mohou vzniknout:

- špatným proškolením nebo jsou podány špatné pokyny,
- nedostatkem motivace nebo úmyslným porušením předpisů,
- nedostatkem fyzických nebo duševních schopností,
- nedostatkem pozornosti,
- chybným managementem,
- nedostatkem nebo nepřesností informací,
- špatnou ergonomií ovládacích prvků,
- časovým stresem,
- fyzikálními podmínkami prostředí (teplota, viditelnost, radiace, kouř apod.),
- špatnou komunikací.

Hodnocení lidského faktoru v bezpečnostních analýzách jaderných elektráren, patří mezi klíčové prvky pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti. Existují proto různé přístupy k analýze lidských chyb, které mohou být rozděleny do následujících kategorií (Mladý, 2000).

Lidské chyby jsou neodmyslitelnou součástí jakéhokoliv složitého systému. V kontextu JB se dělí na:

- chyby vnímání (percepční chyby) – nesprávná interpretace dat, přehlédnutí varování,
- chyby rozhodování – nesprávný výběr postupů v krizové situaci,
- chyby provedení (execution errors) – fyzické selhání operátora při provádění akce.

Při vytváření PSA modelu je nutné identifikovat selhání provozního personálu. Toto selhání může mít za následek selhání úspěšné odezvy bloku na uvažované IU, a proto je nezbytné je zahrnout do modelu. Proč je tato problematika tak zásadní? Protože když si uvědomíme, že právě 60-80 % příspěvku k riziku provozu může pocházet právě od selhání lidského faktoru, nikoliv od selhání technologických zařízení a systémů JE jako takových (Mladý, 2000).

4.2 Metody hodnocení lidského činitele

Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti zahrnuje lidský faktor jako jednu z klíčových hodnot při výpočtu celkového rizika havárie. Využívá k tomu různé metody hodnocení lidského činitele, dle (Review of human reliability assessment methods, 2009) jsou tyto metody následující:

- **THERP** (*Technique for Human Error Rate Prediction, dále jen „THERP“*) – metoda kvantifikace pravděpodobnosti lidských chyb na základě stromové analýzy, která obsahuje velké množství informací o vlivu vnějších podmínek a také o organizačních faktorech na práci obsluhy. Hlavní oblastí je analýza závislostí mezi akcemi obsluhy a dalšími specifickými případy. Metody, modely a odhadované pravděpodobnosti lidských chyb HEP jsou v rámci THERP představeny s cílem umožnit provádění kvantitativního nebo kvalitativního hodnocení výskytu lidských chyb v oblasti JE (Review of human reliability assessment methods, 2009).

Post – Iniciator CBDTM/THERP (*Cognitive – Based Decision Tree Model/Technique for Human Error Rate Prediction, dále jen „CBDTM/THERP“*) je navržena pro analýzu lidské spolehlivosti, zejména pokud jde o události. Zaměřuje se na kognitivní a dynamické aspekty lidského chování při posuzování pravděpodobnosti lidských chyb po nastartování kritické události (Review of human reliability assessment methods, 2009).

Klíčové prvky metody zahrnují:

Kognitivní modelování: Metoda zahrnuje analýzu kognitivních procesů, které ovlivňují rozhodování operátorů během krizových situací. Tato analýza pomáhá pochopit, jak jsou rozhodnutí ovlivněna faktory jako stres, časový tlak nebo složitost situace.

Rozhodovací stromy: Metoda využívá dynamické stromy rozhodnutí, které poskytuje modelování různých cest a výsledků lidských rozhodnutí. To zahrnuje hodnocení různých alternativních akcí a jejich potenciálních výsledků.

Predikce chyb THERP: Kombinace s metodou THERP, metodou zaměřenou na určení pravděpodobnosti chybových činů na základě analýzy typů a podmínek, za kterých jsou tyto úkoly prováděny.

Hodnocení: Metoda bere v úvahu specifické podmínky zařízení a okolnosti, které ovlivňují výkon, včetně ergonomických faktorů, dostupnost informací, zkušenosti personálu a dalších relevantních faktorů.

Integrace do hodnocení rizik: CBDTM/THERP je často integrována do širšího hodnocení rizik, aby bylo možné komplexnější pohled na rizika v systému, s důrazem na lidský faktor jako klíčový prvek při výjimečných událostech.

Metoda CBDTM/THERP je užitečná pro složité operativní prostředí, kde je lidský faktor určený přispěvatelem k riziku a kde je potřeba detailní analýzy, jakým jednotlivci a týmy reagují na událost mimo normální provozní podmínky (Review of human reliability assessment methods, 2009).

- **ASEP** (*Accident Sequence Evaluation Program*, dále jen „ASEP“) – zabývá se zjednodušeným přístupem založeným na expertních odhadech. Je zčásti zmodernizovanou metodou THERP. ASEP je současné době hlavním prvkem pro kvantifikaci manipulativních částí, které jsou spojeny s obsluhou. ASEP poskytuje kratší cestu k analýze lidské spolehlivosti než THERP, protože vyžaduje méně školení pro používání nástroje, méně odborných znalostí pro screeningové odhady a kratší čas na dokončení analýzy (Review of human reliability assessment methods, 2009).

Dle (Everdij a Blom, 2008) se dělí do čtyř postupů:

Předhavarijní úkoly: úkoly, které by při nesprávném provedení mohly vést k nedostupnosti nezbytných systémů nebo komponent ve složitém zařízení, pro vhodnou reakci na nehodu v JE.

Pohavarijní úkoly: úkoly které mají pomoci elektrárně úspěšně se vyrovnat s abnormální událostí, tj. vrátit systémy elektrárny do bezpečného stavu.

Screening HRA: Každému lidskému úkolu jsou jako počáteční typ analýzy citlivosti přiřazeny pravděpodobnosti screeningu a doby odezvy. Pokud screeningová hodnota nemá v analýze systémů podstatný vliv, může být z dalšího posuzování vynechána. Screening snižuje množství podrobných analýz, které je třeba provést. HRA v této fázi záměrně používají konzervativní odhady HEP, doby odezvy, úrovně závislosti a dalších charakteristik lidského výkonu.

Nominální HRA: Pravidelné pravděpodobnostní hodnocení rizik se provádí v úkolech, které byly identifikovány během screeningového procesu. Používají se hodnoty, který tým HRA považuje za realistické, přičemž stále zůstávají poněkud konzervativní (pesimistické), aby byla zohledněna neschopnost týmu zvážit všechny možné zdroje chyb a všechny možné interakce chování.

- **HEART** (*Human Error Assessment and Reduction Technique, dále jen „HEART“*) dle (Review of human reliability assessment methods, 2009) je tato metoda navržená jako rychlá a jednoduchá pro kvantifikaci rizika lidských chyb. Jedná se o obecnou metodu, která je použitelná v jakékoli situaci, kde je pravděpodobnost vysoké spolehlivosti. Metoda je založená na řadě spolehlivostí. Základní lidská spolehlivost závisí na obecné povaze úkolu, který má být proveden. Za dokonalých podmínek je tato úroveň spolehlivosti vymezená pravděpodobnostními limity. Vzhledem k tomu, že tyto dokonalé podmínky neexistují za všech okolností, může být předpokládáno, že lidská spolehlivost se bude zhoršovat v závislosti na rozsahu, v jaké se mohou uplatnit vhodné podmínky které produkují chyby.

V metodě HEART je popsáno 9 generických typů úloh, přičemž každému je přiřazen nominální potenciál lidských chyb HEP a 38 podmínek produkujících chyby, které ovlivňují spolehlivost úkolu. Každý typ má maximální hodnotu vynásobenou s nominálním HEP. Tato metoda umožňuje rychlé a efektivní hodnocení pravděpodobnosti lidské chyby. Je založená na expertních odhadech, bere v úvahu vlivy pracovního prostředí a používá faktory ovlivňující lidskou výkonnost. V dnešní době je tato metoda více nahrazována metodou CREAM (Review of human reliability assessment methods, 2009).

- **CREAM** (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*, dále jen „CREAM“) – tato metoda zohledňuje nejen pravděpodobnost chyb, ale i kognitivní faktory a pracovní prostředí. Patří mezi nejznámější a nejužitečnější metody analýzy spolehlivosti lidského faktoru druhé generace (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

CREAM je popsán jako obousměrný přístup, což znamená, že stejná pravidla mohou být používána pro retrospektivní analýzu i predikci výkonu. Model je založen na rozlišení mezi kontrolou a kontrolou. Klasifikační schéma odděluje příčiny a projevy a navrhuje nehierarchickou organizační kategorii, propojenou prostřednictvím podkategorií nazývaných antecedenty a konsekventy. Rozlišení mezi kontrolou a kompetencí: Kompetence zahrnuje dovednosti a znalosti. Kontrola je chápána jako kontinuum od minimální až po úplnou kontrolu (Review of human reliability assessment methods, 2009).

- **SPAR-H** (*Standardized Plan Analysis Risk – Human Reliability Method*, dále jen „SPAR-H“) – tato metoda pracuje s typickými faktory (výcvik, stres, procedury, dostupný čas) a má vhodně nadefinované úrovně a k nim odpovídající hodnoty ovlivňujících faktorů (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Při tvorbě základního modelu SPAR-H, jsou součástí pouze tři z osmi faktorů ovlivňujících výkon člověka PSF, a to dostupný čas, stres a složitost úkolu. Zbývajících pět faktorů je obvykle považováno za specifické pro konkrétní událost, organizaci nebo personál a jejich hodnocení je prováděno při tvorbě modelu pro danou elektrárnu. Metoda SPAR-H dále řeší závislosti, což jsou situace, kde chyba ovlivní následnou chybu. Tyto vlivy jsou hodnoceny a zařazeny do kategorií. Hlavní součástí je pracovní list, který dokumentuje odhady pravděpodobnosti selhání. Postup při jeho použití se mírně liší podle toho, zda je využíván ke tvorbě modelů, k analýze událostí nebo k podrobnějšímu posouzení. Pravděpodobnostní selhání jsou určeny násobícím výpočtem (tedy pravděpodobnost selhání úkolu krát PSF1, krát PSF2 krát PSF3), kde odhady těchto pravděpodobností jsou v rozmezí od 0 do 1 (Review of human reliability assessment methods, 2009).

Všechny metody vycházejí z kombinace inženýrských úsudků a teoretických úvah a poskytují pokyny pro hodnocení (Holmberg, 2019)

4.3 Aplikace metod hodnocení lidského činitele v jaderné energetice

Mezi důležité kroky patří právě výběr vhodných metod, pomocí kterých budou jednotlivé typy lidských selhání hodnoceny. Analýza lidského faktoru by měla být prováděná v úzké spolupráci s pracovníky provozu i údržby JE, protože právě tento personál přispěje reálnými zkušenostmi za normálních i havarijních podmínek (Dokumentace PSA, 2022).

Klasifikace analyzovaných lidských interakcí dle (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010):

Typ A - lidské zásahy, které předcházejí IU: údržba, plánované testy a kalibrace čidel – vlivem provozu, nesprávné uvedení zařízení do provozu po údržbě, nesprávná konfigurace jednotlivých komponent (platí pro zařízení, která nejsou indikována na BD).

Typ B - lidské zásahy přímo vyvolávající IU: chybné zásahy operátora na BD, vedoucí k odstavení reaktoru.

Typ C - lidské zásahy jako odezva na IU a následný přechodový proces: zásahy předepsané jako odezva na IU havarijními předpisy, ruční aktivace systémů nebo zařízení v případě selhání automatických procesů, nápravné akce pro obnovu funkce zařízení, které nejsou zahrnuty v havarijních předpisech.

Pro analýzu PSA 1. úrovně, by měly být zahrnuty všechny typy lidských zásahů, pokud lidské selhání může přispět k CDF. Musí být zahrnuty lidské chyby ještě před výskytem IU, které mohou potenciálně způsobit selhání a neprovozuschopnost významných zařízení nebo systémů. Tato selhání mohou nastat při údržbě nebo opravě zařízení, dále také při provádění testů, anebo kalibrování přístrojů (označován jako typ A). Když nebudou tyto chyby odhaleny včas, systémy nemusí správně reagovat na vzniklou IU. Systematické přezkoumávání pracovních postupů by mělo zamezit selhání a neprovozuschopnosti vlivem těchto chyb (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Analýza lidského faktoru by měla dále obsahovat lidská selhání, které povedou rovnou k možnému vzniku IU (tento typ označován jako B). Opět je nutné systematicky přistupovat k těmto chybám. Mezi další patří také lidské selhání během odezvy bloku na IU (označována jako selhání typu C). Tento typ může vést k selhání bezpečnostně významného zařízení. Právě tyto chyby představují obvykle nejvýznamnější přispěvatele k riziku ve spojení s lidským faktorem při PSA 1. úrovni. Abychom mohli lépe vnímat vliv lidských chyb ve výsledcích PSA, měly by tyto chyby být modelovány jako primární událost ve stromech

poruchových stavů nebo přímo v záhlaví stromu událostí (IAEA SAFETY STANDARDS, 2010).

Pro analýzu pracovních podmínek obsluhy na JE v ČR, se pro modelování a kvantifikaci lidských selhání doporučují zejména tyto metody, jak uvádí (Dokumentace PSA, 2022):

1. Metoda THERP (selhání typu A a B a závislosti mezi selháními),
2. Metoda rozhodovacích stromů (selhání typu C),
3. Metoda CREAM (selhání typu C, když nejsou pro akci další vhodné procedury),
4. Metoda ASEP používá se pro manipulativní část selhání typu C,
5. Metoda SPAR-H pro rychlou a efektivní analýzu lidských selhání všech typů.

Celá metoda HRA je řízená zvoleným pracovním rámcem. Je nabízená možnost volby mezi dvěma možnými alternativami – metodikami **SHARP** (*Systematic Human Action Procedure, dále jen „SHARP“*) a **ATHEANA** (*A Technique for Human Event Analysis, dále jen „ATHEANA“*) (Dokumentace PSA, 2022).

Metodika SHARP

Jedná se o strukturovanou metodu hodnocení lidské spolehlivosti, která se zaměřuje na systematickou identifikaci lidských chyb v komplexních systémech. Mezi hlavní rysy této metodiky jsou zahrnuty dle (Dokumentace PSA, 2022):

- **hierarchický přístup** k analýze lidského faktoru, který rozděluje proces na jednotlivé dílčí kroky a hodnotí pravděpodobnost chyb,
- **kombinace deterministických a pravděpodobnostních prvků** při posuzování dopadů lidských selhání na bezpečnost systémů,
- **důraz je kladen na organizační a environmentální faktory**, které mohou ovlivňovat výkon operátorů.

Metoda SHARP rozděluje všechny lidské zásahy a jejich selhání, která jsou běžně modelována ve studiích PSA, do čtyř základních kategorií dle (Dokumentace PSA, 2022):

- **předhavarijní zásahy**, při údržbě je obsluha ponechává určitou část systému v takovém stavu, že při požadavku na činnost systému, dojde k selhání systému,
- **selhání vedoucí k iniciační události**, kde je lidská chyba požadována za původce vzniku IU,

- **„post-havarijní“ selhání** jedná se o selhání na odezvy na vzniklou IU, kde je lidská chyba dalším stupněm pro nezvládnutí tohoto stavu a dále postupuje k poškození AZ reaktoru,
- **recovery** jedná se o rychlé znovu zprovoznění zařízení po jeho výpadku, které může být využito také pro odezvu na vznik mimořádného stavu.

Metodika ATHEANA

ATHEANA je nástroj druhé generace, který je popsán jako metodika pro získání kvalitativních a kvantitativních výsledků analýzy lidské spolehlivosti HRA. Základním tvrzením je, že významné lidské chyby jsou způsobeny „kontextů vynucujících chybu“, což jsou kombinace podmínek v zařízení a dalších vlivů, které vyplývají z metody odvozené od pravděpodobnosti lidských chyb. Tato metodika nabízí strukturované schéma pro identifikaci těchto chyb, přičemž je využívána a integrována znalost a zkušenost z oblasti inženýrství, pravděpodobnostního hodnocení rizik HRA a lidského faktoru (Review of human reliability assessment methods, 2009).

Tato metodika představuje pokročilejší přístup k hodnocení lidského faktoru, který zahrnuje nejen kvantifikaci pravděpodobnosti chyb, ale i hlubší analýzu kognitivních aspektů rozhodování operátora. Mezi hlavní rysy této problematiky dle (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018) patří:

- **identifikace scénářů lidských selhání** na základě systematického modelování provozních podmínek a možných chyb v úsudku,
- **zohlednění kontextuálních a kognitivních faktorů**, mezi které může být zařazen stres, pracovní prostředí, tlak na rozhodování nebo nejednoznačné informace,
- **použití expertních odhadů**, které posoudí pravděpodobnost lidských chyb při konkrétní situaci.

Expertní odhad

Je to obecný přístup ke kvantifikaci HEP. V některých případech, může být nejlepším vodítkem, jak odhadnout hodnotu HEP, přímo na základě vlastních zkušeností a citu. V HRA jaderné elektrárny Dukovany (*dále jen „EDU“*) byl expertní odhad využíván k odhadu HEP pro obtížně kvantifikované akce, které byly ve fázi screeningu vyhodnoceny jako nízké. Dle (Dokumentace PSA, 2022) by dokumentace měla být popsána pro každou lidskou akci, při které byly identifikovány důležité aspekty, jako např.: časování akce,

odpovídající předpisy, okolní prostředí, provozní praxe, dostupné informace, vliv předchozích akcí.

Hodnocení závislosti mezi lidským selháním

Mezi některými chybami v rámci PSA existují určité závislosti, které nastávají v důsledku chybné diagnózy nebo nedokonalých předpisů. Tyto závislosti musí být během analýzy zjištěny a kvantitativně ohodnoceny (Bezpečnostní návody SÚJB, 2018).

Mezi důležité kroky patří právě výběr vhodných metod, pomocí kterých budou jednotlivé typy lidských selhání hodnoceny. Analýza lidského faktoru by měla být prováděná v úzké spolupráci s pracovníky provozu i údržby JE, protože právě tento personál přispěje reálnými zkušenostmi za normálních i havarijních podmínek (Dokumentace PSA, 2022).

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 SOUČASNÝ STAV ZPRACOVÁNÍ ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI LIDSKÉHO ČINITELE NA JE DUKOVANY

V rámci praktické části byla nejprve analyzována současná situace při provádění analýzy spolehlivosti lidského činitele v jaderné elektrárně Dukovany. Bylo zjištěno, že je pro tento účel využívána metodika Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (Mladý 2000). V rámci této metodiky jsou prováděny následující kroky:

Výběr iniciační události

IU je chápána každá událost, která může vzniknout narušením normálního provozu JE a může se přenést na další zařízení, přičemž svým rozvojem může potenciálně vést k poškození jaderného paliva, a to v závislosti na úspěšném či neúspěšném zásahu různých systémů bloku. Proto je nezbytné, aby byla analýza PSA prováděna pro kompletní seznam iniciátorů, což zajistí celkové výsledky, které budou dostatečné a reprezentativní (Mladý, 2000).

Proces definování iniciačních událostí

K výběru specifických IU existuje několik možných přístupů a každý z nich má svá omezení. Aby byl vytvořen co nejúplnější seznam IU, doporučuje se kombinovat všechny přístupy, i když jeden z nich může být považován za hlavní. Mezi tyto přístupy patří (Mladý, 2000):

Reference na seznam iniciačních událostí: Tento seznam byl zpracován pro předchozí analýzu PSA prováděnou pro blok s reaktorem stejného typu.

Aplikovatelné obecné provozní zkušenosti: Tyto zkušenosti jsou získány z provozu bloku stejného typu (*Vodo-vodní energetický reaktor 440, dále jen „VVER“*), databáze poruchových stavů IAEA, a dalších databází pro reaktory typu PWR.

Specifické zkušenosti z provozu: Pro výběr specifické IU pro danou JE jsou využívány události, které se v minulosti JE vyskytly. Je doporučeno analyzovat všechny události a jejich příčiny, které vedly k odstavení nebo případně snížení výkonu reaktoru.

Speciální analýza: Pro úplnost seznamu IU se provádí systematická analýza příčin a následku poruch FMEA pomocných systému JE, aby byly identifikovány systémy, které mohou vést k odstavení reaktoru.

Následné iniciační události: Tyto události zahrnují poruchy systému pro selhání jejich funkce, které mohou vzniknout v přechodovém procesu a mohou vést k nové IU, jež změní průběh původního havarijního scénáře.

Nadprojektové události: Bezpečnostní systémy nemohou být projektovány na všechny možné IU, což vytváří malou pravděpodobnost vzniku nadprojektové havárie.

Stanovení bezpečnostních funkcí

Aby byly stanoveny možné havarijní sekvence vedoucí k poškození AZ, je nutné nejprve definovat bezpečnostní funkce, které zajišťují bezpečný stav bloku. Tyto funkce musí být splněny jako projektová odezva na danou událost. Pro každou IU jsou definovány bezpečnostní funkce nezbytné k zajištění bezpečného stavu bloku, a jsou určeny systémy, které zajišťují tyto funkce, včetně kritérií úspěšnosti zásahu systému (Mladý, 2000):

Příklady bezpečnostních funkcí: zajištění podkritičnosti reaktoru, odvod tepla z AZ, integrita I.O., udržování množství chladiva v primárním okruhu, integrita v kontejnmentu/hermetického prostoru a další.

Vzájemné vazby bezpečnostních funkcí a systémů

Pro každou jednotlivou bezpečnostní funkci je důležité identifikovat všechny systémy, které jsou přímo nebo nepřímo potřebné pro zajištění jejich funkcí. Tyto systémy se dělí na bezpečnostní a pomocné systémy, které jsou klíčové pro úspěšné fungování bezpečnostních systémů, jako jsou: napájení, chlazení komponent zařízení aj. (Mladý, 2000).

Požadavky na splnění bezpečnostních funkcí

Systémy, které mají plnit bezpečnostní funkce, musejí splňovat požadavky, dle konkrétní IU. Důležitá jsou kritéria pro úspěšné zvládnutí dané IU a zabránění jejímu širšímu rozšíření. Na bezpečnostní systémy se vztahují kritéria úspěšnosti zásahu, například zajišťovací parametry (průtok, doba odezvy, nastavení ochran a blokad), a minimální požadavky na počet tras systémů potřebných pro zajištění funkce.

Pro stanovení realistických kritérií úspěšnosti se používají specifické podpůrné termohydraulické analýzy, a to pro havarijní sekvence, které přispívají k největšímu riziku. Zásahy operátora a systému potřebných k likvidaci havárie, pokud selžou hlavní bezpečnostní systémy, jsou uvedeny v havarijních předpisech (Mladý, 2000).

Po rozhovoru s personálem ČEZ, a.s., bylo zjištěno, že dosud byly analýzy týkající se JE v rámci hodnocení bezpečnosti zpracovávány společností ÚJV Řež, a.s. jako součást PSA. Společnost ČEZ a.s. plánuje provádět tyto analýzy interně a přecházet na používání softwarového nástroje pro hodnocení lidských chyb HRA Calculator, vyvinutý americkým výzkumným ústavem EPRI. HRA Calculator je software, který aplikuje metody hodnocení lidských chyb uvedené v teoretické části výše.

V rámci této diplomové práce byl pro potřeby ČEZ, a.s., proveden prvotní výpočet v programu HRA Calculator, jako testování jeho použitelnosti v praxi, a na jeho základě byla dále vypracována metodická příručka. Ta se opírá o předchozí výpočet zpracovaný společností ÚJV Řež, a.s., pro tuto konkrétní událost. Tento výpočet byl převeden do nového softwaru s cílem zajistit kontinuitu a srovnatelnost výsledků.

6 VÝBĚR UDÁLOSTI A VÝPOČET

Pro hodnocení lidské chyby v programu HRA Calculator byla vybrána událost označená HE-1RP00-P-02, která představuje odezvu na neodstavení reaktoru (*Anticipated Transients Without Scram*, dále jen „ATWS“). Výběr byl proveden na základě parametru Fussell-Vesely, viz kapitola 3.4. Tato chyba HE-1RP00-P-02 byla zvolená pro podrobné hodnocení, protože podle hodnoty tohoto parametru patří mezi hlavní přispěvovatele k riziku ze všech uvažovaných lidských chyb, které se sledují, viz Tabulka 1. Při vypracování výpočtu bylo nezbytné vycházet z metodiky dokumentace PSA, výpočtů chyb v APENDIX HRA 2021 zpracovaného ÚJV Řež, a.s. a havarijního předpisu FR-S.1 pro konkrétní vybranou událost.

Tabulka 1 Výčet uvažovaných lidských chyb

Lidská chyba	Pravdě- podobnost	Fussell- Vesely	Popis
HE-1RP00-P-02	1,82E-02	3,66E-01	Selhání obsluhy BD pro rychle vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)
HE-1IF-DEPR60	6,90E-03	2,61E-01	Selhání vychlazování trendem 60°C/hod dle ES-1.2, ECA-3.1, ECA-3.2 obsluhou BD
HE-1IF-DEPRMAXSG	6,00E-02	2,56E-01	Selhání provedení vychlazení I.O. max. trendem dle E-3 obsluhou BD po úniku z primárního do sekundárního okruhu
HE-1RC00-P-02	1,14E-02	1,45E-01	Selhání 1. izolace smyčky pro SGCR/SGTR
HE-1IF-FEED&BLEED	2,80E-02	9,90E-02	Selhání provedení procedury Bleed & Feed dle FR-H.1 obsluhou BD
HE-1SD00-P-03/2H	5,80E-03	6,54E-02	Selhání izolace úniku z parovodu dle E-2 obsluhou BD do 2-4 h
HE-1SD00-P-08/2H	7,90E-02	6,49E-02	Selhání izolace úniku z havarijních a regulačních kazet dle E-2 obsluhou BD do 2-4 h
HE-1IF-FW-ECA-2.1	6,59E-02	4,50E-02	Selhání obsluhy BD pro zprovoznění napájecí vody do PG dle ECA-2.1 při prasknutí parovodu v hermetické zóně
HE-1EF00-P-05	8,40E-03	3,16E-02	Selhání otevření EA RRxxS01 na výtlačku superhavarijního napájecího čerpadla obsluhou BD
HE-1IF-HAOUTSG	5,82E-02	1,46E-02	Oddělení hydroakumulátorů ve scénářích po SGTR-neg. Závislost

HE-1PV00-P-02	2,14E-02	1,34E-02	Selhání odvodu I.O. přes systém organizovaných úniků obsluhou BD
HE-1IF-TJNOSTART	1,18E-02	1,32E-02	Operátor nezprovozní záložní vysokotlaký systém havarijního doplňování
HE-1SS00-P-02	2,71E-02	1,13E-02	Selhání izolace úniku přes přepad nádrží systému havarijního chlazení AZ obsluhou BD

Poznámka: Je uveden výčet lidských chyb, které mají největší příspěvky k CDF. Důležitost je vyjádřena parametrem Fussel-Vesely, který udává pravděpodobnost, že poškození paliva je způsobeno danou událostí. Například hodnota F-V 3,66E-01 pro událost HE-1RP00-P-02 znamená, že 36,6% hodnoty CDF tvoří kombinace případů, zahrnujících tuto specifickou událost.

Lidské chyby jsou v modelu PSA reprezentovány ve stromu poruchových stavů pomocí primárních událostí selhání lidského činitele (*Human Failure Event*, dále jen „HFE“). Pro účely nového hodnocení pomocí programu HRA Calculator byla vybrána událost, která je kvantifikována metodou nabízenou tímto programem, tedy kognitivní selhání pomocí rozhodovacích stromů a exekutivní (prováděcí) selhání pomocí metody ASEP. Stejná metoda, byla použita v APENDIX HRA 2021 zpracovaném ÚJV Řež, a.s. při původním výpočtu této události. Každý parametr při postupu tohoto výpočtu byl odvozen z havarijního postupu FR-S.1 a z odborných znalostí personálu ČEZ a.s., útvar PSA.

6.1 Popis scénáře vybrané chyby

Na elektrárnách v České republice V ČR jsou využívány reaktory typu VVER, které mají v projektu definovány dva způsoby zastavení štěpné reakce, lišící se prostředky a principy působení. Tím je zajištěno, že nedojde k selhání odstavení reaktoru působené společnou příčinou. Existují tedy dva způsoby (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

První způsob představuje havarijní, regulační a kompenzační kazety (*dále jen „HRK“*), které mají stejné rozměry jako palivové kazety, ale obsahují proutky s karbidem bóru. Bór pohlcuje neutrony a eliminuje další vývoj štěpné reakce. HRK jsou pomocí mechanismu s ozubenou tyčí zasouvány nebo vysouvány do/z AZ a tím regulují výkon reaktoru. V případě havarijní situace je napájení mechanismu odpojeno a HRK jsou spuštěny do AZ vlastní vahou (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Druhý způsob využívá kyselinu boritou H_3BO_3 , která je dobře rozpustná ve vodě. Změnou koncentrace H_3BO_3 v primární vodě (odvádí teplo z reaktoru), je možné měnit

neutronovou bilanci a regulovat výkon. V případě havarijní situace je do primární vody dodáván roztok H_3BO_3 s koncentrací 40 g/kg, který utlumí štěpnou reakci. Tento způsob je zálohou pro případ selhání pádu HRK, jak je popsáno v havarijním postupu FR-S.1. (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Stav ATWS je považován za nebezpečný, neboť dochází k nerovnováze mezi teplem vznikajícím v aktivní zóně reaktoru a schopností odvodu tepla z reaktoru za mimořádných nebo havarijních situací. Systémy pro vychlazování reaktoru jsou navrženy pouze na odvod zbytkového tepla po odstavení reaktoru (což představuje řádově procenta jednotky plného výkonu). Při neodstavení reaktoru by byl velice rychle zaznamenán vzestup teploty a tlaku v primárním okruhu, což by vedlo k poškození paliva (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

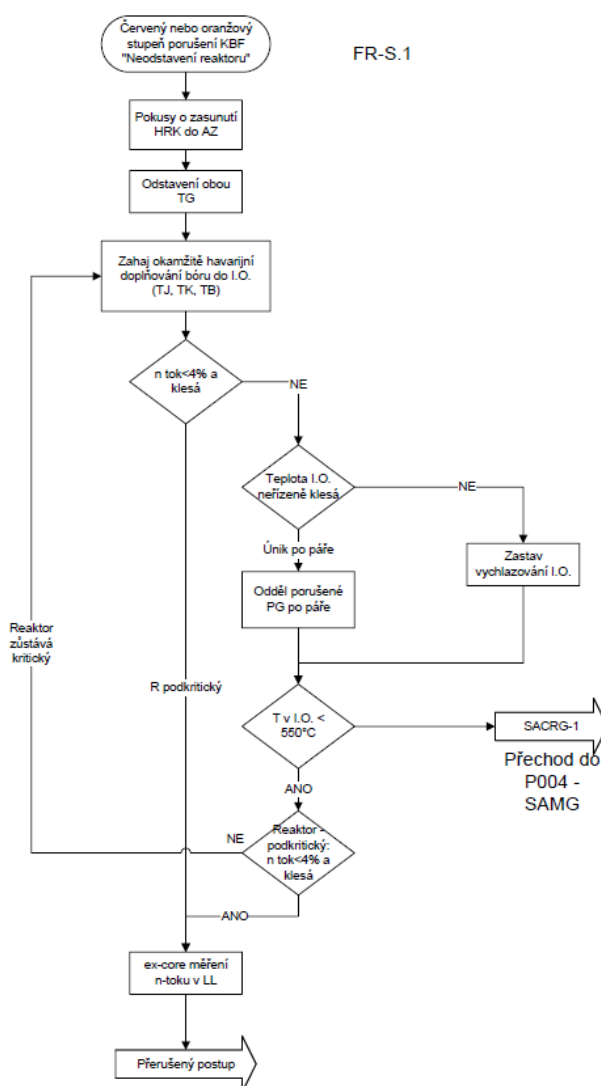
Havarijní postup FR-S.1 je zaměřen na zmírnění následků při událostech typu ATWS (očekávaný přechodový proces, viz Obrázek 6 bez odstavení reaktoru) a zahrnuje hlavní činnosti: ověření odstavení reaktoru, odstavení obou turbogenerátorů (*dále jen „TG“*), havarijní doplňování H_3BO_3 , kontrola odstavení bloku a působení ESFAS (*Engineered Safety Features Actuation System – Systém spouštění technických prostředků pro zajištění bezpečnosti, dále jen „ESFAS“*), eliminace zdrojů kladné reaktivity, kontrola teploty na výstupu z AZ, potvrzení podkritičnosti reaktoru a kontrola aparatury měření neutronového toku (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Událost ATWS je popsána jako neočekávané selhání systému havarijního odstavení reaktoru, které vede k nezasunutí HRK do AZ, a tím nedochází k naplnění podmínek běžného odstavení reaktoru. Při řešení této situace musejí být splněna tato kritéria: nesmí dojít k porušení celistvosti reaktorové nádoby přetlakováním, musí být zachována celistvost paliva, nesmí dojít k úniku RA látek, nesmí selhat kontejnment a musí být zajištěno odstavení a dlouhodobé chlazení paliva (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Postup FR-S.1 je určen jako záloha pro případ selhání HRK. Personál BD se musí soustředit pouze na nejdůležitější parametry a na to, jak správně odstavit reaktor, tedy zastavit štěpnou reakci. Tento děj závisí na délce trvání, množství koncentrace kyseliny borité a teplotě. Celý průběh tohoto děje je rychlý, a pokud nedojde k automatickému odstavení reaktoru, personál BD se pokusí odstavit reaktor uvedeným způsobem. Pro zajištění dostatečného chlazení reaktoru je nutné odstavení turbogenerátorů a zajištění dodávky napájecí vody do PG. Je však předpokládáno, že může selhat i tato varianta. Vzhledem k rychlosti celého vývoje jsou činnosti personálu BD prováděny rychle, stručně a bez zbytečného prodlení (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Podle IU se ATWS dělí následovně: neřízené zvedání skupiny HRK, vystřelení skupiny HRK, ztráta průtoků přes AZ, odstavení TG, nebo velké snížení zatížení TG, ztráta napájecí vody, ztráta elektrického napájení a odtlakování I.O. (Havarijný postup FR-S.1, 2022).

Společnou charakteristikou těchto událostí je porušení bilance v produkci i odvodu tepla, což vede ke zvýšení teploty chladiva I.O. Události ATWS jsou charakterizovány zvýšeným tlakem, jiné jsou charakterizovány odtlakováním I.O. Ve všech těchto přechodových stavech je charakterizována disproporce mezi produkcí tepla v reaktoru a odvodem tepla na sekundární straně. Kritickým stavem je situace, kdy je snižován odvod tepla z paliva a reaktorová nádoba je přetlakována nad mez integrity (Havarijný postup FR-S.1, 2022).



Obrázek 6 Zjednodušené logické schéma procesu

Zdroj: Havarijný postup FR-S.1, 2022)

6.2 Provedení analýzy v softwaru HRA Calculator pro vybranou iniciační událost

V této části byla pravděpodobnost lidské chyby HFE v programu HRA Calculator hodnocena systematicky a v několika krocích. Byly shromážděny a analyzovány údaje o činnostech obsluhy, které zahrnovaly provozní a havarijní předpisy, další technickou dokumentaci elektrárny a rozhovor s obsluhou. Na základě těchto údajů byla stanovena celková pravděpodobnost chyby obsluhy, což vedlo k vytvoření metodické příručky pro personál společnosti ČEZ a.s.

6.2.1 Vložení nové události HFE do HRA Calculator

Nejprve byla v HRA Calculator vytvořena nová událost týkající se chyby HFE HE-1RP00-P-02. Tato chyba byla definována jako „Selhání obsluhy BD pro rychlé vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 minut)“, a byla zaměřená na adekvátní odezvu na IU (Post Initiator). Pro hodnocení této události byla zvolena metodika rozhodovacích stromů CBDTM/THERP, viz Obrázek 7. Tato metodika, díky svému systematickému a vizuálnímu zpracování rozhodovacích procesů, umožnila podrobnou analýzu různých scénářů a jejich dopadů, jak bylo uvedeno v bodě 4.2. Díky této metodice byla identifikována vhodná odezva na událost a navrženy příslušné nápravné kroky, což přispělo k vyšší věrohodnosti analýzy.

New Basic Event

Basic Event ID
HE-1RP00-P-02

Basic Event Description
Selhání obsluhy BD pro rychlé vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)

HFE Type

Pre-Initiator	Post-Initiator
☐ THERP	☒ CBDTM/THERP
☐ ASEP	☐ HCR/ORE/THERP
☐ Screening Value	☐ Annunciator Response/THERP
	☐ SPAR-H
	☐ ASEP
	☐ Screening Value

OK Cancel

Obrázek 7 Vytvoření nové události

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Další jednotlivé kroky vycházejí z výpočtu v softwaru HRA Calculator viz Obrázek 8 v levé části.

6.2.2 Příznaky

Pro správný výpočet této události bylo nezbytné určit příznaky, které vedou k zahájení činnosti podle havarijního předpisu FR-S.1.

V Havarijním předpisu FR-S.1. je uvedeno:

„Mimořádný stav typu ATWS nastává v případě, kdy nedošlo k odstavení reaktoru systémem havarijních ochran, přestože mělo dojít k jejich zapůsobení (důvodem může být např. mechanické zablokování HRK nebo signál na odstavení reaktoru neprošel až na akční člen). Reaktor potom pracuje dál, ačkoli nastaly důvody pro jeho odstavení.“

Příznakem pro zahájení tohoto scénáře je nutné provedení havarijní ochrany (dále jen „HO“) reaktoru, které je signalizováno operátorům na BD automatikou RTS (Reactor Trip Systém – Systém rychlého odstavení reaktoru, dále jen „RTS“), například v důsledku výpadků zařízení nebo překročení mezí parametrů pro HO. Toto je signalizováno systémem alarmů a akustickou signalizací na BD.

Předpokládá se, že neutronový výkon reaktoru je vyšší než 4 % nominálního výkonu a neklesá, a že HRK nejsou v dolní poloze podle havarijního předpisu FR-S.1. Dále se předpokládá, že HO nemůže být aktivováno ručně tlačítkem na BD, ani pomocí vypínačů RTS (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Na základě těchto kroků bylo pokračováno ve výpočtu. Tyto příznaky jsou důležitou vstupní informací pro výpočet HEP, protože určují okamžik zahájení činnosti podle havarijního postupu. Na jejich základě byl také prováděn výpočet v ÚJV Řež, a.s.

6.2.3 Postupy a školení

Bylo nutné postupovat podobně jako v předchozím kroku. Dle (Havarijní postup FR-S.1, 2022) byly do knihovny postupů zahrnuty jak kognitivní, tak prováděcí aspekty školení, čímž byla zvýšená kvalita přípravy. Dále byly vyplněny údaje o školení a cvičeních. Na základě informací z EDU bylo zaznamenáno 6 cvičení na trenažéru (simulátoru) za rok, což zajistila dodržení stejných vstupních parametrů, které byly použity ve výpočtech provedených v ÚJV Řež, a.s.

6.2.4 Popis scénáře v programu HRA Calculator

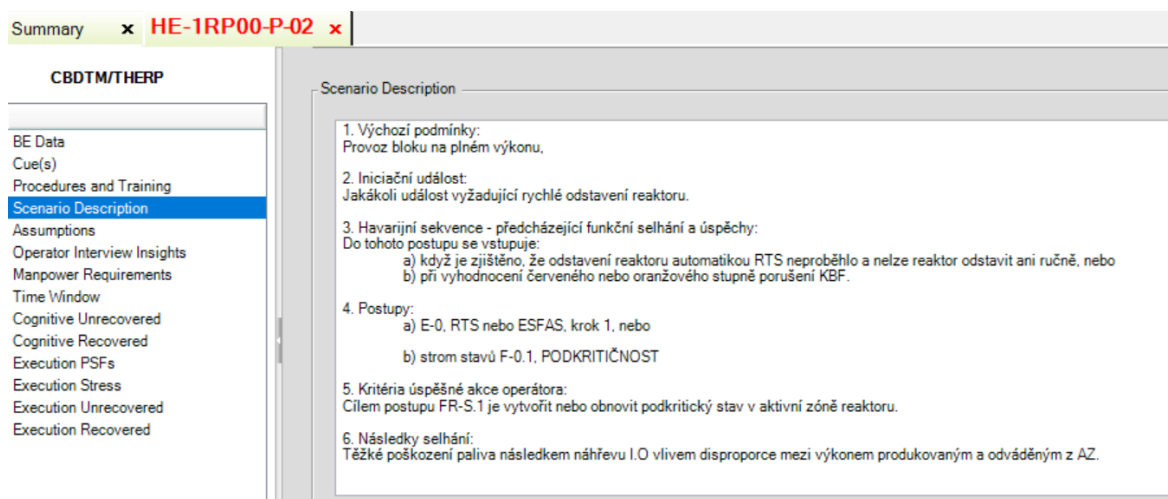
Byl zadán popis scénáře do softwaru HRA Calculator viz Obrázek 8, v souladu s havarijním postupem FR-S.1, neodstavení reaktoru – ATWS a FR-S.2 ztráta podkritičnosti AZ, který je založen na stromu stavů F-0.1, podkritičnost.

Bylo předpokládáno, že tento strom stavů F-0.1 podkritičnost představuje nejvyšší prioritu mezi kritickými bezpečnostními funkcemi a bývá vždy monitorován jako první. Na základě monitorování parametrů, které popisují stav podkritičnosti, dále probíhá analýza průběhu přechodového stavu. Při překročení některých důležitých parametrů je operátor naveden k jednomu z postupů havarijního postupů. Mimořádný stav typu ATWS nastává, pokud nedojde k odstavení reaktoru systémem havarijních ochran, přestože by k němu mělo dojít. Předpokládá se, že důvodem ATWS může být mechanické zablokování HRK nebo signál na odstavení reaktoru, který neprošel na akční člen. Hlavním cílem havarijního postupu je obnova podkritického stavu v aktivní zóně reaktoru. Strategie Havarijního postupu FR-S.1 je zaměřená na přivedení záporné reaktivity do AZ dvěma hlavními metodami: využitím teplotního efektu a zvyšováním koncentrace bóru v AZ (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Havarijní předpis dále předpokládá, že úspěšná činnost operátora, vedoucí k zastavení štěpné reakce v reaktoru, nastává:

- **zvýšením teploty vody v reaktoru** (teplotní efekt) – při kterém se zhoršují podmínky pro štěpnou reakci, nebo
- **zvýšením koncentrace kyseliny borité** ve vodě v reaktoru, přičemž bór účinně pohlcuje neutrony, což zastavuje štěpnou reakci.

Do postupu FR-S.1 je vstupováno buď z havarijního postupů E-0, RTS nebo ESFAS, pokud bylo zjištěno, že odstavení reaktoru automatikou RTS neproběhlo, a reaktor nelze odstavit ani ručně, nebo ze stromu stavů F-0.1, podkritičnost, na základě důležitých parametrů Kritických bezpečnostních funkcí (*dále jen „KBF“*) (Havarijní postup FR-S.1, 2022).



Obrázek 8 Popis scénáře

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.5 Rozhovor s operátorem

Vzhledem k tomu že předpisy blíže nespecifikují další informace pro výpočet této chyby, jako například složení pracovního personálu na BD, časová okna atd., bylo nutné pro další postup ve výpočtu provést rozhovor s operátorem, který poskytl další potřebné informace. Rozhovor byl proveden prostřednictvím emailové komunikace 23.07.2025 a operátor byl dotazován na tyto následující otázky:

1. Jaké události mohou předcházet ATWS?

Mechanické poškození pouzder HRK, takže HRK nemůže spadnout do AZ a zadrhne se. Po požadavku na odstavení reaktoru nedojde k zasunutí HRK (vůbec nebo jen částečně).

Jiné příčiny jsou velmi nepravděpodobné. Při výpadku všech tří divizí ESFAS, RTS stále zůstává možnost přerušit elektrické napájení pohonů HRK ručně (tlačítkem z BD nebo z nouzové dozorny) operátorem. Dále může vypnout operátor napájení přepínači pro zkoušení RTB (Reactor Trip Breaker – Systém odstavení reaktoru, dále jen „RTB“) pro jednotlivé divize. MaR (měření a regulace) může vypnout napájení z místnosti RRCS.

Při ztrátě napájení dojde k samovolnému pádu HRK do reaktoru.

2. Kolik HRK musí selhat, aby to bylo považováno za ATWS?

Nezáleží na počtu HRK, ale na neutronovém výkonu. Ten musí být menší než 4 % N_{nom} . (E-0, krok 1).

3. Které kroky postupu FR-S.1 jsou kritické – tedy takové, že při jejich neprovedení by došlo k poškození paliva?

První tři kroky musí být provedeny okamžitě:

- *Snaha odstavit Reaktor (výše popsány způsoby).*
- *Odstavit obě TG.*
- *Najet všechna čerpadla vysokotlakého systému havarijního doplňování (dále jen „TJ“) AZ a zvyšovat koncentraci H_3BO_3 .*

Pokud nedojde k najetí TJ čerpadel včas, může dojít k natlakování I.O. a TJ se už neprosadí. Pak je třeba snížit p I.O. pomocí pojišťovacího ventilu kompenzátoru objemu.

4. Jaká jsou přibližná časová okna pro tyto kritické kroky? Do kdy musí operátor zahájit postup, aby předešel poškození paliva?

Najetí TJ je nutno provést do 5 minut. Nárůst teploty a tlaku v I.O. po této době znemožní totiž záhy prosazení vysokotlakého systému havarijního doplňování a systém doplňování primárního okruhu a bórové regulace.

5. Liší se postup FR-S.1 pro jednotlivé IU? Může být časování odlišné při různých IU?

Na IU nezáleží. Důležité je, aby neutronový výkon Reaktoru klesnul pod 4 %. Pokud ne, musíme použít FR-S.1.

6. Jak je důležité odstavení obou TG? Hrozí poškození paliva, pokud by se TG neodstavily?

*Po zapracování RTS **musí** dojít k odstavení obou pracujících TG. Důvodem je zabránit prudkému vychlazení I.O. způsobenému porušením rovnováhy vyvíjeného a odváděného tepla z I.O.*

Pokud nedošlo k odstavení reaktoru, operátor sekundární části přesto odstaví obě TG. Tato činnost způsobí prudké přehřívání I.O. a na rychlém zvyšování teploty je založena celá strategie řešení tohoto závažného mimořádného stavu. Zvyšováním teploty I.O. a působením teplotního efektu (vnosem záporné reaktivity) dojde ke snižování výkonu reaktoru.

7. Cvičí tento postup na тренаžeru? Čemu se při cvičení věnuje největší pozornost?

Ano cvičí se. Pozornost se věnuje správnému vyhodnocení stavu a včasnému najetí VŠECH tří TJ čerpadel.

- 8. Je ATWS signalizován jednoznačnými alarmy nebo jinými signály? Může vzniknout situace, že signály neukazují jednoznačně na ATWS?**

Polohu HRK lze vysledovat na ukazatelích hrubé polohy. Pokud by měl operátor pochybnost o poloze HRK, může ji zkontrolovat na ukazateli jemné polohy.

Výkon reaktoru je zobrazen na několika ukazatelích.

- 9. Jaké může obsluha udělat chyby, které by nakonec vedly k selhání celého postupu?**

- a) Nesprávná interpretace signálů, alarmů nebo sledování nesprávných parametrů?

Poloha HRK je zobrazena jednoznačně, stejně tak výkon reaktoru.

- b) Nedostatek pozornosti z důvodu vysokého pracovního zatížení?

Při zapůsobení RTS přijde množství hlášek světelných a zvukových. Nedovedu si představit, že by si toho operátor nevšimnul.

- c) Výběr nesprávného postupu?

Postup je jasný a řídicí operativní personál je z této problematiky přezkušován a cvičí jej na тренаžéru.

- d) Neúmyslné přeskočení kroku postupu?

Je možné. Ale pokud vedoucí reaktorového bloku (dále jen „VRB“) udělá chybu a přeskočí krok, pak jej na to mohou upozornit oba operátoři a také bezpečnostní inženýr (dále jen „BI“), který by v tomto případě byl na BD.

- e) Nesprávná manipulace?

Je možná. Ale činnost operátora I.O. (dále jen „OPO“) je kontrolována VRB a BI.

- 10. Jsou k provedení postupu nutní strojníci na bloku?**

Ne.

- 11. Co ještě by se mohlo při provádění postupu pokazit?**

Nic mě nenapadá. HRK jsou zkoušeny při náběhu bloku, stav celého systému TJ je kontrolován pravidelně dle požadavků limitů a podmínek.

Probíhá provádění postupu tak, že OPO provádí manipulace a vedoucí blokové dozorny kontroluje správnost provedení?

Ano, činnost OPO je kontrolována VRB a BI.

12. Pokud se kvůli lidské chybě nepodaří odstavit reaktor, kolik času je na nápravné opatření nebo opakování postupu? Může ještě někdo další zjistit lidskou chybu a zajistit nápravu (VRB, BI)?

Reaktor MUSÍ být odstaven automatikami (na člověka se nelze spoléhat). Pokud by k němu nedošlo, pak jej odstaví operátor. Kdyby chybu v uvedeném postupu FR-S.1 přehlédl OPO, VRB, BI, což je velmi nepravděpodobné, pak ji může odhalit ještě SI, případně technické podpůrné středisko havarijního štábu. (poskytnuto personálem blokové dozorny EDU).

6.2.6 Požadovaný počet personálu

Další krok bylo stanovení počtu personálu na BD při události ATWS. Vzhledem k tomu, že havarijní předpis blíže nespecifikuje přítomnost personálu na BD, byly tyto informace zjištěny na základě strukturovaného rozhovoru s operátorem BD viz 6.2.5. *Aby byla činnost obsluhy proveditelná, musí být složení posádky větší než požadovaný počet členů personálu. Požadavky na personál byly poté projednány i s personálem ČEZ a.s., útvar PSA, neboť se od nich dále odvíjí výsledek výpočtu. Po konzultacích byly do výpočtu zahrnuty následující pozice: OPO, operátor sekundárního okruhu (dále jen „OSO“) a VRB. Na BD trvale sedí operátor primárního okruhu (OPO) a operátor sekundárního okruhu (OSO) spolu s vedoucím reaktorového bloku (VRB). BI má kancelář v provozní budově a přechází mezi BD a vzhledem k rychlosti události se předpokládá, že by nestihl dojít na BD postiženého bloku, a proto není do výpočtu zahrnut viz Obrázek 9. Tyto podrobnosti byly poskytnuty odborným personálem z JE Dukovany.*

Crew Member	Total Available	Include in Dependency Analysis	Notes from Setup	Required for Execution	Notes
VRB	1	☒			
SI	1	☐			
BI	1	☐			
OPO	1	☒			
OSO	1	☒			
Strojníci	2	☐			
Elektrikáři	2	☐			
I&C Technicians	2	☐			
Health Physics Technicians	2	☐			
Chemistry Technicians	1	☐			

Obrázek 9 Požadovaný počet personálu

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.7 Časové okno

Další krok zahrnuje vymezení časového okna. Časová okna byla vymezená na základě Havarijního předpisu FR-S.1 viz Tabulka 2. Podobně bylo postupováno při tomto výpočtu i v ÚJV Řež, a.s. Pro poruchy typu ATWS byla provedená celá řada výpočtových analýz. Tyto analýzy byly stanoveny podle výše zmíněných IU, které se vyznačují selháním havarijních ochran, což způsobuje, že nedojde k zasunutí HRK do AZ. V analýzách se objevují následující základní přechodové stavy: velké snížení zatížení nebo odstavení TG, ztráta napájecí vody, ztráta elektrického napájení, odtlakování I.O. a neřízené zvedání skupiny HRK (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Pro dokumentaci postupu FR-S.1 byl vybrán jeden případ z provedené analýzy, a to pro bezpečnostní zprávu JE, která byla zpracována s realistickým přístupem k počátečním a okrajovým podmínkám. Součástí analýzy byly zásahy operátorů v souladu s postupem FR-S.1. Pro dokumentaci základních kroků byl vybrán případ s IU neřízeného otevření pojišťovacího ventilu PG. Výchozí stav pro prezentovaný případ byl výkonový provoz bloku v režimu R1 na 100 % nominálního výkonu. K selhání RTS dochází poruchou na mechanické části (Havarijní postup FR-S.1, 2022).

Tabulka 2 Časové okno pro ATWS

Čas (s)	Událost	Poznámka
0	Začátek události	Otevření PV1 PG1
10 min	Vstup operátora do likvidace mimořádných stavů	P003 a E-0, krok 1 Po zajištění neprovoznosti HRK přechází operátor do postupu FR-S.1
18 min	Odstavení TG	FR-S.1, krok 2
18 min 0,5 s	Otevření přepouštěcí stanice do kondenzátoru	D-signál
18 min 0,8 s	Signál HO-1 od odstavení TG	Nedochází k odstavení reaktoru
18 min 38 s	Otevření přepouštěcí stanice do atmosféry	$P_{HPK} > 5,3 \text{ MPa}$
20 min	Zapnutí čerpadel TJ	FR-S.1, krok 3a

Zdroj: Havarijní postup FR-S.1, 2022

T_0 je modelován jako začátek události viz Obrázek 10 a obvykle odpovídá času odstavení reaktoru, v tomto případě okamžiku vzniku podmínek pro odstavení reaktoru (Reactor Trip).

Systémové časové okno T_{sw} je definováno jako doba od začátku události do okamžiku, kdy by zásah již nebyl prospěšný (obvykle když dojde k nevratnému poškození AZ reaktoru nebo zařízení). Podle Havarijní postup FR-S.1, 2022 a APENDIX HRA 2021 pro tento výpočet bylo předpokládáno:

$$T_{sw} = 20 \text{ minut}$$

Doba zpoždění. T_{delay} představuje čas od začátku (obvykle od IU) do okamžiku, kdy je operátory potvrzen signál. Podle Havarijní postup FR-S.1, 2022 a APENDIX HRA 2021 pro tento výpočet bylo stanoveno:

$$T_{delay} = 5 \text{ minut.}$$

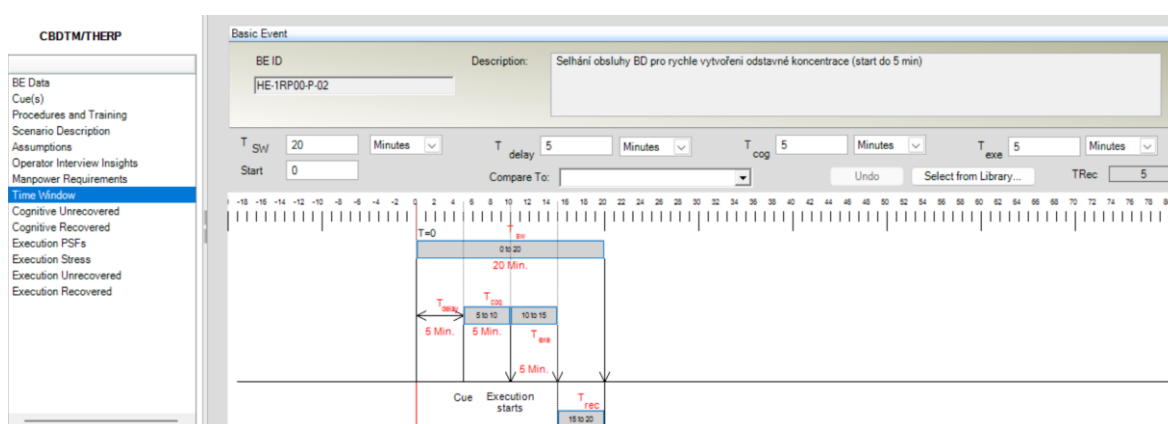
Čas kognitivní fáze (rozpoznávání). T_{cog} je definována jako nominální doba pro rozpoznání a zahrnuje dobu zjištění události, diagnostiky a rozhodování. T_{cog} je možné získat pozorováním na simulátoru, nebo alternativně z rozhovorů s operátory. Podle Havarijní postup FR-S.1, 2022 a APENDIX HRA 2021 a i po rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 bylo pro tento výpočet stanoveno:

$$T_{cog} = 5 \text{ minut}$$

Doba provedení. T_{exe} je nominální doba potřebná k provedení činnosti. Doba provedení je definována jako doba, za kterou operátoři po úspěšné diagnostice provedou činnost. Zahrnuje dobu přechodu k místnímu zařízení, případně dobu na vyzvednutí a nasazení OOP a dobu nutnou pro manipulaci se zařízením na místě. Podle Havarijní postup FR-S.1, 2022 a APENDIX HRA 2021 bylo stanoveno:

$$T_{exe} = 5 \text{ minut}$$

Poté program sám dopočítá dobu, která je k dispozici k nápravě nesprávně provedených kroků jako: $T_{rec} = T_{sw} - T_{del} - T_{cog} - T_{exe} = 5 \text{ minut}$, viz Obrázek 10.



Obrázek 10 Časové okno

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8 Výpočty kognitivní fáze (Rozhodovací stromy)

Výpočty jednotlivých částí kognitivní fáze byly provedeny pomocí rozhodovacích stromů. Rozhodovací stromy představují grafické znázornění binárního rozhodovacího schématu, kde záhlaví obsahují otázky nebo kritéria a jednotlivé větve ukazují splnění kritéria ANO (směr nahoru) nebo nesplnění NE (směr dolů) viz Obrázek 11. Pokud jsou pravděpodobnosti kognitivní části $<0,0001$, tak jsou ve výpočtu zanedbatelné.

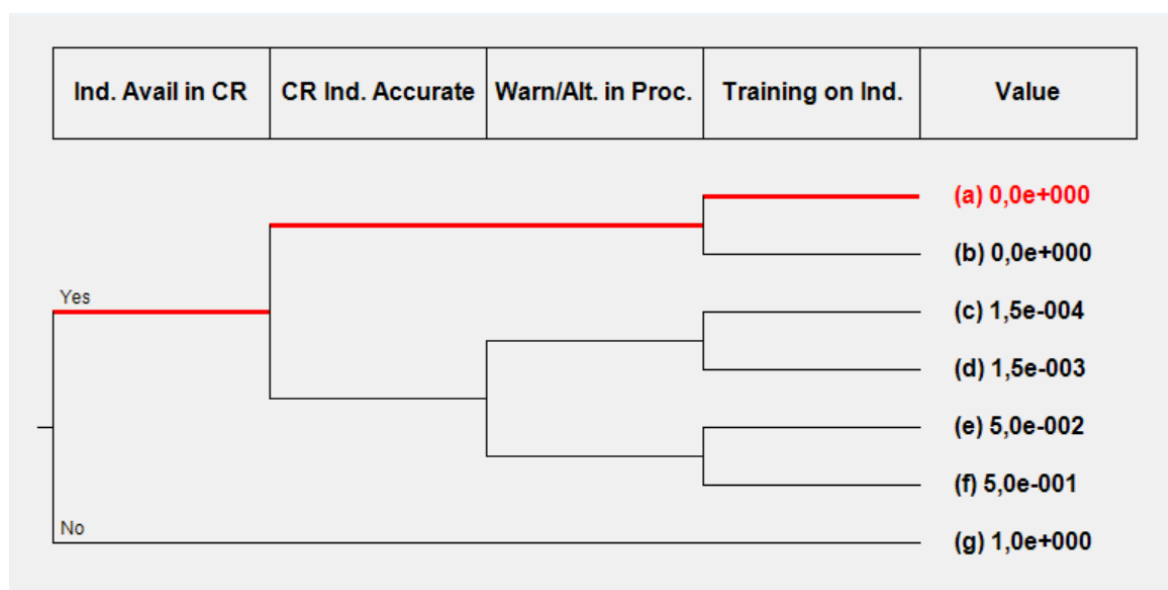
6.2.8.1 Pca: Dostupnost informací

První rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu dostupnosti informací při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 11.

Dle havarijního postupu FR-S.1 se předpokládá, že by měly alarmy signalizovat událost vedoucí k odstavení bloku (ANO). Dále se předpokládá, že množství informací naznačuje možnost ATWS (ANO). Také se předpokládá, že postup obsahoval varování o nespolehlivosti běžně zobrazených informací (ANO), a alternativní zdroje byly rovněž přezkoumány. Dle rozhovoru s operátorem bylo potvrzeno viz 6.2.5, že posádka BD absolvovala trénink v interpretaci informací v podmínkách podobných těm, které by mohly nastat a tento postup se pravidelně cvičil na trenažéru (ANO).

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

Pca <0,0001 (a), (zanedbatelná)



Obrázek 11 Pca: Dostupnost informací

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.2 Pcb: Selhání pozornosti

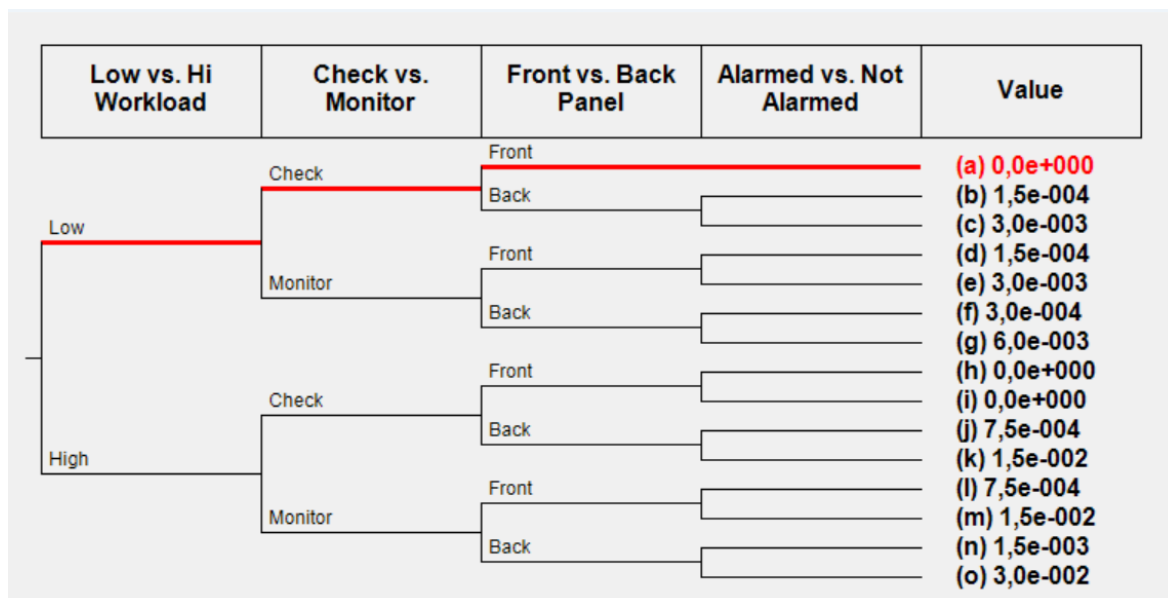
Druhý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu selhání pozornosti při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 12.

Předpokládá se, že signály o ATWS přijdou na BD (Low-nízká, že by nedorazily). Je předpokládáno, že pro správné řízení situace jsou klíčové jednotlivé kontroly parametrů vycházející ze signálu a následných reakcí uvedených v postupu (Check-kontrola). Dále se

předpokládá, že důležité parametry budou zobrazeny na předních panelech, což zvýší pravděpodobnost správné reakce operátora na alarmy a indikace (Front-přední).

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

$P_{cb} < 0,0001$ (a), (zanedbatelná)



Obrázek 12 Pcb: Selhání pozornosti

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

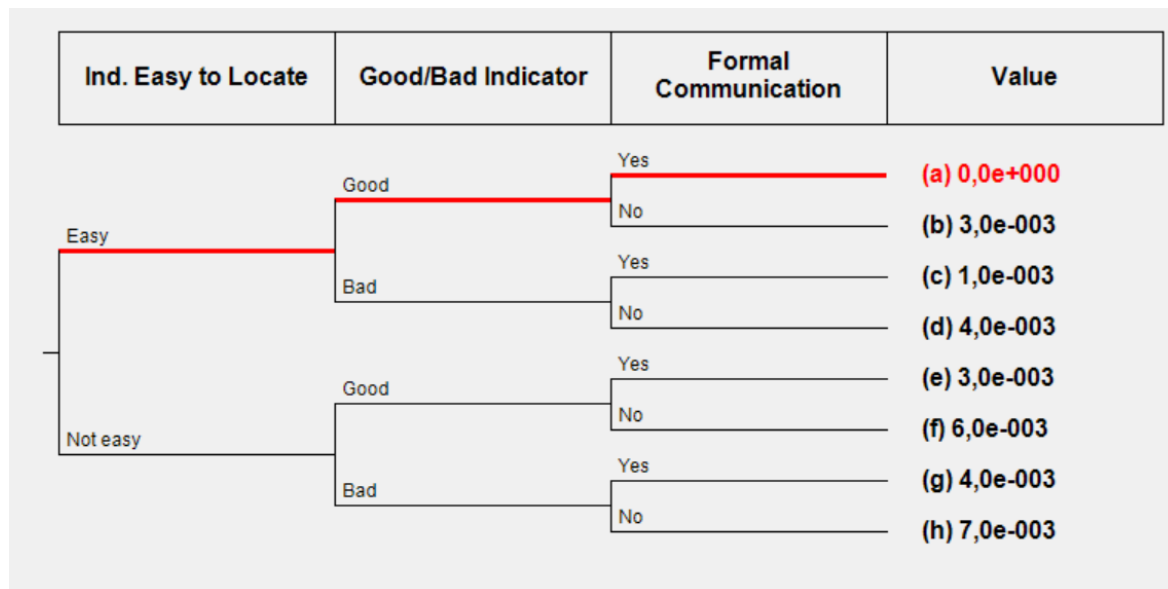
6.2.8.3 Pcc: / Chybné čtení/chybná komunikace údajů

Třetí rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu k chybnému čtení, či chybné komunikaci údajů při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 13.

Předpokládá se, že uspořádání a označení na řídicích panelech usnadňuje nalezení požadovaných indikátorů (Easy-usnadňuje). Dále se předpokládá, že alarmy a indikace parametru jsou umístěny na přehledných místech, a alarm při ATWS je srozumitelný a informuje o stavu reaktoru prostřednictvím více parametrů (Good-dobré). Také se předpokládá, že dvoucestná komunikace zajišťuje přesnost předávaných informací (Yes-ano).

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

Pcc <0,0001 (a), (zanedbatelná)



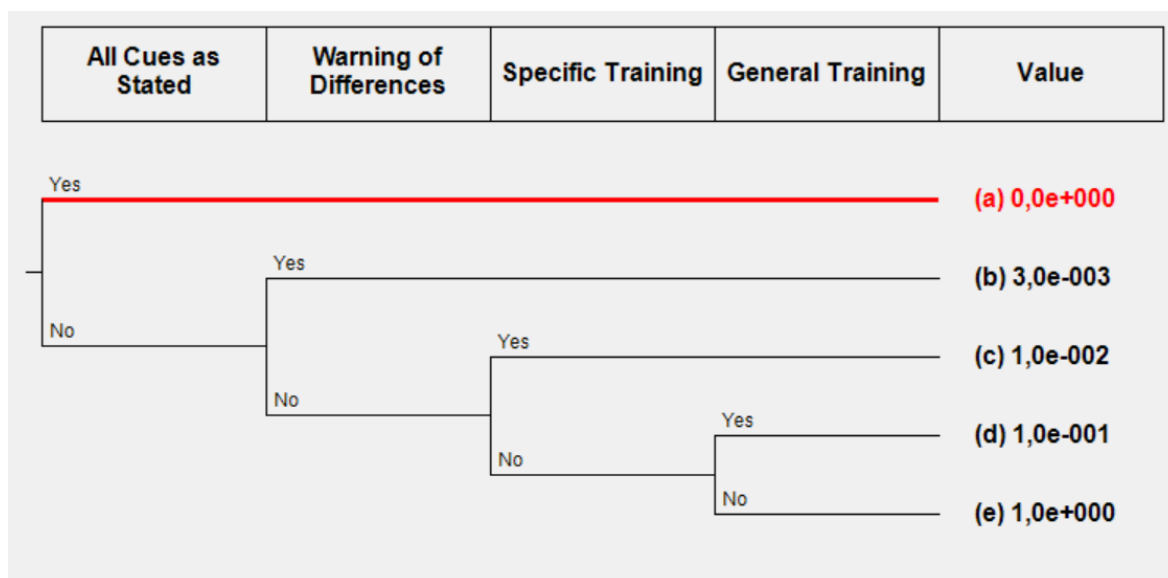
Obrázek 13 Pcc: Chybné čtení /chybná komunikace údajů

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.4 Pcd: Zavádějící informace

Čtvrtý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu k zavádějícím informacím při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 14.

Předpokládá se, že veškeré stavy příznaků a hodnoty parametrů byly jednoznačně určeny v postupu FR-S.1 (Yes-ano). Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu **Pcd <0,0001 (a).**



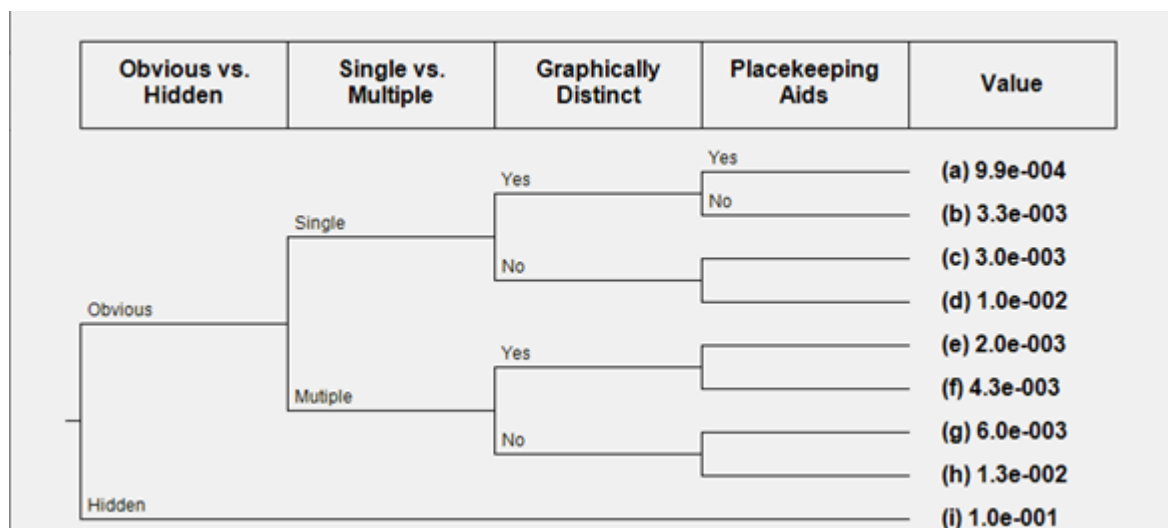
Obrázek 14 Pcd: Zavádějící informace

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.5 Pce: Přeskočení kroku v postupu

Pátý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu přeskočení kroků v postupu při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s., a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 nebyl zvolen žádný scénář. Bylo předpokládáno, že při této události bude použit pouze havarijní předpis FR-S.1, a z tohoto důvodu není tento scénář zahrnut do výpočtu viz Obrázek 15.

Pokud je nějaká instrukce jasně označená jako samostatný krok, je pravděpodobné, že bude zřejmá. Naopak, pokud je instrukce skrytá například v odstavci, nebo poznámce, může být snadno přehlédnutá. Tento havarijní postup FR-S.1 zajišťuje, že všechny kroky jsou jasně definovány. Pokud operátor používá pouze jeden konkrétní postup, například havarijní postup FR-S.1, je zajištěná správnost a jednodušší orientace. Všechny kroky postupu jsou graficky odlišeny, viz Obrázek 5, což napomáhá zamezit jejich přehlédnutí.



Obrázek 15 Přeskočení kroku

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.6 Pcf: Chybná interpretace instrukcí

Šestý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu dostupnosti informací při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 16.

Předpokládá se, že tento krok neobsahuje neznámé názvosloví nebo neobvyklou gramatickou konstrukci, což usnadňuje správné porozumění (Standard-standardně). Dále se předpokládá, že všechny potřebné informace byly uvedeny, což umožnilo jasně určit požadované činnosti a jejich cíle (Yes-ano). Zároveň bylo potvrzeno při rozhovoru s operátorem, že posádka BD byla proškolená na správnou interpretaci tohoto kroku v podmínkách podobných těm, které mohou nastat, a to přispívá k minimálnímu riziku chybných interpretací.

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

$$P_{cf} < 0,0001 \text{ (a), (zanedbatelná)}$$

Standard or Ambiguous Wording	All Required Information	Training on Step	Value
Standard	Yes		(a) 0,0e+000
	No	Yes	(b) 3,0e-003
Ambiguous	No	No	(c) 3,0e-002
			(d) 3,0e-003
	Yes		(e) 3,0e-002
	No		(f) 6,0e-003
			(g) 6,0e-002

Obrázek 16 Chybná interpretace instrukcí

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.7 Pcg: Nesprávná interpretace rozhodovací logiky

Sedmý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu dostupnosti informací při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 17.

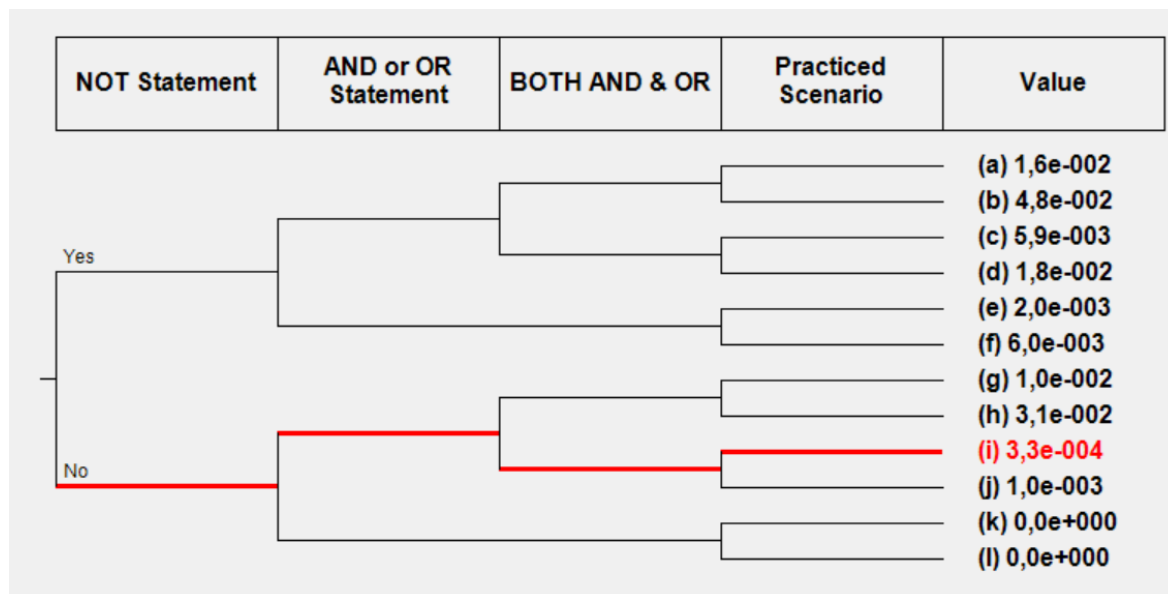
Předpokládá se, že v krocích nebylo použito slovo „ne“, což snižuje možnost chybných interpretací (No-ne). Dále se předpokládá, že instrukce obsahují diagnostickou logiku a kombinují více podmínek pro stanovení výsledků (Yes-ano). Také se předpokládá, že tento krok neobsahoval složitou logiku, která by kombinovala operátory „a“ a „nebo“ (No-ne).

Na základě rozhovoru s operátorem se předpokládá, že posádka měla příležitost procvičovat tento krok na simulátoru ve scénáři, který byl podobný aktuální situaci (Yes-ano).

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

$$P_{cg} = 3,3E-4 \text{ (i)}$$

Tato pravděpodobnost, jako jediná je nenulová a je rovna 3,3E-4.



Obrázek 17 Nesprávná interpretace rozhodovací logiky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.8.8 Pch: Úmyslné porušení

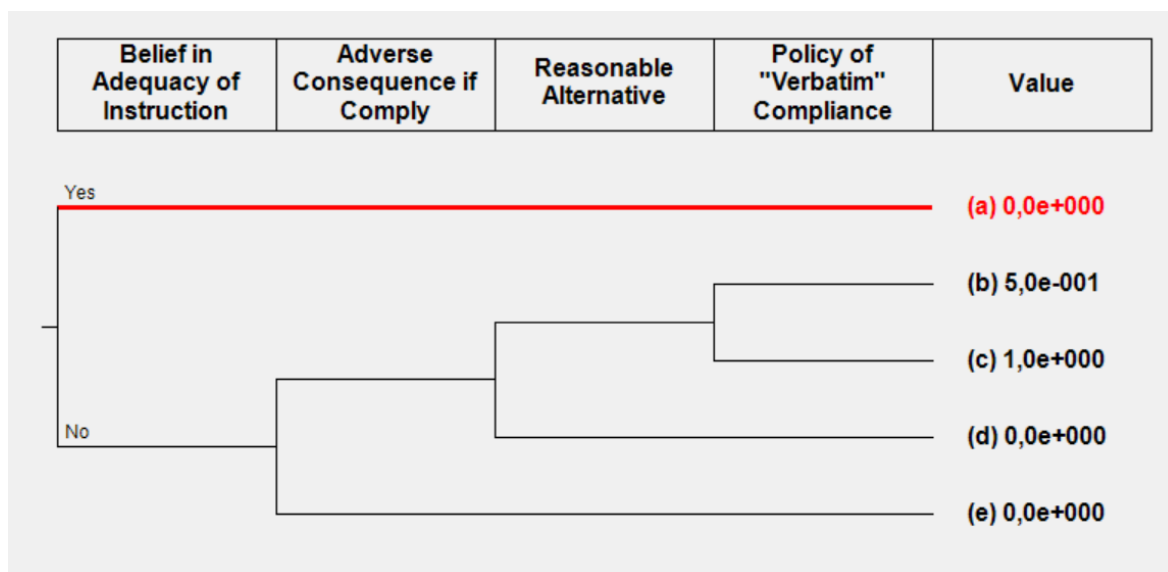
Osmý rozhodovací strom vyjadřuje různé scénáře ve vztahu dostupnosti informací při IU ATWS. Na základě havarijního předpisu FR-S.1, výpočtu od ÚJV Řež, a.s. a rozhovoru s operátorem viz 6.2.5 byl zvolen červený scénář. Vzhledem k těmto skutečnostem se předpokládá, že ostatní scénáře nejsou v podmínkách JE Dukovany proveditelné, a proto byl zvolen červený scénář viz Obrázek 18.

Předpokládá se, že posádka má důvěru v účinnost předložených pokynů, i přes možné nepříznivé důsledky. Na základě konzultací se předpokládá, že dodržování havarijního postupu při řešení mimořádných situací je povinné, a tento postup se často cvičí na trenažéru.

Také se předpokládá, že posádka má motivaci k opatrnosti, a proto má tendenci dodržovat postupy.

Dle těchto informací byla stanovena pravděpodobnost chyb v rozhodovacím stromu:

Pch <0,0001 (a), (zanedbatelná)



Obrázek 18 Úmyslné porušení

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.9 Opravy kognitivní chyby

Opravy kognitivních chyb mohou být zjištěny a opraveny ještě před tím, než mají negativní vliv na odezvu obsluhy v mimořádné nebo havarijní situaci. Hra Calculator poskytuje několik možností, jak lze kognitivní chybu odhalit. Při hodnocení lidské chyby je pravděpodobnost nesprávné interpretace pokynů nenulová. Extra Crew (další člen posádky nebo jiný člen obsluhy) viz Obrázek 19, tato položka může být klíčová pro odhalení chyby, zatímco položka „kontrola bezpečnostního inženýra“ (STA Review) není v tomto případě použitelná, jelikož by nebylo možné včas zajistit přítomnost bezpečnostního inženýra BD.

Recovery Factors Applied to Pc											
	Branch	Initial HEP	Self Review	Extra Crew	STA Review	Shift Change	ERF Review	DF	Multiply By	Override Value	Final Value
			More Info	More Info	More Info	More Info	More Info				
pca	a	0.0	NC	5,00E-01	NC	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pcb	a	0.0	1,00E-01	NC	1,00E-01	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pcc	a	0.0	NC	NC	1,00E-01	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pcd	a	0.0	NC	5,00E-01	1,00E-01	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pce		neg	1,00E-01	5,00E-01	NC	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pcf	a	0.0	NC	5,00E-01	1,00E-01	X	X		1,00E+00		0,00E+00
pcg	i	3,30E-04	NC	5,00E-01	1,00E-01	X	X		5,00E-01		1,65E-04
pch	a	0.0	NC	1,00E-01	1,00E-01	NC	NC		1,00E+00		0,00E+00

Double click on cell to select

Sum of recovered Pc(a) through Pc(h) = Recovered Pc

1,65E-04

Notes/Assumptions:

Obrázek 19 Recovery CBDTM

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

V situaci, kdy došlo k neodstavení reaktoru a bylo nutné zavést bór do AZ se očekávalo, že druhý člen posádky bude věnovat vysokou pozornost spolu s přítomností VRB. To vedlo k zaškrtnutí položky Extra Crew u položky nesprávná interpretace pokynů, což snížilo pravděpodobnost chyby na polovinu. Oprava pravděpodobnosti byla stanovena na:

$$\text{Recovery pcf} = 5,0\text{E-1}$$

Poznámka: Pravděpodobnosti opravy chyb jsou v programu pevně stanovené a nelze je měnit.

6.2.10 Faktory ovlivňující lidský výkon

Faktory ovlivňující lidský výkon byly analyzovány s ohledem na běžné podmínky na BD, přičemž nebyly uvažovány žádné abnormální faktory, jako je extrémní osvětlení, teplota nebo radiace. Dále se předpokládá, že atmosféra je normální na BD. Tyto faktory byly prokonzultovány a na základě domluvy s ČEZ a.s. útvar PSA, byly vybrány faktory ovlivňující výkon viz Obrázek 20.

The screenshot displays the HRA Calculator interface with the following settings:

- Environment:**
 - Lighting:** ☒ Normal, ☐ Emergency, ☐ Portable
 - Heat/Humidity:** ☒ Normal, ☐ Hot/Humid, ☐ Cold
 - Radiation:** ☒ Non Radiation Area, ☐ Radiation Area, ☐ High Radiation Area, ☐ Very High Radiation Area
 - Atmosphere:** ☒ Normal, ☐ Respirator required, ☐ Steam, ☐ Smoke
- Special Requirements:**
 - Tools:** ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available
 - Parts:** ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available
 - Clothing:** ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available
- Complexity of Response (Execution):** ☒ Complex, ☐ Simple
- Equipment Accessibility:**
 - Location:** Bloková dozoma
 - Accessibility:** Accessible

Obrázek 20 Faktory ovlivňující výkon člověka

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Vzhledem k nutnosti provedení několika manipulací v časovém stresu podle popisu havarijního postupu FR-S.1 bylo stanoveno:

Complexity of Response = „Complex“

6.2.11 Stres při provádění

Následně byla hodnocená úroveň stresu při IU ATWS. Stres při provádění byl hodnocen na základě tři úrovní stresu používaných při hodnocení metodou THERP: nízký stres: PSF=1, střední stres: PSF=2, vysoký stres: PSF=5 viz Obrázek 21. Úroveň stresu je považována za klíčový faktor, neboť určuje koeficient při výpočtu HEP.

Plant Response As Expected	Workload	PSFs	Stress
Yes	Low	Optimal	Low
		Negative	Moderate
	High	Optimal	Moderate
		Negative	High
No			High

Obrázek 21 Stres při provádění

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Jelikož se jedná o velmi rychlou IU a je zde čas na provedení činnosti omezen, byla na základě havarijního postupu FR-S.1 stanovena úroveň stresu vysoká:

Stress = High

6.2.12 THERP analýza

THERP analýza je prováděná podle postupu FR-S.1 viz Obrázek 22. Jsou zde uvedeny všechny příslušné procedurální kroky v postupném pořadí. Na základě tohoto výpočtu byly zvoleny procesní kroky 20-7b z tabulky viz Obrázek 23 a Obrázek 24, protože se jedná o instrukce použité z popisného postupu (havarijní postup FR-S.1), krok za krokem. V tomto případě byla vybrána pouze jedna varianta, zatímco jiné byly vyloučeny viz Obrázek 23. Byly vybrány chyby provádění THERP první varianta, protože k této rychlé IU seděla nejlépe.

Při kvantifikaci pravděpodobnosti chyby provedení se podle popisu situace a použitého havarijního postupu vybírají odkazy na tabulky a položky tabulek NUREG 1278, které jsou popsány v Příloze B manuál HRA Calculatoru, viz obrázky 22 až 28.

Pravděpodobnost chyby provedení byla stanovena na: $1,3E-3$

The screenshot shows the HRA Calculator interface. The 'Step' field is set to 3. The 'Instruction' field contains the text 'Najeď všechna TJ čerpadla a otevři výtahy pro zvýšení cb v I.O'. The 'Stress' field is set to 'High'. The 'Table Reference' dropdown is set to '20-7b'. The 'Item Reference' dropdown is set to '1'. The 'Location' field contains 'Bloková dozoma'. The 'Comment' field is empty. A table of error types is displayed, with '20-7b' selected. The table has columns 'ID' and 'Table'. The selected row is '20-7b' with the description 'Omission per item of instruction when using a step-by-step procedure (Table 20-7 - reduced by factor of 3)'. Other rows include '20-8a', '20-8b', '20-7', and '99'.

ID	Table
20-8a	Estimated probabilities of errors in recalling oral instruction items not written down - Oral Instructions are detailed (Table 20-8a)
20-8b	Estimated probabilities of errors in recalling oral instruction items not written down - Oral Instructions are general (Table 20-8b)
20-7	Omission per item of instruction when using a narrative procedure (Table 20-7)
20-7b	Omission per item of instruction when using a step-by-step procedure (Table 20-7 - reduced by factor of 3)
99	Basic error of omission (ASEP)

Obrázek 22 Procesní kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

THERP Table 20-07					
Table	Item	Description	EF	Median	Mean
20-07	1	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Short list, <= 10 items.	3	0.001	1.25E-03
20-07	2	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Long list, > 10 items.	3	0.003	3.75E-03
20-07	3	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Short list, <= 10 items.	3	0.003	3.75E-03
20-07	4	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Long list, > 10 items.	3	0.01	1.25E-02
20-07	5	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used.	5	0.05	8.07E-02
20-07	5a	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used - if the task is judged to be "second nature"	5	0.01	1.61E-02

Obrázek 23 Chyby provádění THERP

(zdroj: školení HRA Calculator, 2025)

Step:

Instruction:

Stress:

Table Reference:

Item Reference: Mean

Location:

Comment:

Item	Description	Probability
1	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Short list, <= 10 items.	4.3E-4
2	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Long list, > 10 items.	1.3E-3
3	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Short list, <= 10 items.	1.3E-3
4	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Long list, > 10 items.	4.3E-3
5	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used.	2.7E-2
5a	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used - if the task is judged to be "second nature".	5.4E-3

Obrázek 24 Procesní kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Podle havarijního postupu FR-S.1 byla zvolená tabulka 20-12 viz Obrázek 25 a Obrázek 26 (Ruční ovládání) a řádek 4 (Výběr nesprávného ovládacího prvku na panelu z řady podobných ovládacích prvků).

Table Reference	20-12			
Item Reference	Table	Group	Title	Description
Mean	20-9	Displays	Display Selection (Table 20-9)	Selecting unannunciated displays (or annunciated displays no longer annunciating) (Table 20-9)
Description:	20-10	Displays	Read/Record Quantitative (Table 20-10)	Recovery: reading and recording quantitative info, unannunciated displays (Table 20-10)
	20-11	Displays	Check-Read Quantitative (Table 20-11)	Recovery: check-reading displays (Table 20-11)
	20-12	Manual Controls	Selection & Use (Table 20-12)	Operating manual controls (Table 20-12)
	20-13	Locally Operated Valves	Selection (Table 20-13)	Selection errors for locally-operated valves (Table 20-13)
	20-14	Locally Operated Valves	Stuck Valve Detection (Table 20-14)	Recovery: detecting stuck locally-operated valves (Table 20-14)
	20-22	Pre-Initiator Recovery Factors	Errors by Checker (Table 20-22)	Recovery: checker fails to detect errors made by others (Table 20-22)
	99		Basic error of commission (ASEP)	Basic error of commission (ASEP)

Obrázek 25 Procesní kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Table	Item	Description	EF	Median	Mean
20-12	1	Inadvertent activation of a control			
20-12	2	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls identified by labels only	3	0.003	3.75E-03
20-12	3	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls arranged in well-delineated functional groups	3	0.001	1.25E-03
20-12	4	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls which are part of a well-defined mimic layout	10	0.0005	1.33E-03
20-12	5	Turn multi-position rotary control in wrong direction when there is no violation of populational stereotype (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	10	0.0005	1.33E-03
20-12	6	Turn multi-position rotary control in wrong direction when design violates a strong populational stereotype and operating conditions are normal (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	5	0.05	8.07E-02
20-12	7	Turn multi-position rotary control in wrong direction when design violates a strong populational stereotype and operation is under high stress (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	5	0.5	8.07E-01

Obrázek 26 Chyby při provádění THERP

(zdroj: školení HRA Calculator, 2025)

Pravděpodobnost chyby provedení viz Obrázek 27 byla stanovená na: 1,3E-3

Table Reference: 20-12

Item Reference: 4

More Info...

Mean:

Description:

Item	Description	Probability
1	Inadvertent activation of a control	neg.
1a	Select wrong control when it is dissimilar to adjacent controls	neg.
2	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls identified by labels only	3.8E-3
3	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls arranged in well-delineated functional groups	1.3E-3
4	Select wrong control on a panel from an array of similar-appearing controls which are part of a well-defined mimic layout	1.3E-3
5	Turn multi-position rotary control in wrong direction when there is no violation of populational stereotype (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	1.3E-3
6	Turn multi-position rotary control in wrong direction when design violates a strong populational stereotype and operating conditions are normal (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	8.1E-2
7	Turn multi-position rotary control in wrong direction when design violates a strong populational stereotype and operation is under high stress (for rotary switches with only two positions, see items 8A-8C)	8.1E-1

OK Cancel

20-12 Select appear layout

Obrázek 27 Procesní kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

6.2.13 Náprava chyby provedení

Dalším krokem ve výpočtu byl mezikrok náprava chyby provedení. Náprava chyby provedení zahrnuje návrh nápravných kroků pro různé chyby identifikované v předchozích fázích viz Obrázek 28. Byl zvolen nápravný krok z pravého sloupce havarijního postupu FR-S.1, který popisuje činnost při neprovedeném kroku v levém sloupci. Předpokládá se, že tyto kroky následují těsně za sebou, a proto byla zadána úroveň závislosti mezi těmito činnostmi. Dále se předpokládá, že operátor, který nesprávně provedl první krok, provede nesprávně i

nápravný krok. Úroveň této závislosti byla stanovena jako vysoká a pravděpodobnost byla určena na:

$$\text{Úroveň závislosti} = \text{„High“ (pravděpodobnost} = 5,04\text{E-1)}$$

The screenshot shows the 'Basic Event' window in the HRA Calculator. The 'BE ID' is HE-1RP00-P-02. The 'Description' is 'Selhání obsluhy BD pro rychle vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)'. The 'Suggested Dependency' is HD. The 'Total' probability is 2,85E-02. Below this is a table with columns: Critical Step, Action, Recovered Probability, and Assign Recovery Step. The table shows a critical step '3' with the action 'Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení cb v I.O.' and a recovered probability of 2,85E-02. Below this is a table with columns: Recovery Step, Dependency, Probability, and Comment. The table shows a recovery step '3d' with a dependency of 'High (HD)' and a probability of 5,04E-01.

Critical Step	Action	Recovered Probability	Assign Recovery Step
3	Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení cb v I.O.	2,85E-02	Click to add Recovery Step...

Recovery Step	Dependency	Probability	Comment
3d	High (HD)	5,04E-01	

Obrázek 28 Náprava chyby provedení

(zdroj: HRA Calculator)

6.3 Výsledek výpočtu

Program HRA Calculator provedl hodnocení všech zadaných parametrů lidské chyby, viz Obrázek 29. Pravděpodobnost této chyby byla zobrazena jako dílčí výpočty jednotlivých fází, tak i jako celkový výsledek výpočtu.

The screenshot shows the 'Summary' window in the HRA Calculator. The window title is 'Summary x HE-1RP00-P-02'. The 'Find' field is empty. The 'Short Display' button is selected. The 'Long Display' button is also visible. The file path is 'C:\Users\kuceralad\Documents\PSA\CAFTA\EDU\EDU_HRA\HRA-EDU_1.hra'. The '# of Human Failure Events: 1' is displayed. Below this is a table with columns: Basic Event, Method, P(cog), P(exe), Total HEP, Pre/Post, Risk Signifi, and Basic Event Description. The table shows a basic event 'HE-1RP00-P-02' with a method of 'CBOTM/THERP', a P(cog) of 1,65E-04, a P(exe) of 2,85E-02, a Total HEP of 2,87E-02, a Pre/Post of 'Post', a Risk Signifi of 'NO', and a Basic Event Description of 'Selhání obsluhy BD pro rychle vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)'.

Basic Event	Method	P(cog)	P(exe)	Total HEP	Pre/Post	Risk Signifi	Basic Event Description
HE-1RP00-P-02	CBOTM/THERP	1,65E-04	2,85E-02	2,87E-02	Post	NO	Selhání obsluhy BD pro rychle vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)

Obrázek 29 Výsledek výpočtu

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Lidská chyba „Selhání obsluhy BD pro rychle vytvoření odstavné koncentrace“ má podle výše uvedeného postupu v HRA Calculatoru pravděpodobnost stanovenou na 2,87E-2. V porovnání s výsledkem od ÚJV Řež, a.s., kde byla tato chyba vyhodnocena na 1,82E-02, se jasně ukazuje, jak významně může HRA Calculator přispět k přesnějšímu hodnocení pravděpodobnosti lidské chyby.

SROVNÁNÍ VÝPOČTU V PRAXI

Bylo provedeno porovnání výpočtu pracovníky ÚJV Řež, a.s., kteří standardně analyzují lidský faktor pro JE, s nově implementovaným výpočtem v HRA Calculatoru. Obě metody se zabývají stejnou chybou.

MKŘ z modelu PSA EDU pro 1. blok v režimu 1 (plný výkon) s původní hodnotou lidské chyby HE-1RP00-P-02, která činila $1,83\text{E-}02$, vedla k hodnotě CDF:

$$\text{CDF}=8,62\text{E-}07$$

Naopak MKŘ s hodnotou lidské chyby HE-1RP00-P-02, vypočítanou pomocí HRA Calculatoru jako $2,87\text{E-}02$, vedly k hodnotě:

$$\text{CDF}=9,52\text{E-}07$$

Hodnota pravděpodobnosti lidské chyby HE-1RP00-P-02 byla v programu HRA Calculator stanovená na $2,87\text{E-}02$, zatímco původní hodnota, byla podle dokumentace PSA z ÚJV Řež, zjednodušenou metodikou vyčíslena jako $1,83\text{E-}02$. Rozdíl mezi těmito hodnotami lze přičíst podrobnější metodě v HRA Calculator, která přesněji zohledňuje časový stres, přičemž bylo zahrnuto, že operátoři mají na kognitivní a prováděcí fázi přibližně 5 minut.

Celková hodnota CDF pro 1. blok v režimu 1 se tímto zvýšila z $8,62\text{E-}07$ na $9,52\text{E-}07$, což představuje nárůst o přibližně 10 %. Důležité je, že vypočítaná hodnota pravděpodobnosti je podobná jako u ÚJV Řež, a.s., i když malinko vyšší. Tento rozdíl podtrhuje, že je tento software vhodný pro výpočty PSA. Důležitost této lidské chyby, jak bylo určeno i jiným výpočtem, ukazuje nutnost zaměřit se na nácvik odstavné koncentrace na trenažéru. Rovněž je důležité zlepšit havarijní předpisy nebo realizovat další technologická opatření ke snížení pravděpodobnosti a následků této chyby.

7 METODICKÁ PŘÍRUČKA

Cílem metodické příručky je poskytnout metodickou příručku zaměstnancům společnosti ČEZ, a.s., kteří pracují s analýzou rizik spojenou s lidským faktorem v oblasti JB. Příručka poskytuje pokyny pro hodnocení rizik pomocí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti (PSA) a softwaru pro hodnocení HRA Calculator.

CÍLOVÁ SKUPINA

Metodická příručka je určena všem zaměstnancům ČEZ, a.s. kteří pracují s analýzou rizik spojenou s lidským faktorem v oblasti JB. Cílovou skupinu tvoří všichni, kteří pracují s lidskými chybami a využijí k tomu software HRA Calculator.

OČEKÁVANÉ PŘÍNOSY

Metodická příručka definuje jednotlivé kroky výpočtu lidské chyby v HRA Calculator. Dříve výpočty těchto chyb prováděla dodavatelská organizace ÚJV Řež, a.s., a byly počítány ručně. Program HRA Calculator zajišťuje komplexní řešení a je navržen, tak aby pomáhal odborníkům kvantifikovat rizika spojená s lidským faktorem. Tato metodická příručka poslouží k zavedení HRA Calculatoru na JE Dukovany a Temelín.

JEDNOTLIVÉ METODY PRO ŘEŠENÍ POST-INICIAČNÍCH UDÁLOSTÍ LIDSKÝCH CHYB

V tomto kroku musí být vybrána jednotlivá metoda hodnocení pracovníkem viz Obrázek 30.

CBDTM/THERP:

Tato metoda (Cognitive Based Dynamic Task Management / Technique for Human Error Rate Prediction) je zaměřena na analýzu výstupů z chyb a dále na pravděpodobnost jejich vzniku. Je založená na studiu chování lidí v konkrétních situacích a na schopnosti reagovat na různé podněty. Pomocí této metody je hodnocená složitost úkolů a jejich vliv na vznik chyb, což přispívá k lepšímu pochopení reakcí operátorů v různých scénářích. Díky tomu jsou navrhovány efektivnější pracovní postupy.

HCR/ORE/THERP:

Tato empirická metoda, (Human Cognitive Reliability / Operator Reliability Evaluation / Technique for Human Error Prediction) kombinuje analýzu lidského faktoru s hodnocením pravděpodobnosti výskytu lidských chyb. Zaměřuje se na situace, kde je řešen vztah mezi

časem a spolehlivostí. Pomocí této metody jsou analyzovány různé scénáře, které by mohly vést k chybám, a jsou identifikována pravděpodobná rizika.

Annunciator Response/THERP:

Tato metoda je specializována na reakce operátorů na alarmy a signály. Používá se v kontextu, kdy je nutné, aby operátoři rychle a správně reagovali na varování. V rámci této metody jsou hodnoceny reakce operátorů na signály a jsou zkoumány podmínky, které je mohou ovlivňovat. Zde jsou identifikovány slabé oblasti a navrhovaná školení či optimalizace pracovních postupů.

SHAR-H:

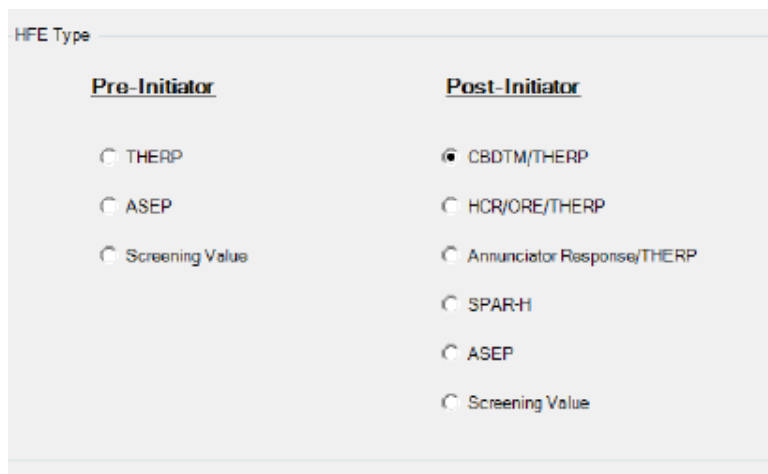
Tato metoda (Standardized Human Action Reliability – Human) je využívána pro analýzu lidských chyb a zaměřuje se na identifikaci a hodnocení lidského faktoru. Prostřednictvím této metody jsou shromažďována data o lidském chování v různých situacích, a tyto důvody jsou hodnoceny. Cílem je vylepšit pracovní systémy a procesy, aby se staly pro lidi bezpečnějšími a efektivnějšími.

ASEP:

Tato metoda se zaměřuje na zjednodušený přístup, který je založen na expertních odhadech. Částečně modernizuje metodikou THERP. ASEP je v současnosti považován za klíčový prvek pro kvantifikaci manipulativních činností spojených s obsluhou.

Screening Value:

Tato metoda je využívána pro rychlé zhodnocení a filtrování rizikových faktorů. Pomocí této metodiky jsou identifikovány oblasti, které vyžadují podrobnější analýzu. Tento přístup může být efektivní při hodnocení více faktorů najednou a je využíván spíše na začátku analýzy.



Obrázek 30 Jednotlivé metody

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

PŘÍZNAKY POŽADOVANÉ LIDSKÉ ČINNOSTI

Příznaky (Cues) jsou klíčové indikátory, které upozorňují na potřebu vykonání konkrétní akce k rámci provozu. Správné rozpoznání těchto příznaků je považováno za nezbytné pro efektivní a včasnou reakci personálu na vznikající situace. Aby mohl být příznak k hodnocené lidské chybě přidán, musí být nejprve zadán do knihovny příznaků (Cues).

1. Otevření knihovny (Cues):

Tlačítko příznaky „Cues“ umístěné v horní liště karet Libraries viz Obrázek 31.

2. Zadání příznaku:

Požadovaný příznak musí být zadán do příslušného pole viz Obrázek 32.

3. Uložení příznaku:

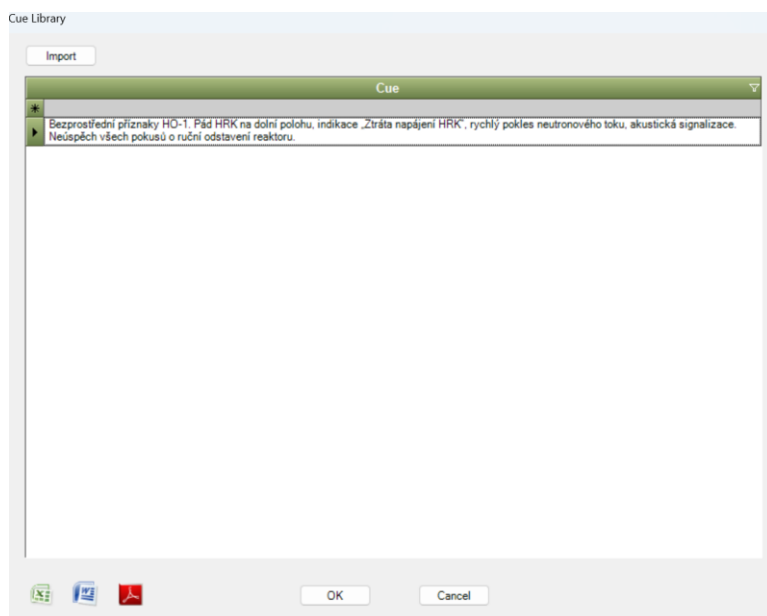
Po zadání příznaku musí být stisknuto tlačítko pro uložení. Uživatel se poté vrátí do okna Basic Event

4. Vložení počáteční události:

V okně Cues se vloží příznak pomocí tlačítka Select.

Procedures	Locations	LER Screening
Cues	Screening Criteria	Step Library
Timing	Procedure Screening	Instrumentation
Libraries		

Obrázek 31 Knihovny v HRA Calculátor

(zdroj: *HRA Calculator*, 2025)

Obrázek 32 Knihovna příznaků

(zdroj: *HRA Calculator*, 2025)

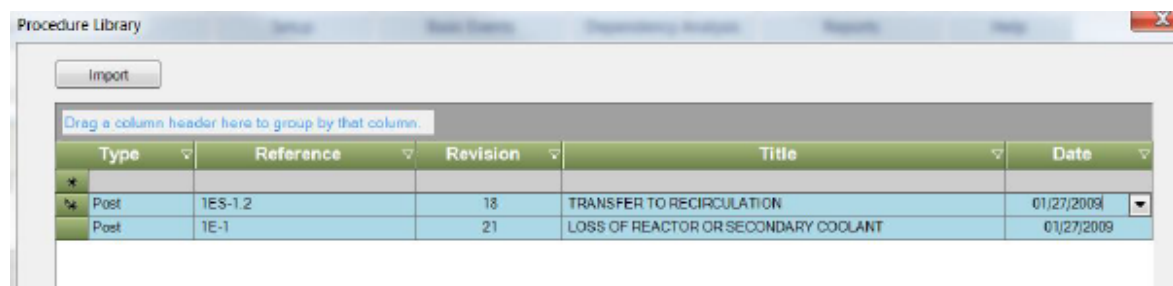
ZADÁVÁNÍ HAVARIJNÍCH PŘEDPISŮ PŘI HODNOCENÍ LIDSKÉ CHYBY

Zadávání havarijních předpisů do systému HRA Calculator je považováno za klíčový krok, který zajišťuje hodnocení lidských chyb a jejich potenciálních dopadů na bezpečnost v oblasti jaderné energetiky. Tato část procesu zajišťuje, že personál má přístup k jasným a přehledným instrukcím. Ty jsou považovány za pomoc při minimalizaci rizika vzniku chyb a zajištění efektivních reakcí v kritických situacích.

V HRA Calculatoru jsou předpisy zadávány do knihovny Procedures and Training – z havarijního předpisu a dále také do knihovny procedur. Postupuje se obdobně jako u příznaků Cues.

Postup nastavení knihovny:

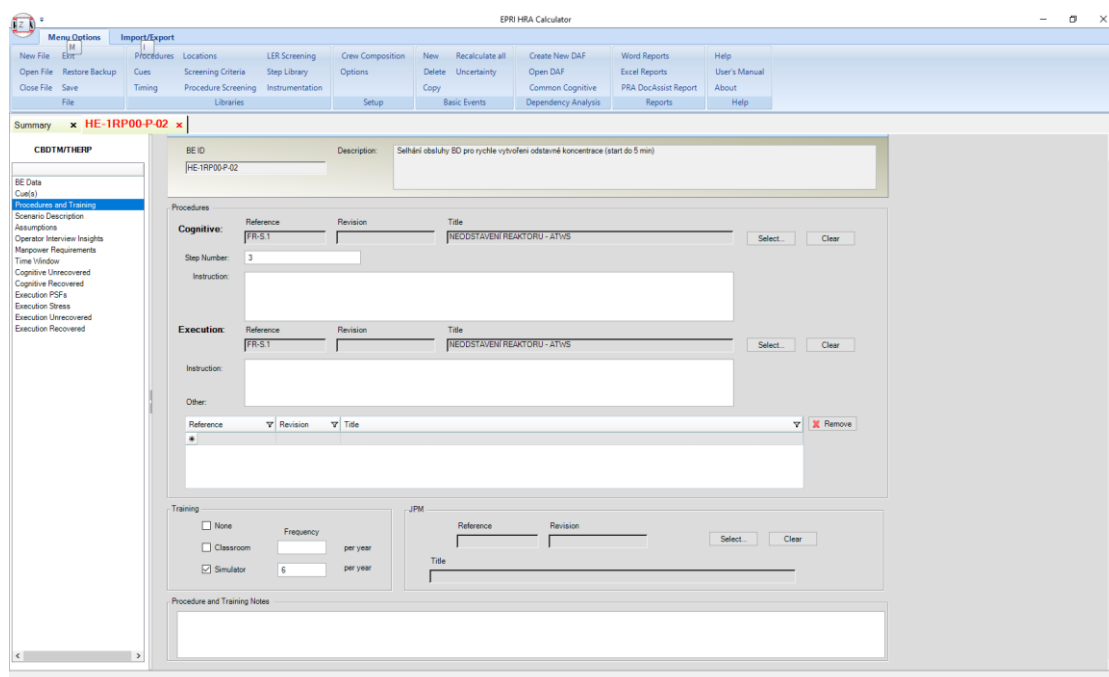
1. Klikněte na „Procedures“ na kartě Libraries, čímž se otevře okno pro vložení postupu, viz Obrázek 33.
2. Musí být zadán název havarijního předpisu pro danou IU.
3. Poté je nutné popsat název akce a uložit změny.



Obrázek 33 Knihovna procedur

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Havarijní předpisy se zadávají jak do políčka Cognitive, tak do políčka Execution, a to prostřednictvím tlačítka Select viz Obrázek 34. Je důležité zadat, jak často probíhá školení nebo cvičení na trenažéru (kolikrát za rok).

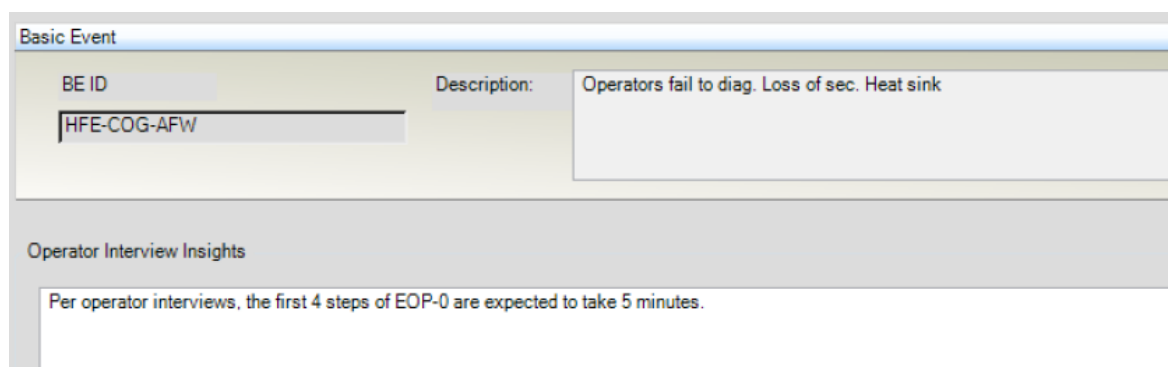


Obrázek 34 Vložení postupu

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

KAM SE OBRÁTIT, KDYŽ NENÍ NALEZEN POPIS ČINNOSTÍ V HAVARIJNÍM PŘEDPISU

Pokud nebude nalezen popis činností v havarijním předpisu, je nutné kontaktovat odpovědné osoby v interním týmu (např. provést rozhovory s operátory), odborníka na JB, BI, SI nebo personál trenažéru. Do velkého textového pole musí být zaznamenány poznámky a postřehy z rozhovoru s operátorem, viz 6.2.5 a viz Obrázek 35.



Obrázek 35 Rozhovor s operátorem

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

ZJIŠTĚNÍ POTŘEBNÉHO PERSONÁLU PRO PROVEDENÍ POŽADOVANÉ LIDSKÉ AKCE

1. Zadání počtu osob: V poli „Manpower Requirements“ musí být uveden počet osob potřebných ke spuštění požadované akce.

2. Úprava složení směny: Jednotlivá pole mohou být přepisována dle potřeby, což umožňuje měnit složení směny. To se provádí v položce menu Crew Composition na kartě Setup.

- V prvním sloupci je zobrazeno výchozí složení směny.
- Ve druhém sloupci je uvedeno, zda je člen směny zahrnut do analýzy závislostí, či nikoli viz Obrázek 36.

Crew Member	Total	Include	Notes
VRB	1	☒	
SI	1	☒	
BI	1	☐	
OPO	1	☒	
OSO	1	☒	
Strojníci	2	☒	
Elektrikáři	2	☒	
I&C Technicians	2	☒	
Health Physics Technicians	2	☐	
Chemistry Technicians	1	☐	
*		☐	

Shift Length: 12 Hours

ERF Activation Time: 60 Minutes

STA Activation Time: 15 Minutes

OK Cancel

Obrázek 36 Změna pracovního týmu

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

3. Požadované složení směny: Aby bylo HFE proveditelné, musí být složení směny větší než požadovaná pracovní síla.

4. Požadavky na pracovní sílu: Požadavky na pracovní sílu (tedy počet pracovníků) se zadávají do sloupce Required to Execution a jsou používány při kvantifikaci závislostí, viz Obrázek 37.

Crew Member	Total Available	Include in Dependency Analysis	Notes from Setup	Required for Execution	Notes
VRB	1	☒		1	
SI	1	☒		0	
BI	1	☐		0	
OPO	1	☒		1	
OSO	1	☒		1	
Strojníci	2	☒		0	
Elektrikáři	2	☒		0	
I&C Technicians	2	☒		0	
Health Physics Technicians	2	☐		0	
Chemistry Technicians	1	☐		0	

Obrázek 37 Manpower Requirements

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

JEDNOTLIVÉ DOBY ČASOVÝCH OKEN

Z pohledu všech známých metod analýz spolehlivosti lidského činitele, není považována přesná hodnota časového okna za extrémně důležitou. Klíčové je dodržení jisté minimální prahové hodnoty, která zajišťuje, že operátor je schopen danou akci provést bez spěchu a s dostatečnou časovou rezervou pro zvažování a související rozhodování. Tyto minimální prahové hodnoty jsou stanoveny na základě empirických studií a zkušeností z praxe.

Empirické studie naznačují, jaký čas je potřebný pro efektivní výkon specifických úloh. Obvykle se tato hodnota pohybuje v rozmezí 30 minut až 1 hodiny, což se ukazuje jako optimální časové okno pro mnoho operací v oblasti jaderné energetiky a dalších kritických odvětví. Pokud operátor disponuje tímto časem, může efektivně plánovat své aktivity, přezkoumávat informace a provádět nezbytné opravy, čímž se minimalizuje riziko vzniku lidských chyb.

Pro analýzu časových oken a jejich dopad na rozhodovací procesy byly vyvinuty různé kategorie závislosti na čase, které se odrážejí v doporučené míře závislosti na čase dostupném pro nápravu chyby. Tyto úrovně závislosti mohou být rozděleny do několika kategorií, jak je uvedeno viz Tabulka 3 níže:

Tabulka 3 Minimální doporučená míra závislosti na čase dostupném pro nápravu chyby

Minimální doporučená úroveň závislosti pro kognitivní a exekuční zotavení	Čas dostupný pro obnovu (minuty) $T_{rec} = T_{sw} - T_{del} - T_{cog} - T_{exe}$	Pravděpodobnost
ZD (nulová závislost)	$60 < T_{rec}$	0
LD (nízká závislost)	$30 < T_{rec} \leq 60$	0,05
MD (střední závislost)	$15 < T_{rec} \leq 30$	0,14
HD (vysoká závislost)	$0 \leq T_{rec} \leq 15$	0,5
plná závislost	$T_{rec} \leq 0$	1,0

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

ZD (nulová závislost): Zde je požadavkem, aby byl čas dostupný pro nápravu delší než 60 minut. Takové situace zajišťují, že operátor má dostatek času na zjištění chyby a její nápravu.

Plná závislost: V této kategorii je nastaveno, že operátor může udělat dvě chyby, po sobě s pravděpodobností 1. To znamená, že pokud dojde k první chybě, existuje jistota, že operátor provede druhou chybu při reakci na situaci.

VÝZNAM ČASOVÝCH OKEN

Čas začátku: V některých případech může začátek události předcházet odstavení reaktoru, například unikem z potrubí, který musí být izolován v určitém čase, úspěšný zásah obsluhy může zabránit odstavení reaktoru.

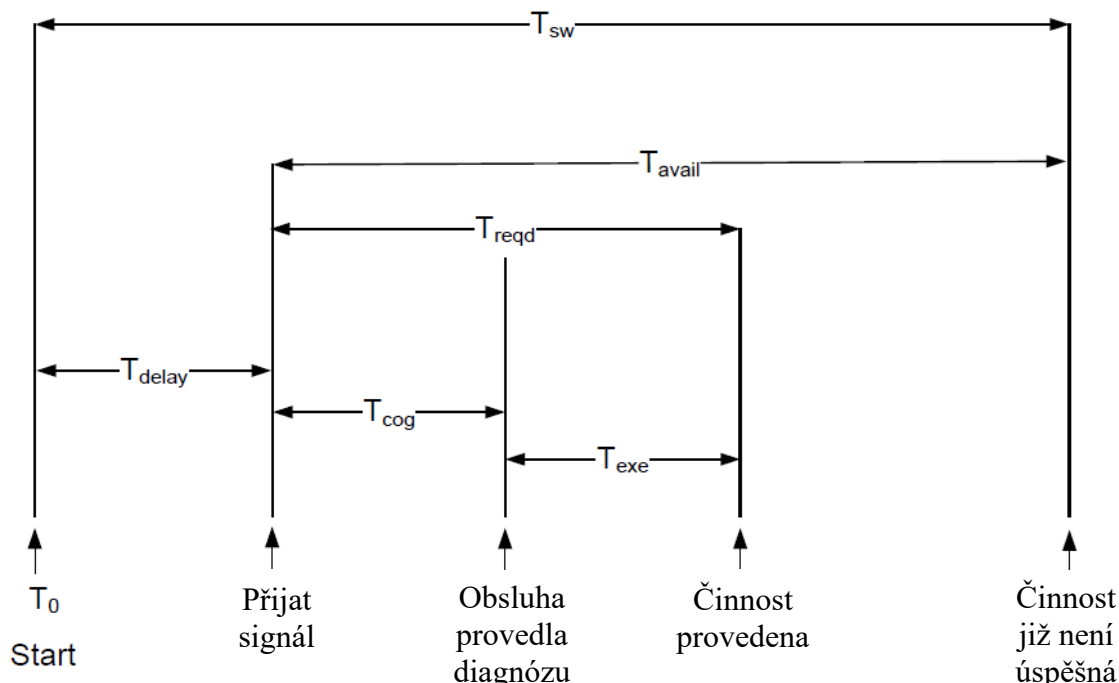
V těchto případech musí být T_0 zachován jako čas odstavení reaktoru, a události před T_0 budou mít záporný čas viz Obrázek 38.

Systémové časové okno (T_{sw}) je považováno za maximální dobu, která je k dispozici na provedení daného úkolu. T_{sw} je definováno jako doba od začátku události, do doby, kdy již není zásah považován za prospěšný. T_{sw} je obvykle odvozováno z tepelně-hydraulických analýz a pro kvantifikaci HRA je považováno za statický vstup. Časové okno systému představuje maximální dobu, která je k dispozici pro danou činnost.

Doba zpoždění (T_{delay}) představuje čas od začátku události do okamžiku, kdy je potvrzen signál operátory. T_{delay} je funkcí odezvy bloku zařízení a odezvy obsluhy. Jsou zohledňována případná zpoždění vyplývající z pracovních postupů, nebo odpovědi na signál. Například pokud je příznak činnosti dán krokem v postupu, T_{delay} by byl čas, který operátorům trvá dosáhnout tohoto kroku. Tyto informace jsou získávány prostřednictvím pozorování na simulátoru nebo rozhovorů s operátory. Pokud je příznakem k zahájení činnosti alarm, dosažení nízké hladiny v nádrži, T_{delay} by byla doba potřebná ke snížení hladiny v nádrži na hodnotu, při které dojde k alarmu, a potvrzení alarmu obsluhou. Tato informace může být získána z tepelně hydraulických analýz. T_{delay} je vždy kladné číslo, ale pokud je použit záporný čas začátku, čas skutečného příznaku se vyjadřuje jako součet T_{start} a T_{delay} .

Čas kognitivní fáze (T_{cog}) je definován, jako doba rozpoznání a zahrnuje dobu zjištění události, diagnostiky a rozhodování. Lze získat pozorováním na simulátoru nebo alternativně prostřednictvím rozhovoru s operátory.

Doba provedení (T_{exe}) je definována, jako doba potřebná k provedení činnosti. Je to doba, za kterou je činnost provedena operátory po úspěšné diagnostice. Zahrnuje dobu přechodu k zařízení, dobu na vyzvednutí a nasazení OOP a dobu nutnou pro manipulaci se zařízením.



Obrázek 38 Časové okno

(zdroj: *Manuál HRA Calculator*, 2025)

Pojmy spojené s jednotlivými prvky jsou definovány níže a popsány v následujícím textu dle (*Manuál HRA Calculator*, 2017):

- T_0 = čas začátku = začátek události (obvykle odstavení reaktoru, v tomto případě neodstavení reaktoru, viz 6.2.7 výpočet časová okna),
- T_{delay} = časová prodleva = doba, za kterou operátor potvrzuje pokyn,
- T_{sw} = časové okno systému,
- T_{avail} = dostupný čas = čas dostupný pro činnost = $(T_{sw} - T_{delay})$,
- T_{cog} = čas kognitivní fáze, skládající se ze zjištění IU, diagnostiky a rozhodování,
- T_{exe} = doba provedení, včetně přechodu na místo, případně vyzvednutí náradí, nasazení osobních ochranných prostředků (dále jen „OOP“) a manipulace s příslušným zařízením,
- T_{reqd} = doba potřebná k provedení činnosti = $(T_{cog} + T_{exe})$

Strukturování časové osy tímto způsobem umožňuje analytikovi prokázat proveditelnost činnosti z hlediska načasování (Manuál HRA Calculator, 2017).

Zásah operátora se předpokládá za proveditelný pouze tehdy, když je doba potřebná k provedení akce kratší než doba, která je k dispozici. Časová dostupnost (T_{avail}) se skládá z časového okna systému (T_{sw}) minus časové zpoždění (T_{delay}), dokud není přijat příslušný podnět k činnosti. Potřebný čas (T_{reqd}) se skládá z doby, kdy je určena potřebná činnost (T_{cog}), a doby nutné k provedení činnosti (T_{exe}); tato doba je nazývána též dobou odezvy obsluhy. Každý z prvků časování, včetně času zahájení, je dále definován (Manuál HRA Calculator, 2017).

Zadání dat v časovém okně

Následující kroky jsou uvedeny pro ilustraci toho, jak jsou zadávány a upravovány informace o časování:

1. Systémové časové okno (T_{sw}) musí být zadáno do pole časové okno Systému.
2. Čas zahájení události musí být zadán. Obvykle se to shoduje s vypnutím reaktoru a musí zůstat na 0. Pokud událost začíná před odstavením reaktoru, například při izolaci záplavy, může být zadán záporný čas, aby byl zachován čas $T=0$ jako čas vypnutí reaktoru. Počáteční čas může být pouze 0 nebo záporný a používá stejné jednotky, jaké byly vybrány pro T_{sw} .
3. Vhodná časová jednotka musí být vybrána z rozevíracího seznamu Jednotka vedle položky Časové okno systému. Tato jednotka platí jak pro T_{sw} , tak pro čas zahájení.
4. Zpoždění od začátku přechodového jevu/IU do okamžiku pokynu musí být zadáno do pole T_{delay} . Toto je čas pokynu k činnosti, který se může shodovat s odstavením reaktoru, v takovém případě by měl být ponechán na 0. T_{delay} je vždy kladné číslo, ale pokud je použit záporný čas začátku, čas skutečného signálu je součtem T_{start} a T_{delay} .
5. Příslušná časová jednotka musí být vybrána z rozevíracího seznamu Jednotka vedle položky T_{delay} .
6. Čas poznání musí být zadán do pole T_{cog} .
7. Příslušná časová jednotka musí být vybrána z rozevíracího seznamu. Jednotka vedle položky T_{cog} .
8. Čas provedení musí být zadán do pole T_{exe} .
9. Příslušná časová jednotka musí být vybrána z rozevíracího seznamu. Jednotka vedle T_{exe} .

10. V případě potřeby musí být upravená úroveň přiblížení, aby se všechny parametry časování zobrazily v plném rozsahu.

11. Odkazy nebo jiná specifická data o informacích o časování musí být zadána do pole Analýza časování (tj. spuštění MAAP, pozorování simulátoru, rozhovory s operátorem atd.).

12. Na základě výše uvedených údajů se vypočítává efektivní doba dostupná pro nápravu chyby. Na základě času, který je k dispozici pro obnovení, program navrhuje minimální úroveň závislosti použitelnou pro nápravu chyby. Jedná se o úroveň závislosti založenou pouze na načasování, takže úroveň závislosti by neměla být nižší než tato navrhovaná úroveň. Tato úroveň závislosti se v analýze šíří jako „globální proměnná“ a zobrazuje se jako poznámka k oknům nápravy chyby pro kognitivní i prováděcí.

VYBĚR HODNOT V ROHODOVACÍCH STROMECH

Rozhodovací stromy umožňují vizuálně a systematicky hodnotit různé scénáře a možné výsledky viz Obrázek 39. Pro zobrazení karty Cognitive Unrecovered je nutné kliknout na položku Cognitive Unrecovered v navigačním panelu na levé straně. Aby byla nastavená místa provádění pro událost, musí být vyplněna knihovny míst provádění. Je třeba kliknout na tlačítko Locations na kartě Libraries.

The screenshot displays the 'Cognitive Unrecovered' card in the HRA Calculator software. The interface is divided into several sections:

- Left Sidebar:** A tree view showing the project structure. The 'Cognitive Unrecovered' item is selected and highlighted in blue.
- Top Bar:** Shows the project name 'HE-1RP00-P-02' and a 'Summary' tab.
- Main Table:** A table titled 'Equipment Accessibility (Cognitive)' with columns for 'Branch', 'HEP', and 'Cue'. It lists various failure mechanisms (Pca, Pcb, Pcc, Pcd, Pce, Pcf, Pcg, Pch) with their corresponding HEP values and cues.
- Right Panel:** Contains a 'Cue' section with text describing the initial and recovery cues, and a 'Procedure' section with a dropdown for 'FR-S.1' and a 'Revision' field.

Failure Mechanism	Branch	HEP	Cue
Pca: Availability of information	a	0.0e+000	Initial Cue: Bezprostřední příznaky HO-1. Pád HRK na dolní polohu, indikace „Ztráta napájení HRK“, rychlý pokles neutronového toku, akustická signalizace. Neúspěch všech pokusů o ruční odstavení reaktoru. Recovery Cue: Dosáhnout snížení výkonu zaběháním primárního okruhu.
Pcb: Failure of attention	a	0.0e+000	
Pcc: Misread/miscommunicate data	a	0.0e+000	
Pcd: Information misleading	a	0.0e+000	
Pce: Skip a step in procedure		neg.	Procedure: FR-S.1 Step: Revision:
Pcf: Misinterpret instruction	a	0.0e+000	
Pcg: Misinterpret decision logic	i	3.3e-004	
Pch: Deliberate violation	a	0.0e+000	

Obrázek 39 Cognitive Unrecovered

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Výběr hodnot viz 6.2.8 a jejich popis:

Pca: Availability of information / Dostupnost informací

Odpovědi na otázky v rozhodovacím stromu viz Obrázek 40, se týkají dostupnosti potřebných informací pro rozhodování s jsou považována za klíčovou. Odpovědi v této oblasti mohou ovlivnit, jak dobře je prováděná analýza situace a jak správně může reagovat operátor.

Pcb: Failure Of Attention / Selhání pozornosti

Tyto otázky v rozhodovacím stromu se zaměřují na možnost, že pozornost operátora by mohla být ztracena během kritického úkolu. Selhání pozornosti je považováno za faktor, který může vést k opomenutí klíčových informací nebo kroků v procesu.

Pcc: Misread/miscommunicate data / Chybné čtení/chybná komunikace údajů

V této oblasti je hodnocená pravděpodobnost, že by mohlo dojít k chybám při čtení nebo předávání informací. Tyto chyby mohou vést k nesprávnému pochopení situace a k chybám v rozhodování.

Pcd: Information misleading / Zavádějící informace

Tyto otázky v rozhodovacím stromu se týkají situací, kdy jsou poskytovány informace, které mohou být označeny jako zavádějící nebo nepřesné. Takové informace mohou negativně ovlivnit rozhodovací proces.

Pce: Skip a step in procedure / Přeskočení kroku v postupu

Odpověď na tyto otázky v rozhodovacím stromu, mohou zahrnovat možnost, že nějaký krok v havarijním předpisu byl opomenut. Přeskočení důležitého kroku může být příčinou chyb a komplikací procesu.

Pcf: Misinterpret instruction / Chybná interpretace instrukcí

V této oblasti je zkoumáno, zda došlo k chybnému porozumění instrukcím. Nesprávné pochopení pokynů může vést k nesprávnému výkonu úkolu.

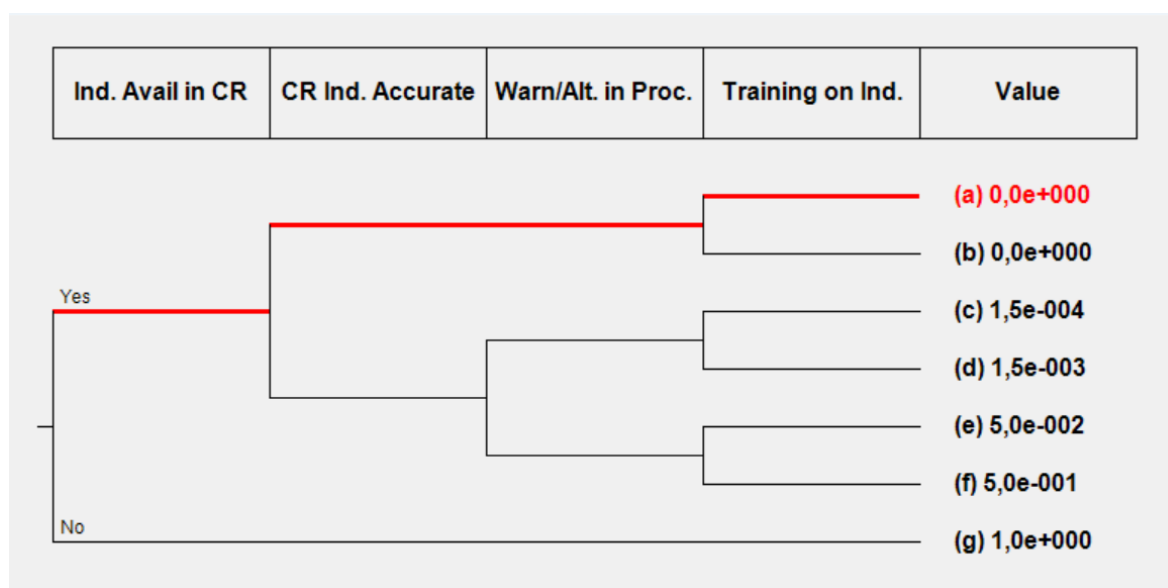
Pcg: Misinterpret decision logic / Nesprávná interpretace rozhodovací logiky

Tyto otázky v rozhodovacím stromu, se zaměřují na schopnost správně interpretovat logiku rozhodování. Chyby v této oblasti mohou mít za následek nesprávná rozhodnutí a následné chyby.

Pch: Deliberate violation / Úmyslné porušení

Odpověď na otázky v tomto rozhodovacím stromě, se týkají úmyslného porušování havarijního předpisu. Takové chování může mít závažné následky na bezpečnost a efektivitu operací.

Více jsou tyto informace rozebrány v samotném výpočtu viz 6.2.8.



Obrázek 40 Rozhodovací strom Pca

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

MOŽNOST ODHALENÍ LIDSKÉ CHYBY JINÝM PERSONÁLEM

V tomto případě je primární časová náročnost prováděné akce, kdy delší čas může znamenat vyšší pravděpodobnost odhalení chyby a její nápravy.

Analytik by se měl informovat u personálu BD, SI, BI, personálu trenažéru a zjistit časový průběh prováděné činnosti a možnosti zjištění chyby jiným členem personálu, tak jak bylo provedeno viz 6.2.5.

Delší časový úsek může znamenat výměnu směny, a tedy vyšší pravděpodobnost odhalení chyby nebo dokonce spuštění havarijního podpůrného střediska a zapojení dalších odborníků na řešení havarijní situace. V HRA Calculatoru může být označena možnost nápravy chyby v tabulce viz Obrázek 41 a Obrázek 42.

Self Review – Chybná činnost může být rozpoznána operátorem, který provede nápravu.

Extra Crew – Jiný člen posádky BD nebo personálu rozpozná chybnou činnost a upozorní na ni nebo provede nápravu.

STA Review – Bezpečnostní inženýr (STA = Safety Technical Advisor) je pracovník určený pro dohled nad bezpečností a řešení havarijní situace. Jeho zásah může být časově závislý, protože obvykle má kancelář na provozní budově a na BD zasaženého bloku přichází při řešení havarijní situace. Pokud je rozvoj havárie příliš rychlý, nemusí být zásah BI považován za efektivní.

Shift Change – Výměna směny. Pokud je mezi chybnou činností a jejím možným následkem doba, během níž dojde k výměně směny, může být náprava chyby provedena novou směnou. Pokud je doba příliš krátká, zadání této nápravy v HRA Calculatoru není povoleno. Tyto zásahy jsou silně závislé na časových oknech pro danou hodnocenou činnost.

Kliknutím na „Cognitive Recovered“ v navigačním podokně na levé straně je zobrazena karta Obnovení P_{cog} . Níže je zobrazena karta Obnovení P_{cog} před jakýmkoli zadáním dat.

Basic Event

BE ID

RECIRC

Description:

Operators fail to switch over to recirculation

Based on 30.00 Minutes for Recovery: Dependency should not be less than MD

Recovery Factors Applied to Pc

	Branch	Initial HEP	Self Review	Extra Crew	STA Review	Shift Change	ERF Review	DF	Multiply By	Override Value	Final Value
			More Info	More Info	More Info	More Info	More Info				
pca	a	0.0	NC	5.00E-01	NC	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcb	d	1.50E-04	1.00E-01	NC	1.00E-01	X	X		1.00E+00		1.50E-04
pcc	a	0.0	NC	NC	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcd	a	0.0	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pce	c	3.00E-03	1.00E-01	5.00E-01	NC	X	X		1.00E+00		3.00E-03
pcf	a	0.0	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcg	k	0.0	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pch	a	0.0	NC	1.00E-01	1.00E-01	NC	NC		1.00E+00		0.00E+00

Double click on cell to select

Sum of recovered Pc(a) through Pc(h) = Recovered Pc

3.15E-03

Notes/Assumptions:

Obrázek 41 Bez Recovery Factors Applied

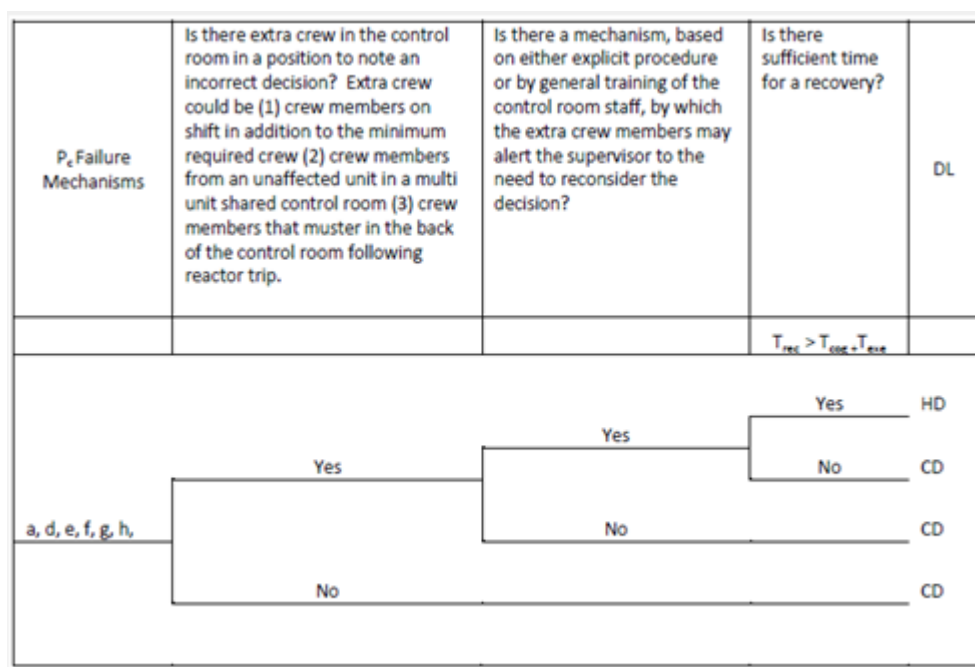
(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Recovery Factors Applied to Pc											
	Branch	Initial HEP	Self Review	Extra Crew	STA Review	Shift Change	ERF Review	DF	Multiply By	Override Value	Final Value
			More Info	More Info	More Info	More Info	More Info				
pca	a	0.0	NC	5.00E-01	NC	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcb	a	0.0	1.00E-01	NC	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcc	a	0.0	NC	NC	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcd	a	0.0	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pce	neg		1.00E-01	5.00E-01	NC	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcf	a	0.0	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		1.00E+00		0.00E+00
pcg	i	3.30E-04	NC	5.00E-01	1.00E-01	X	X		5.00E-01		1.65E-04
pch	a	0.0	NC	1.00E-01	1.00E-01	NC	NC		1.00E+00		0.00E+00
Sum of recovered Pc(a) through Pc(h) = Recovered Pc											1.65E-04
Notes/Assumptions:											

Obrázek 42 Po aplikaci Recovery Factors Applied

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Podrobnější informace ke každé možnosti (sloupci v tabulce) lze získat po stisknutí tlačítka More Info, kdy se zobrazí jednoduchý rozhodovací strom viz Obrázek 43, kde HD znamená High dependency (Vysoká závislost) a Complete dependency znamená úplnou závislost.



Obrázek 43 Rozhodovací strom

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

JEDNOTLIVÉ FAKTORY V EXECUTION PSF_s

PSFs (Performance Shaping Factors) jsou považovány za důležitý nástroj pro identifikaci a hodnocení vlivů aspektů na výkon a proces. Tyto faktory viz 3.4 mohou mít zásadní dopad na schopnost zaměstnanců efektivně reagovat na situace, rizika a mimořádné události.

Je doporučeno nastudovat havarijní předpisy a zjistit, jaké jsou požadavky na personál a kolik osob se podílí na provádění činnosti. Měly by být provedeny dotazy směnového personálu na jednotlivé položky např. nářadí, podmínky havarijní situace a provedení pracovního úkonu.

Níže je zobrazena obrazovka Performance Shaping Factor „Provádění PSF“. PSF jsou prezentovány ve skupinách možností. Každá skupina voleb PSF buď umožňuje výběr jednoho nebo více zaškrťovacích polí ve skupině, nebo umožňuje výběr pouze jedné možnosti ve skupině viz Obrázek 44

Více v kapitole 6.2.10.

- 1. Zvláštní požadavky:** Ve skupině možností Zvláštní požadavky je nejprve určováno, zda jsou vyžadovány speciální nástroje, díly nebo oděvy. Pro každý speciální požadavek, který je vyžadován, by měly být dále zvoleny možnosti (K dispozici a Adekvátní podle potřeby).
- 2. Prostředí:** Ve skupinách možností Prostředí by měly být vybrány příslušné možnosti, které zahrnují Osvětlení, Teplo/vlhkost, Záření a Atmosféra.
- 3. Složitost odezvy:** Ve skupinách voleb Složitost odpovědi by měly být vybrány odpovídající úrovně odezvy pro odpovědi na spuštění (Složitá nebo Jednoduchá).
- 4. Usnadnění přístupu k zařízení:** Ve skupině možností Usnadnění přístupu k zařízení je nutné vybrat příslušné umístění a z rozevíracího seznamu zvolit odpovídající stupeň přístupnosti. Umístění může být přidáváno, odstraňováno a upravováno pouze z knihovny umístění.

Je třeba si všimnout, že pokud je vybrána možnost Nepřístupné a v nastavení je zvolená možnost „Použit kritéria proveditelnosti“, je celkový HEP nastaven na 1,0 jako neproveditelný.

Basic Event

BE ID: HFE-EX-AFW

Description: Operators fail to recovery AFW locally

Environment

Lighting: ☒ Normal, ☐ Emergency, ☐ Portable

Heat/Humidity: ☒ Normal, ☐ Hot/Humid, ☐ Cold

Radiation: ☒ Non Radiation Area, ☐ Radiation Area, ☐ High Radiation Area, ☐ Very High Radiation Area

Atmosphere: ☒ Normal, ☐ Respirator required, ☐ Steam, ☐ Smoke

Special Requirements

Tools: ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available

Parts: ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available

Clothing: ☐ Required, ☐ Adequate, ☐ Available

Complexity of Response (Execution): ☒ Complex, ☐ Simple

Equipment Accessibility

Location: [Dropdown]

Accessibility: [Dropdown]

Obrázek 44 Execution PSF_s

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

ZADÁVÁNÍ KONCOVÝCH STAVŮ ROZHODOVACÍHO STROMU

1. Otevření karty Stres provádění: Klikněte na položku Stres při provádění v navigačním podokně na levé straně. Tím se otevře karta Stres provádění.

2. Výběr větví v rozhodovacím stromu: V rozhodovacím stromu se vybírají větve na základě následujících kritérií viz Obrázek 45:

- odezva bloku na IU (Plant Response As Expected),
- pracovní zatížení personálu (Workload)
- faktory ovlivňující výkon (PSFs).

3. Získání informací: Informace potřebné pro výběr větví lze získat z různých zdrojů, jako jsou:

- termohydraulické analýzy,
- rozhovory s personálem,
- rozhovory s SI apod.

The screenshot shows the 'Basic Event' window in the HRA Calculator. The 'BE ID' is 'RECIRC' and the 'Description' is 'Operators fail to switch over to recirculation'. The 'Stress' section contains a table with four columns: 'Plant Response As Expected', 'Workload', 'PSFs', and 'Stress'. The 'Plant Response As Expected' column has 'Yes' and 'No' options. The 'Workload' column has 'Low' and 'High' options. The 'PSFs' column has 'Optimal' and 'Negative' options. The 'Stress' column has 'Low', 'Moderate', and 'High' options. The 'No' row is highlighted in red, and the 'High' stress level is also highlighted in red. A yellow warning box on the right states: 'Caution! The selected stress value is used in the quantification as a default. Changing this value will cause re-quantification of execution probabilities.'

Plant Response As Expected	Workload	PSFs	Stress
Yes	Low	Optimal	Low
Yes	Low	Negative	Moderate
Yes	High	Optimal	Moderate
Yes	High	Negative	High
No			High

Obrázek 45 Stres při provádění

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

VÝBĚR Z HODNOCENÍ CHYB PROVEDENÍ

Při kvantifikaci pravděpodobnosti chyby provedení se odkazy na tabulky a jednotlivé položky tabulek NUREG 1278 vybírají na základě popisu situace a použitých havarijních postupů. Tyto tabulky jsou souhrnně popsány v příloze B (THERP TABLES) manuálu HRA Calculatoru viz Obrázek 46.

The screenshot shows the 'Process Steps' window in the HRA Calculator. The 'Step' is '3' and the 'Instruction' is 'Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení cb v I.O'. The 'Stress' is 'High'. The 'Table Reference' is '20-7b'. The 'Item Reference' is '1'. The 'Location' is 'Bloková dozoma'. The 'Comment' is empty. A table of error probabilities is displayed, with the following rows:

ID	Table
20-8a	Estimated probabilities of errors in recalling oral instruction items not written down - Oral Instructions are detailed (Table 20-8a)
20-8b	Estimated probabilities of errors in recalling oral instruction items not written down - Oral Instructions are general (Table 20-8b)
20-7	Omission per item of instruction when using a narrative procedure (Table 20-7)
20-7b	Omission per item of instruction when using a step-by-step procedure (Table 20-7 - reduced by factor of 3)
99	Basic error of omission (ASEP)

Obrázek 46 Procesní kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

Příklad tabulky z Přílohy B viz Obrázek 47

Table B-1
Estimated Probabilities of Errors of Omission Per Item of Instruction When use of Written Procedure is Specified

Table	Item	Description	EF	Median	Mean
20-07	1	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Short list, ≤ 10 items.	3	0.001	1.25E-03
20-07	2	Omission of item when procedures with checkoff provisions are correctly used. Long list, > 10 items.	3	0.003	3.75E-03
20-07	3	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Short list, ≤ 10 items.	3	0.003	3.75E-03
20-07	4	Omission of item when procedures without checkoff provisions are used, or when available checkoff provisions are incorrectly used. Long list, > 10 items.	3	0.01	1.25E-02
20-07	5	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used.	5	0.05	8.07E-02
20-07	5a	Omission of item when written procedures are available and should be used but are not used - if the task is judged to be "second nature"	5	0.01	1.61E-02

Obrázek 47 Příklad tabulky NUREG 1278

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

NÁPRAVNÉ KROKY

1. Zadávání nápravných kroků: Jako nápravný krok se zadává pokyn z pravého sloupce havarijního postupu, který popisuje činnost při neprovedení kroku v levém sloupci.

2. Úroveň závislosti: Jelikož tyto kroky následují těsně za sebou, místo nezávislé pravděpodobnosti se zadává pouze úroveň závislosti mezi těmito dvěma činnostmi. Tím se určuje pravděpodobnost, že operátor, který nesprávně provedl první krok, provede nesprávně i nápravný krok viz Obrázek 48.

3. Program HRA Calculator: Program HRA Calculator zahrnuje úroveň závislosti na základě hodnoty T_{rec} , která je vypočítána v kapitole 6.2.13.

The screenshot shows the 'Basic Event' window in the HRA Calculator. The 'BE ID' is 'HE-1RP00-P-02' and the 'Description' is 'Selhání obsluhy BD pro rychlé vytvoření odstavné koncentrace (start do 5 min)'. Below this, the 'Suggested Dependency' is 'HD' and the 'Total' probability is '2.85E-02'. There are checkboxes for 'No repeat headers' and a button 'Remove Recovery Step'. The main table has four columns: 'Critical Step', 'Action', 'Recovered Probability', and 'Assign Recovery Step'. The first row shows '3' as the critical step, 'Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení cb v I.O' as the action, and '2.85E-02' as the recovered probability. The 'Assign Recovery Step' column has a button 'Click to add Recovery Step...'. Below this table, there is a sub-table with columns 'Recovery Step', 'Dependency', 'Probability', and 'Comment'. The first row shows '3d' as the recovery step, 'High (HD)' as the dependency, and '5.04E-01' as the probability.

Critical Step	Action	Recovered Probability	Assign Recovery Step
3	Najed' všechna TJ čerpadla a otevři výtlaky pro zvýšení cb v I.O	2.85E-02	Click to add Recovery Step...

Recovery Step	Dependency	Probability	Comment
3d	High (HD)	5.04E-01	

Obrázek 48 Nápravné kroky

(zdroj: HRA Calculator, 2025)

ZÁVĚR

Diplomová práce byla věnována hodnocení lidského činitele v rámci jaderných elektráren pomocí PSA. Cílem mojí diplomové práce bylo vypracovat rešeršní práci na téma lidský faktor, metody hodnocení lidského činitele a analýzy rizik, dále praktickou část, kde byl zpracován prvotní výpočet lidské chyby a v návaznosti byla vytvořena metodická příručka, která poslouží jako návod pro personál ČEZ, a. s. pro výpočet lidské chyby pomocí softwaru HRA Calculator.

Teoretická část byla rozdělena do čtyř kapitol. První část byla věnována legislativě. Druhá část byla zaměřena na vymezení základních pojmů pro tuto problematiku. Ve třetí části byla především rozebrána problematika PSA, program "Living PSA", cíle a účel PSA a principy konstrukce PSA. Poslední část byla věnována lidskému faktoru, kde byly rozebrány jednotlivé metody používané pro hodnocení lidského činitele, dále byla rozebrána spolehlivost lidského činitele, chyby spojené s lidskými činnostmi a analýzy spolehlivosti lidského činitele používané pro PSA studie na JE Dukovany.

Samotná praktická část byla poté zaměřena na výběr lidské chyby, použití pravděpodobnostního hodnocení bezpečností (PSA) a softwaru HRA Calculator. Pro vypracování praktické části bylo nutné nejprve prostudovat řádně havarijní předpis pro danou IU.

Pro provoz jaderných elektráren je důležitý výpočet lidského rizika, který je důležitou součástí hodnocení bezpečnosti jaderných elektráren. Jedním z hlavních nástrojů, který byl použit k analýze lidských chyb, byl HRA Calculator. Tento software se ukázal jako efektivní prostředek pro kvantifikaci a posouzení lidského činitele v rámci PSA. Tento software nabízí komplexní nástroj pro hodnocení různých aspektů lidského chování, včetně kognitivních a prováděcích činností operátorů. Další výhodou HRA Calculatoru je schopnost zohlednit časové aspekty a stresové faktory, které mohou mít vliv na výkon operátoru.

HRA Calculator může přinést podrobnější a přesnější výsledky. Například u provedeného výpočtu v rámci této práce, se ukázalo že pravděpodobnost lidské chyby HE-1RP00-P-02, byla stanovená HRA Calculátorem na $2,87E-02$, zatímco předchozí hodnocení dle tradiční metodiky odhadovalo tuto hodnotu na $1,83E-02$. Tento rozdíl ukazuje, jak významně může HRA Calculator ovlivnit přesnější hodnocení pravděpodobnosti lidské chyby.

Na základě výpočtu byla vypracována metodická příručka pro personál skupiny ČEZ, a. s., která bude sloužit jako návod pro hodnocení lidských chyb v rámci PSA a HRA Calculátoru. Na základě zjištěných dat bylo doporučeno zaměřit se na systematický nácvik a školení personálu, protože trénink může výrazně přispět k redukci rizika spojených s lidským faktorem.

Závěrem je třeba říci, že HRA Calculator se ukázal jako vhodný nástroj pro hodnocení lidských chyb, které jsou nedílnou součástí pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti. Na základě číselných výsledků bylo prokázáno, že pomocí tohoto softwaru je možné dojít k přesnějším výsledkům, které mohou přispět ke zvýšení bezpečnosti na jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín, při využití tohoto softwaru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

APENDIX HRA, 2021. *Dokumentace PSA, ÚJV Řež*.

BERNATÍK, Aleš, 2016. *Analýza nebezpečí a rizik* [online]. Ostrava, 20 s. [cit. 2025-03-16]. Dostupné z: https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/cs/.content/galerie-souboru/U3V/studijni-materialy/U3V_Analyza_nebezpeci_a_rizik.pdf

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB, 2010: *Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti BN-JB-1.6*. In: Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/G2_O_final_psa_PUBLIKA_CE.pdf

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB, 2018: *Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti, jaderná bezpečnost BN-JB-2.5(Rev. 1.0)*. In: Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 168 s. Dostupné také z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/Navod-BN-JB-2-5-Rev1.pdf>

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB, 2020: *Jaderná bezpečnost BN-JB-1.3 (Rev. 0.0)*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 175 s. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-1.3_Obsah_bezpecnostnich_zprav.pdf

BEZPEČNOSTNÍ NÁVODY SÚJB, 2021: *Bezpečné využívání jaderné energie a ionizujícího záření Systém řízení Jaderná bezpečnost BN-JB-1.1 (Rev. 0.2)*. In: . Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 67 s. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN_JB_1.1_Rev.0.2_System_rizeni.pdf

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST, 2011. *Spolehlivost lidského činitele při provozu moderní technologie*. Praha: Česká společnost pro jakost, 27 s. ISBN 978-80-02-02342-5. Dostupné také z: https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_44Sbornik_Lidsky_cinitel.pdf

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST, 2013. *Analýzy a hodnocení rizik s ohledem na lidský faktor*. Praha: Česká společnost pro jakost, 32 s. ISBN 978-80-0202-434-7. Dostupné také z:

https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_50Sbornik_2013_02_26_Lidsky_faktor.pdf

ČESKÁ SPOLEČNOST PRO JAKOST, 2015. *Prediktivní analýzy spolehlivosti a možnosti jejich využití*. Praha: Česká společnost pro jakost, 47 s. ISBN 978-80-7231-965-7. Dostupné také z:

https://www.csq.cz/fileadmin/user_upload/Clenstvi/Centra/Sborniky_spolehlivost/192_60CSJ_OSS_SBORNIK_2015_final.pdf

ČESKO, 2016. *Zákon č. 263/2016 Sb., ze dne 14. července 2016, atomový zákon*. In: Sbírka zákonů České republiky. Částka 102, s. 3938–4060. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263/zneni-20220201>

ČESKO, 2016. *Vyhláška č. 359/2016 Sb., ze dne 17. října 2016, o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události*. In: Sbírka zákonů České republiky. Částka 143, s. 5613–5641. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-359>

ČESKO, 2017. *Vyhláška č. 21/2017 Sb., ze dne 23. ledna 2017, o zajištění jaderné bezpečnosti jaderného zařízení*. In: Sbírka zákonů České republiky. Částka 7, s. 218–235. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-21>

ČESKO, 2017. *Vyhláška č. 162/2017 Sb., ze dne 25. května 2017, o požadavcích na hodnocení bezpečnosti podle atomového zákona*. In: Sbírka zákonů České republiky. Částka 56, s. 1514–1527. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2017-162>

ČEZ, a. s., 2025. *Jaderná bezpečnost* [online]. © [cit. 2025-04-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/cez/bezpecnost/jaderna-bezpecnost>

ČSN ISO 31000, 2018. *Management rizik – Směrnice*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 28 s.

ČSN EN 61025. *Analýza stromu poruchových stavů (FTA)*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2007, 48 s.

ČSN EN 62502. *Techniky analýzy spolehlivosti – Analýza stromu událostí (ETA)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 44 s.

DOKUMENTACE PSA, 2022. *Analýza spolehlivosti lidského činitele*. Kapitola 5.3. ÚJV Řež, 73 s.

EVERDIJ M.H.C. and BLOM H.A.P., 2008. *Safety Methods Database*.

<http://www.nlr.nl/documents/flyers/SATdb.pdf>

HAVARIJNÍ PŘEDPIS FR-S.1, 2022. *Neodtavení reaktoru - ATWS*, 2022. ČEZ, a.s.

HAVARIJNÍ PŘÍRUČKA, 2025: *Základní informace pro případ radiační havárie JE Dukovany* [online], Dostupné také z: https://sujb.gov.cz/fileadmin/sujb/docs/kkc/Prirucky_JE/informace_EDU_DUKOVANY_300x140.pdf

HOLMBERG, Jan-Erik, 2019. *HRA methodology for Forsmark NPP and Ringhals NPP. NPSAG report 53-002* [online]. [cit. 2025-04-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333617806_HRA_Methodology_for_Forsmark_NPP_and_Ringhals_NPP

IAEA TECDOC SERIES: *Attributes of Full Scope Level 1 Probabilistic Safety Assessment (PSA) for Applications in Nuclear Power Plants* [online]. 2016. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2025-03-19]. ISBN 978–92–0–107316–7. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1804web.pdf>

IAEA SAFETY STANDARDS: *Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants* [online], 2010. Vienna: International Atomic Energy Agency, 215 s. [cit. 2025-03-26]. ISBN 978–92–0–114509–3 Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1430_web.pdf

IAEA SAFETY STANDARDS: *Human Factors Engineering in the Design of Nuclear Power Plants* [online], 2019. No. SSG-51. Vienna: International Atomic Energy Agency, 104 s. [cit. 2025-03-26]. ISBN 978–92–0–100419–2 Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1843_Web.pdf

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Human and Organizational Aspects of Assuring Nuclear Safety — Exploring 30 Years of Safety Culture* [online], 2019. Vienna: International Atomic Energy Agency, 386 s. [cit. 2025-03-26]. ISBN 978–92–0–103918–7 Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1810_web.pdf

NEUGEBAUER, Tomáš, 2018. *Vyhledávání a vyhodnocení rizik v praxi*. 3. vydání. Praha: Wolters Kluwert, 120 s. ISBN 978807552-0722.

NUCLEAR SAFETY, 2015. *Establishing the Appropriate Attributes in Current Human Reliability Assessment Techniques for Nuclear Safety*. OECD Nuclear Energy Agency.

Dostupné také z: https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2021-02/csni-r2015-1_2021-02-23_23-20-27_854.pdf

NUREG - 1842, 2006. *Evaluation of Human Reliability Analysis Methods Against Good Practices*. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Dostupné také z: <https://www.nrc.gov/docs/ML0632/ML063200058.pdf>

MANUÁL HRA CALCULATOR, 2017. *The EPRI HRA Calculator®: Software Version 5.2*. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE.

MLADÝ, Ondřej, 2000. *Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti*. Brno, 107 s.

PROCHÁZKOVÁ, Dana, 2006. *Bezpečnost a krizové řízení*. POLICE HISTORY, Praha, 255 s. ISBN 80-86477-35-5

PROCHÁZKOVÁ, Dana, 2020. *Řízení rizik procesů a bezpečnost složitých technických děl* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 400 s. [cit. 2025-03-17]. ISBN 978-80-01-06786-4. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/91988>

REVIEW of HUMAN RELIABILITY ASSESSMENT METHODS: *Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive 2009*. Dostupné také z: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20241207090839/https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr679.htm>

SKŘEHOT, P.A., 2016. *Identifikace zdrojů nebezpečí a vyhodnocení rizik. Edice Řízení bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v zodpovědné firmě. Personální a sociálně právní kartotéka*. č. 12. ISBN 1211-9482

SKŘEHOT, Petr...[et.al.], 2009. *Prevence nehod a havárií; 2.díl: Mimořádné události a prevence nežádoucích následků*. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce a T-SOFT, 2009, 595 s., ISBN 978-80-86973-73-9.

STRÄTER, O. 2005. *Cognition and Safety*. 1. vyd. Ashgate. ISBN 0-7546-4325-5.

SWAIN, A. D.; GUTTMAN, E., 1983. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*, NUREGKR-1275 (US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC) 222, 728 s.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma JE Dukovany.....	20
Obrázek 2 Schéma procesů sběru, analýzy, a použití dat v PSA.....	23
Obrázek 3 Strom událostí pro střední únik	29
Obrázek 4 Strom poruchových stavů	30
Obrázek 5 Ukázka havarijního předpisu.....	31
Obrázek 6 Zjednodušené logické schéma procesu	51
Obrázek 7 Vytvoření nové události	52
Obrázek 8 Popis scénáře	55
Obrázek 9 Požadovaný počet personálu	59
Obrázek 10 Časové okno	61
Obrázek 11 Pca: Dostupnost informací	62
Obrázek 12 Pcb: Selhání pozornosti	63
Obrázek 13 Pcc: Chybné čtení /chybná komunikace údajů.....	64
Obrázek 14 Pcd: Zavádějící informace.....	65
Obrázek 15 Přeskočení kroku	66
Obrázek 16 Chybná interpretace instrukcí.....	67
Obrázek 17 Nesprávná interpretace rozhodovací logiky	68
Obrázek 18 Úmyslné porušení.....	69
Obrázek 19 Recovery CBDTM	69
Obrázek 20 Faktory ovlivňující výkon člověka.....	70
Obrázek 21 Stres při provádění	71
Obrázek 22 Procesní kroky	72
Obrázek 23 Chyby provádění THERP	72
Obrázek 24 Procesní kroky	73
Obrázek 25 Procesní kroky	73
Obrázek 26 Chyby při provádění THERP	74
Obrázek 27 Procesní kroky	74
Obrázek 28 Náprava chyby provedení.....	75
Obrázek 29 Výsledek výpočtu	75
Obrázek 30 Jednotlivé metody	79
Obrázek 31 Knihovny v HRA Calculátor	80
Obrázek 32 Knihovna příznaků	80
Obrázek 33 Knihovna procedur	81
Obrázek 34 Vložení postupu.....	81

Obrázek 35 Rozhovor s operátorem.....	82
Obrázek 36 Změna pracovního týmu.....	83
Obrázek 37 Manpower Requirements.....	83
Obrázek 38 Časové okno	86
Obrázek 39 Cognitive Unrecovered.....	88
Obrázek 40 Rozhodovací strom Pca	90
Obrázek 41 Bez Recovery Factors Applied.....	91
Obrázek 42 Po aplikaci Recovery Factors Applied	92
Obrázek 43 Rozhodovací strom.....	92
Obrázek 44 Execution PSF _s	94
Obrázek 45 Stres při provádění.....	95
Obrázek 46 Procesní kroky	95
Obrázek 47 Příklad tabulky NUREG 1278.....	96
Obrázek 48 Nápravné kroky	96

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výčet uvažovaných lidských chyb	48
Tabulka 2 Časové okno pro ATWS	60
Tabulka 3 Minimální doporučená míra závislosti na čase dostupném pro nápravu chyby .	84

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASEP	Accident Sequence Evaluation Program
ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis
ATWS	Anticipated Transient Without Scram
AZ	Aktivní zóna
BD	Bloková dozorna
BI	Bezpečnostní inženýr
CBDTM	Cognitive – Based Decision Tree Model Kognitivní model rozhodovacího stromu
CD	Core Damage Poškození aktivní zóny
CDF	Core Damage Frequence Frekvence výskytu poškození paliva v AZ
CR	Control Room Bloková dozorna
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method Kognitivní spolehlivost a metoda analýzy chyb
ČR	Česká republika
EA	Elektrická armatura
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
EPRI	Electric Power Research Institute
ESFAS	Engineering Safety Feature Actuation Systém Systém aktivace havarijních systémů
ETA	Event Tree Analysis Analýza stromů událostí
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis

	Analýza způsobů a následků poruch
FTA	Fault Tree Analysis
	Analýza stromu poruchových stavů
HA	Hydroakumulátor
HAZOP	Hazard and Operability Study
	Analýzy rizik a provozuschopnosti
HCR	Human Cognitive Reliability
	Lidská kognitivní spolehlivost
HD	High Dependency
	Vysoká závislost
HE	Human Error
	Lidská chyba
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
	Technika hodnocení a snižování lidských chyb
HEP	Human Error Probability
	Pravděpodobnost lidské chyby
HFE	Human Failure Event
	Selhání lidského činitele
HO	Havarijní odstavení
HPK	Hlavní parní kolektor
HRA	Human Reliability Analysis
	Analýza spolehlivosti lidského činitele
HRK	Havarijní a regulační kazety
HSP	Human success probability
	Pravděpodobnost lidského úspěchu
HZ	Hermetická zóna

IAEA	International Atomic Energy Agency Mezinárodní agentura pro atomovou energii
I.O.	Primární okruh
IU	Iniciační událost
JB	Jaderná bezpečnost
JE	Jaderná elektrárna
JZ	Jaderné zařízení
LD	Low dependency Nízká závislost
LERF	Large Early Release Frequency Frekvence výskytu velkého časného úniku RA látek z kontejnmentu JE
KBF	Kritické bezpečnostní funkce
MAAP	Modular Accident Analysis Program Program pro výpočty těžkých havárií jaderných elektráren
MaR	Měření a regulace
MD	Medium dependency Střední závislost
MKŘ	Minimální kritický řez
NUREG	Nuclear Regulation Jaderný dozor
OOP	Osobní a ochranné pomůcky
OPO	Operátor primárního okruhu
OSO	Operátor sekundárního okruhu
PG	Parogenerátor
PSA	Probabilistic Safety Assessment Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti

PSF	Performance Shaping Factor Faktor ovlivňující lidský výkon
PWR	Pressurized Water Reactor Tlakovodní reaktor
RA	Radioaktivita
RMU	Radiační mimořádná událost
RTB	Reactor Trip Breaker Systém odstavení reaktoru
RTS	Reactor Trip System Systém rychlého odstavení reaktoru
SGCR	Steam Generator Collector Rupture Prasknutí kolektoru parního generátoru
SGTR	Steam Generator Tube Rupture Prasknutí trubky parního generátoru
SHARP	Systematic Human Action Procedure Systematický postup hodnocení lidské činnosti
SI	Směnový inženýr
SPAR-H	Standardized Plant Analysis Risk Standardizované hodnocení rizika zařízení
STA	Safety Technical Advisor Bezpečnostní inženýr
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
TG	Turbogenerátor
THERP	Technique for Human Error Rate Prediction Technika pro predikci lidské chybovosti
TJ	Vysokotlaký systém havarijního doplňování

TY	Systém sběru organizovaných úniků
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu
VRB	Vedoucí reaktorového bloku
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
ZD	Zero dependency
	Nulová závislost
ŽP	Životní prostředí

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Název první přílohy

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PRVNÍ PŘÍLOHY

Obsah první přílohy.