



Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta strojní
Katedra energetických strojů a zařízení

Vliv seismické události na redefinici havárie se ztrátou chladiva

Dizertační práce

Autor: Ing. Kateřina Demjančuková
Školitel: Prof. Ing. Josef Kott, DrSc.
Školitel specialista: Ing. Ladislav Pečínka, CSc.
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

Plzeň, 2016

Anotace

Předložená dizertační práce pojednává o vlivu seismické události na četnost výskytu havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA (LB – Large Break, LOCA - Loss of Coolant Accident) v primárním okruhu jaderné elektrárny (JE) Temelín. Téma práce je rozsáhlé a zasahuje do dvou oblastí, a to do oblasti seismického inženýrství a bezpečnosti jaderných elektráren.

Práce je členěna do tří částí. První část práce obsahuje aktuální poznatky o zemětřesení, výskytu zemětřesení v ČR, vlivu zemětřesení na jadernou elektrárnu a seismickém ohrožení lokality JE Temelín. Poté jsou uvedeny informace o funkci a základních komponentách primárního okruhu jaderné elektrárny. Pozornost je věnována nejzranitelnější komponentě, kterou jsou potrubní systémy. Jsou zmíněny požadavky na materiálové vlastnosti, konstrukci a svary potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny, které jsou důležité pro jejich bezpečnost.

Druhá část práce obsahuje popis přístupu amerického úřadu pro jadernou energii (US NRC - United States Nuclear Regulatory Commission) k přísným požadavkům kladeným na systémy havarijního chlazení reaktoru (ECCS) jaderných elektráren a představuje aplikaci postupu, který navrhuje US NRC pro zmírnění požadavků na systém SAOZ.

Třetí část práce tvoří dvě části. V první části jsou uvedena vstupní data, popis použitých metod pro JE Temelín a výsledky výpočtů seismického ohrožení. Je stanoveno seismické ohrožení lokality JE Temelín, doby návratu a roční pravděpodobnosti překročení. V druhé části je pro primární okruh JE Temelín vypočten vliv seismické události na četnost výskytu havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA dle postupu US NRC a je provedena analýza spolehlivosti výpočtu metodou SBRA (Simulation-Based Reliability Assessment).

V závěrečné kapitole jsou na základě posouzení výsledků uvedena opatření pro praxi a náměty pro pokračování výzkumu.

Klíčová slova:

seismické ohrožení, četnost výskytu zemětřesení, redefinice LB LOCA, velká LOCA, jaderná elektrárna Temelín, VVER 1000, SBRA, postup US NRC, vliv seismické události

Abstract

The presented thesis deals with the issue of the impact of a seismic event on the frequency of occurrence of the Large Break (LB) Loss of Coolant Accident (LOCA) in the primary circuit of the nuclear power plant (NPP) Temelin. The topic of the thesis is extensive and includes two fields – seismic engineering and nuclear power plants safety.

The thesis is divided into three parts. The first part comprehends actual knowledge concerning earthquakes, occurrence of earthquakes in the Czech Republic, impacts of earthquakes on NPPs and seismic hazard of the NPP Temelin locality. Furthermore, information on function and basic components of the NPP primary circuit are presented. Particular attention is given to the most vulnerable component, which is piping. The requirements on the material properties, construction and welds important for the safety of the primary circuit piping are introduced. The second part of the thesis focuses on the description of the US NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) approach to the strict requirements on the emergency core cooling systems (ECCS) of NPPs and presents the application of the approach suggested by US NRC to reduce requirements to ECCS.

The third part of the thesis consists of two sections. In the first one, input data, description of methods used for NPP Temelin and results of seismic hazard calculations are presented. Moreover, the seismic hazard for the NPP Temelin locality, return periods and annual probabilities of exceedance are determined. In the other section, the impact of the seismic event on the frequency of occurrence of the LB LOCA are calculated for the primary circuit of NPP Temelin based on the US NRC proposed approach. The reliability of calculation is analyzed using the SBRA (Simulation Based Reliability Assessment).

In the final chapter, suggestions arising from the results analysis are presented together with several ideas of future research.

Key words:

seismic hazard, earthquake, frequency of occurrence, LB LOCA redefinition, large LOCA, nuclear power plant Temelin, reactor VVER 1000, SBRA, US NRC approach, impact of seismic event

Résumé

La présente thèse de doctorat porte sur le sujet d'effet d'un séisme sur la probabilité d'occurrence d'un large Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) (Large Break Loss of Coolant Accident - LB LOCA) dans le circuit primaire de la centrale nucléaire (CN) Temelin. Le sujet est vaste et touche les deux domaines, génie sismique et la sûreté des centrales nucléaires.

La thèse de doctorat s'articule en trois parties. La première partie se consacre à des acquis actuels des tremblements de terre, de l'occurrence de tremblements de terre en République tchèque, des effets de séisme sur les centrales nucléaires et de l'aléa sismique pour la localité de CN Temelin. Ensuite, on résume des informations sur le fonctionnement et sur les composants de base du circuit primaire des centrales nucléaires. L'attention est accordée à la composante la plus vulnérable telle que les systèmes de tuyauterie. On mentionne les exigences relatives aux propriétés du matériau, à la construction et aux soudures des tuyauteries du circuit primaire indispensables pour la sûreté des centrales nucléaires.

La deuxième partie contient la description d'une approche de l'autorité américaine US NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) aux requisitions rigoureuses concernant les systèmes de refroidissement de secours (ECCS – Emergency Core Cooling Systems) des centrales nucléaires. et présente également l'application de l'approche proposée par US NRC pour adoucir les requisitions aux systèmes ECCS.

La troisième partie se compose de deux chapitres dont le premier présente les données d'entrée pour les calculs, la description des méthodes utilisées pour les calculs de CN Temelin et les résultats des calculs d'aléa sismique. On a déterminé l'aléa sismique pour la localité de CN Temelin ainsi que les périodes de retour et les probabilités annuelles de dépassement. Dans le deuxième chapitre on a calculé pour le circuit primaire de CN Temelin l'impact des événements sismiques sur la probabilité d'occurrence d'un large APRP conformément à l'approche de US NRC et on a effectué une analyse de la fiabilité de calcul par la méthode SBRA (Simulation Based Reliability Analysis).

Sur la base de l'évaluation des résultats la présente thèse apporte des propositions pour usage en pratique et aussi des suggestions pour une étude plus approfondie.

Mots clés:

aléa sismique, séisme, fréquence d'occurrence, redéfinition de large APRP, large APRP, centrale nucléaire Temelin, VVER 1000, SBRA, procédé US NRC, effet d'un séisme

Prohlášení

Předkládám k posouzení dizertační práci, zpracovanou na téma *Vliv seismické události na redefinici havárie se ztrátou chladiva*.

Práce je koncipována podle požadavků studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předkládanou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí předložené práce.

V Plzni dne

Podpis

Poděkování

Děkuji svému školiteli, prof. Ing. Josefu Kottovi, DrSc., za jeho čas a energii, které mi během studia věnoval. Velké poděkování patří paní doc. RNDr. Daně Procházkové, DrSc. a panu Ing. Ladislavu Pečínkovi, CSc., bez jejichž pomoci by práce nevznikla.

Děkuji svým blízkým za podporu a pochopení.

Obsah

Přehled použitých zkratk	iv
Označení hlavních veličin	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
1 Úvod	1
1.1 Cíle práce	3
1.2 Metodika práce	4
1.3 Současný stav problému a jeho řešení	5
2 Externí vlivy	8
2.1 Kombinace externích událostí	11
2.2 Havárie JE Fukušima	11
3 Zemětřesení	14
3.1 Seismické ohrožení	14
3.2 Intenzita zemětřesení	15
3.3 Zemětřesení na území České republiky	17
3.4 Zemětřesení v lokalitě JE Temelín	18
3.5 Projektové hodnoty zrychlení pro JE Temelín	20
4 Primární okruh jaderné elektrárny Temelín	22
4.1 Popis funkce jaderné elektrárny	23
4.2 Hlavní komponenty primárního okruhu JE Temelín	23
4.3 Hlavní cirkulační potrubí	29
5 Zatížení potrubí primárního okruhu	31
5.1 Předpisy pro návrh a provedení potrubí I.O. JE Temelín	32
5.2 Seismické buzení	34

5.3	Spektra odezvy pro potrubní systémy	35
5.4	Dopady seismického buzení na potrubní systémy	39
6	Havárie se ztrátou chladiva LOCA	42
6.1	Havárie se ztrátou chladiva typu velká LOCA	42
6.2	Průběh havárie LB LOCA	43
6.3	Analýzy havárií typu LB LOCA pro JE Temelín	44
7	Redefinice havárie se ztrátou chladiva	45
7.1	Koncept použitý pro redefinici	46
7.2	Metoda expertního posouzení	47
7.3	Historie a vývoj potrubních norem ASME	48
7.4	Pravděpodobnost LB LOCA vyvolané zemětřesením	51
8	Vstupní data	52
8.1	Vstupní data pro stanovení seismického ohrožení lokality JE Temelín	52
8.2	Pevnostní údaje	56
8.3	Hodnoty napětí v I.O.	56
8.4	Váhový součinitel SF	57
9	Použité metody	58
9.1	Metody stanovení seismického ohrožení lokality pro jaderná zařízení .	58
9.1.1	Mapa maximálních pozorovaných intenzit	59
9.1.2	Metoda extrémních hodnot	60
9.1.3	Útlumový faktor	61
9.1.4	Pravděpodobnostní přístup	62
9.1.5	Doba návratu a roční pravděpodobnost překročení	62
9.1.6	Metoda PSA	63
9.2	Pravděpodobnost vzniku LB LOCA vyvolané zemětřesením	68
9.2.1	Stanovení součinitele bezpečnosti	70
9.2.2	Součinitel bezpečnosti stavby	70
9.2.3	Potrubí, zařízení a komponenty	71
9.3	Metoda SBRA	72
9.3.1	Vstupní náhodné veličiny	73
9.3.2	Použití a výstupy metody SBRA	74
10	Výsledky	76
10.1	Stanovení seismického ohrožení lokality JE Temelín	76

10.2	Doba návratu a předpokládané četnosti výskytu	79
10.3	Stanovení seismických korigovaných napětí dle US NRC	81
10.4	Aplikace metody SBRA	83
11	Shrnutí a návrh opatření	86
11.1	Shrnutí výsledků práce	86
11.2	Návrh opatření pro praxi	87
12	Závěr	89
	Literatura	90
	Příloha 1	100
	Příloha 2	113
	Seznam publikací	114

Přehled použitých zkratk

AEC	Atomic Energy Commission
AZ	Aktivní zóna
CDF	Core Damage Frequency (četnost poškození aktivní zóny)
DBA	Design Basis Accident (maximální projektová havárie)
DEGB	Double Ended Guillotine Break (gilotinové prasknutí potrubí)
DSHA	Deterministic Seismic Hazard Assessment
ECCS	Emergency Core Cooling System
EPRI	Electric Power Research Institute
HČČ	Hlavní cirkulační čerpadlo
HCS	Hlavní cirkulační smyčka
HCP	Hlavní cirkulační potrubí
IAEA	International Atomic Energy Agency (MAAE)
I.O.	Primární okruh JE (primary circuit)
II.O.	Sekundární okruh JE (secondary circuit)
JE	Jaderná elektrárna
KO	Kompenzátor objemu
LBB	Leak Before Break (únik před roztržením)
LB LOCA	Large Break LOCA (velká LOCA)
LLOCA	Large LOCA (velká LOCA)
LOCA	Loss-of-Coolant-Accident (havárie se ztrátou chladiva)
LOFA	Loss-of-Flow-Accident (havárie se ztrátou průtoku chladiva zónou)
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA)
MVZ	Maximální výpočtové zemětřesení (Safe Shutdown Earthquake, SSE)
NPP	Normální provozní podmínky
OBE	Operating Basis Earthquake (projektové zatížení)
PG	Parogenerátor
PGA	Peak Ground Acceleration (špičkové zrychlení podloží)
PpBZ	Předprovozní bezpečnostní zpráva
PRA	Probabilistic Reliability Analysis (Pravděpodobnostní analýza)

	spolehlivosti)
PSA	Probabilistic Safety Analysis (Pravděpodobnostní analýza bezpečnosti)
PSHA	Probabilistic Seismic Hazard Assessment
PWR	Pressurized Water Reactor (tlakovodní reaktor západní koncepce)
SAOZ	Systém havarijního chlazení aktivní zóny (Система аварийного охлаждения активной зоны реактора)
SBRA	Simulation-Based Reliability Assessment
SF	Scale Factor („váhový“ součinitel)
SSE	Safe Shutdown Earthquake (maximální výpočtové zemětřesení, MVZ)
TBS	Transition Break Size (velikost přechodu k roztržení, VPR)
TMDS	Temelin Monitoring Diagnostic System
TMI	Three Mile Island
TNR	Tlaková nádoba reaktoru
USA	United States of America (Spojené státy americké)
US NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
VPR	Velikost přechodu k roztržení (Transition Break Size, TBS)
VVER	Tlakovodní reaktor ruské koncepce (водо-водяной энергетический реактор, vodo-vodní energetický reaktor)
WENRA	Western European Nuclear Regulators' Association (Asociace západoevropských jaderných dozorců)

Označení hlavních veličin

α_t	součinitel teplotní roztažnosti
α_z	parametr definující velikost zemětřesení v ohnisku
B_i	součinitel napětí
β	parametr definující úbytek amplitudy se vzdáleností Δ
\mathbf{B}, b_{ij}	matice tlumení, prvek matice tlumení
C_i	součinitel napětí
d	průměr potrubí
D, D_ν	poměrný útlum
D_0	vnější průměr potrubí
\mathbf{D}	matice tlumení transformovaná modální maticí \mathbf{V}
Δ	vzdálenost
E	modul pružnosti v tahu
\mathbf{E}	jednotková matice
f	součinitel závisející na počtu cyklů
\mathbf{f}	vektor zobecněných budicích sil
f_ν	vlastní frekvence
$g(t), g_\nu(t)$	impulsní funkce
i_σ	součinitel intenzifikace napětí
I_s	kvadratický moment průřezu
I_0	intenzita zemětřesení (v epicentru)
I_{0min}	minimální hodnota intenzity zemětřesení
I_{0max}	maximální pozorovaná hodnota intenzity zemětřesení
I_n	intenzita zemětřesení ve vzdálenosti r_n od epicentra
\mathbf{K}, k_{ij}	matice tuhosti, prvek matice tuhosti
k, k_x	osová tuhost (tuhost ve směru x) diskrétní vazby
k_{ef}	efektivní multiplikační koeficient
Λ	spektrální matice
l	směr buzení
M_i	zatěžovací moment

\mathbf{M}, m_{ij}	matice hmotnosti, prvek matice hmotnosti
\mathbf{m}_k	k-tý sloupec matice hmotnosti \mathbf{M}
N_C	kumulativní četnost
Ω, Ω_ν	úhlová vlastní frekvence
P_d	dovolený pracovní tlak pro potrubí (vnitřní návrhový tlak)
$P(I_0 \geq I_{0i})$	pravděpodobnost výskytu zemětřesení
\mathbf{q}, q_j	vektor zobecněných souřadnic, zobecněná souřadnice
r_n	poloměr n -té izoseisty (počítáno od epicentra)
R_m	mez pevnosti
R_p	smluvní mez kluzu
$R_t(I_0 \geq I_{0i})$	pravděpodobnost nepřekročení
$S_a(f_\nu, D_\nu)$	spektrum odezvy zrychlení pro ν -tou frekvenci a ν -tý poměrný útlum
$S_d(f_\nu, D_\nu)$	spektrum odezvy výchylky pro ν -tou frekvenci a ν -tý poměrný útlum
S_A	dovolený rozsah teplotních napětí
S_c	dovolené namáhání při pokojové teplotě
S_h	dovolené namáhání při pracovní teplotě
S_m	maximální dovolené namáhání
σ	směrodatná odchylka
σ_{kor}	korigované napětí
σ_{MVZ}	maximální napětí při MVZ
σ_{NPP}	maximální napětí při NPP
t	čas
t_n	minimální tloušťka stěny potrubí
T_p	tloušťka stěny potrubí
T	doba pozorování
T_t	teplota
τ	doba návratu
W_0	modul průřezu v ohybu

Seznam obrázků

1	Mapa seismických oblastí ČR, SR	19
2	Schéma jaderné elektrárny Temelín	24
3	Prostorové schéma primárního okruhu JE Temelín	25
4	Schéma horizontálního parogenerátoru	27
5	Schéma hlavních cirkulačních smyček primárního okruhu	29
6	Schéma studené a horké potrubní větve HCS	30
7	Lineární aproximace tabelárně daných spekter odezvy zrychlení	35
8	Ohniskové oblasti střední Evropy, území ČR	53
9	Oblast o poloměru 400 km pro hodnocení lokality JE Temelín	54
10	Četnostní graf pro zájmový region JE Temelín	55
11	Mapa maximálních pozorovaných intenzit zemětřesení ČR	60
12	Příklad útlumové křivky pro ohniskovou oblast Kraslice	61
13	Schéma metody SPSA	67
14	Kroky postupu hodnocení porušení potrubí	68
15	Příklad histogramu normálního rozdělení v programu Matlab	74
16	Ukázka „mraveniště“	75
17	Křivky seismického ohrožení pro lokalitu JE Temelín	77
18	Porovnání hodnot $(\sigma_{NPP} + \sigma_{kor})/S_m$ a P	82
19	Histogramy vstupních veličin σ_{MVZ} a SF	83
20	Křivky řešení vypočítané metodou SBRA	84
21	Křivky řešení vypočítané metodou SBRA barevné	85
22	Histogram rozložení hodnot pravděpodobnosti pro 4, 5 S_m	85

Seznam tabulek

1	Porovnání hodnot CDF nových reaktorů	5
2	Hodnoty CDF JE Temelín a JE Dukovany pro výkonový stav	6
3	Seznam externích událostí	8
4	Popis stupnice MSK-64 s uvedeným zrychlením povrchu	16
5	Vztah intenzity zemětřesení (MSK-64) a zrychlení podloží	18
6	Závazné projektové hodnoty zrychlení pro JE Temelín a Dukovany	21
7	Parametry tlakové nádoby JE Temelín	26
8	Parametry parogenerátorů JE Temelín	27
9	Parametry systému chlazení reaktoru	30
10	Ukázka uspořádání vstupních dat z katalogu zemětřesení	52
11	Napětí ve studené větvi HCP I.O. JE Temelín	56
12	Volba parametrů pro stanovení SF	57
13	Hodnoty napětí při 1% pravděpodobnosti porušení	69
14	Seismické ohrožení - pravděpodobnostní přístup	78
15	Doby návratu, kumulativní četnosti	79
16	Vypočítané parametry zemětřesení a , P	80
17	Stanovení korigovaných seismických napětí	81
18	Data vybraná z katalogu zemětřesení	100
19	Seismické ohrožení ETE od jednotlivých ohniskových oblastí	112

1 Úvod

Další rozvoj současné společnosti je závislý na řadě technologií, které jsou energeticky velmi náročné. Jaderná energetika patří ke spolehlivým zdrojům energie, které mohou zajistit vysokou poptávku. K současné společnosti zároveň patří vysoké nároky na bezpečnost všech technologií, tedy i jaderné energetiky.

Jadernou bezpečnost zajišťuje řada agentur a úřadů pomocí norem a předpisů, kterým musí provozované jaderné elektrárny i nové projekty vyhovět. Zároveň v současné době můžeme vidět zvyšování požadavků na jadernou bezpečnost pro nové projekty.

Přes všechnu snahu, která je vyvíjena v oblasti jaderné bezpečnosti, došlo v historii jaderné energetiky již k několika haváriím jaderných elektráren, které ovlivnily a budou ještě dlouhou dobu ovlivňovat život v okolí jaderných elektráren. Po havárii v Černobyli v roce 1986 trvalo dlouhou dobu, než došlo k obnovení důvěry v jadernou energetiku. Česká republika patřila k zemím, které přesto pokračovaly ve stavbě a spuštění nových bloků. Havárie jaderné elektrárny Fukušima v roce 2011 znovu ukázala rizika provozování jaderných elektráren a ničivé účinky přírodních jevů.

Nové projekty reaktorů, generace III+, přicházejí se zcela novými řešeními, která odrážejí reakce na následky havárie ve Fukušimě. At' už se jedná o rekombinátoary vodíku, které zabrání výbuchům vodíku uvnitř kontejnmentu, nebo lapače koria, které zabrání úniku taveniny aktivní zóny pod reaktorem, jedná se o důmyslná řešení zvyšující bezpečnost jaderných elektráren.

Česká republika nepatří k zemím, kde by hrozila silná zemětřesení nebo tsunami. Přesto patří externí události k významným faktorům, které je při hodnocení rizika třeba zahrnovat. Zátěžové testy, k nimž přistoupila většina provozovatelů jaderných elektráren po havárii v jaderné elektrárně Fukušima, vedly ke kontrolám seismické odolnosti jaderných elektráren a kontrole hodnot maximálního výpočtového zrychlení stanoveného pro konkrétní lokalitu. V případě jaderné elektrárny Temelín byla seismická odolnost elektrárny obsažena již v ruské projektové dokumentaci, pro hodnotu zrychlení podloží $0,1 g$ byly projektovány všechny stavby, systémy i komponenty, které mají vliv na jadernou bezpečnost. Hlavní komponenty, např. reaktory

byly projektovány dokonce na zrychlení $0,2 g$ [1].

Havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA (velká LOCA, Large Break Loss of Coolant Accident) je maximální projektová havárie definovaná jako gilotinové prasknutí hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny. V rámci žádosti o licenci jaderné elektrárny musí žadatel prokázat, že systém havarijního dochlazování je schopen zajistit patřičné množství chladiva za konzervativních předpokladů. Jistým změkčením požadavků je aplikace postupu US NRC *únik před roztržením* (leak before break, LBB), který eliminuje nutnost tzv. omezovačů švihnutí, ale netýká se systémů havarijního dochlazování ani kvalifikace komponent zařízení na vlivy okolního prostředí.

Stanovení četností výskytu LB LOCA pro velké průměry potrubí prezentovalo americké US NRC v dokumentu NUREG-1829 *Estimating Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Frequencies Through the Elicitation Process* [2] a dospělo k hodnotě četnosti výskytu 10^{-5} . NUREG-1829 neuvažuje zatížení náhodnými vlivy jako zemetřesení. Proto navazujícím logickým krokem bylo zodpovězení otázky, jaký vliv na četnosti výskytu LB LOCA stanovené v NUREG 1829 bude mít působení velké seismické události. Otázce se věnuje dokument NUREG-1903 *Seismic Considerations for Transition Break Size* [3], který je návrhem postupu pro další snižování požadavků na potrubí primárního okruhu JE.

Zmíněný postup navrhovaný US NRC nebyl dosud v rámci působnosti US NRC aplikován v důsledku havárie na JE Fukušima. Vzniká logicky otázka, zda je postup US NRC aplikovatelný na reaktory typu VVER 1000/320 a jaké by jeho aplikace v praxi v rámci bezpečnostních požadavků mohla mít dopady.

Proto se předložená práce věnuje v první fázi vědecké problematice stanovení seismického vstupu, resp. seismického ohrožení lokality jaderné elektrárny Temelín, aplikaci postupu US NRC na potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny Temelín a v závěru posouzení vhodnosti výpočtu metodou SBRA.

1.1 Cíle práce

Téma předkládané dizertační práce zasahuje do dvou oblastí. První oblastí je seismické inženýrství a druhou bezpečnost jaderných elektráren.

Dle platného bezpečnostního návodu JB-1.0 SÚJB *O požadavcích na projekt jaderných zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti* [4] musí být účinnost systémů havarijního chlazení aktivní zóny (SAOZ) zajištěna při všech postulovaných únicích z chladicího okruhu reaktoru (včetně nehod s porušením integrity primárního okruhu až do velikosti náhlého porušení největšího průměru potrubí systému) kapacitou systému a vhodnou konfigurací umístění připojení těchto systémů k tlakovému a chladicímu okruhu reaktoru.

Podobně americký dozor pro jaderné elektrárny (US NRC) definoval požadavky na systémy havarijního dochlazování jaderných elektráren v předpisu *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 1-Subsection NC-Class 2 Component* [5] následovně: Systém havarijního dochlazování musí být navržen tak, aby poskytoval odpovídající množství vody pro kompenzaci havárie se ztrátou chladiva typu velká LOCA (LB LOCA). US NRC iniciovalo projekt, kterým byly stanoveny četnosti výskytu LB LOCA a definovalo tzv. velikost přechodu k roztržení, která pro reaktory typu PWR, tedy i VVER 1000/320 je 456 mm. Uvedené hodnotě odpovídá četnost výskytu roztržení 10^{-5} reaktor/rok. Dalším krokem bylo stanovení vlivu seismické události na četnost výskytu LB LOCA.

Cíle práce spadající do oblasti seismického inženýrství jsou následující:

- vybrat metody vhodné pro stanovení seismického ohrožení vybrané lokality,
- stanovit křivky seismického ohrožení pro lokalitu jaderné elektrárny Temelín,
- stanovit doby návratu a roční pravděpodobnosti překročení jednotlivých intenzit zemětřesení pro lokalitu jaderné elektrárny Temelín,
- porovnat hodnoty intenzit zemětřesení aplikované v jaderné elektrárně Temelín a kriticky posoudit stav před havárií v jaderné elektrárně Fukušima a po následných stress-testech.

Na data získaná při řešení seismické tematiky navazují cíle práce z oblasti jaderné bezpečnosti:

- analyzovat význam seismického buzení z hlediska potrubního systému primárního okruhu jaderné elektrárny,

- s využitím dostupných dat stanovit napětí ve studené větvi hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny Temelín způsobené normálními pracovními podmínkami a seismickým buzením,
- aplikovat postup US NRC pro hodnocení vlivu seismické události na pravděpodobnost výskytu havárie se ztrátou chladiva typu velká LOCA,
- za pomoci metody SBRA (Simulation-Based Reliability Assessment) řešit otázku nejistot a neurčitostí výpočtu dle US NRC,
- posoudit vhodnost metodiky US NRC
 - pro reaktory VVER,
 - z hlediska fází existence jaderného zařízení.

1.2 Metodika práce

Zpracování tématu dizertační práce bylo systematicky rozloženo do následujících kroků:

- pochopení problému a sestavení konceptu řešení,
- shromáždění dat,
- popis zvolených metod řešení,
- vlastní výpočty,
- analýza výsledků,
- návrh opatření pro praxi.

1.3 Současný stav problému a jeho řešení

Havárie se ztrátou chladiva typu velká LOCA (LB LOCA) je postulována jako tzv. maximální projektová událost (design basis accident). Přestože analýzy [2, 6] prokazují, že pravděpodobnost výskytu havárie typu LB LOCA je velmi nízká a dosud se na žádné z provozovaných elektráren nevyskytla, zůstává LB LOCA v základních požadavcích na primární okruhy jaderných elektráren. Podstatou požadavku LB LOCA je prokázání dostatečnosti systémů havarijního ochlazení pro případ zmíněné havárie.

Zemětřesení patří mezi nejsledovanější vlivy působící na JE zvenčí. Aktualizace hodnot seismického ohrožení probíhá pro lokality jaderných elektráren Temelín a Dukovany opakovaně. Zároveň jsou postupy a výsledky pravidelně kontrolovány misemi IAEA. Pozornost je v rámci analýz věnována především ověření výskytu historických zemětřesení a doplňování katalogu zemětřesení instrumentálně zaznamenanými daty v blízkém okolí elektráren. Další oblastí zájmu je vyšetřování seismotektonické situace v okolí elektráren a analýzy oblastí s tzv. difúzní seismicitou. Velká pozornost je věnována také výskytu zlomů v lokalitách elektráren a posuzování jejich možné aktivity.

V současné době se pro vyjádření bezpečnosti jaderných elektráren využívá tzv. četnost poškození aktivní zóny (core damage frequency, CDF) vypočtená metodou PSA. Ve volně dostupných zdrojích [7], [8], [9] byly nalezeny hodnoty CDF pro nové projekty uvedené v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání hodnot CDF nových reaktorů

Typ reaktoru (dodavatel)	CDF [rok^{-1}]
EPR 1600 (AREVA)	$5,30 \cdot 10^{-7}$
AP 1000 (Westinghouse-Toshiba)	$5,09 \cdot 10^{-7}$
MIR 1200 (Atomstroyexport)	$5,94 \cdot 10^{-7}$,
APR 1400 (Korea)	$< 1,00 \cdot 10^{-5}$
CPR1000 (Čína)	$1,30 \cdot 10^{-5}$

Pro porovnání jsou hodnoty českých jaderných elektráren Dukovany a Temelín uvedeny v tabulce 2.

Dále zpráva o zátěžových testech JE Temelín [10] uvádí, že při uvažování externích událostí v projektovém rozsahu platí následující závěry analýz PSA 1. úrovně:

- příspěvek seismické události ke vzniku CDF je menší než $10^{-7}/rok$,

- příspěvek ostatních externích iniciačních událostí k riziku je zanedbatelný (CDF řádově 10^{-7} /rok).

Tabulka 2: Hodnoty CDF JE Temelín a JE Dukovany pro výkonový stav

Název jaderné elektrárny	CDF [rok^{-1}]
Temelín	$1,39 \cdot 10^{-5}$ [10]
Dukovany	$5,48 \cdot 10^{-6}$ [11]

Bezpečnostní požadavky podle informací World Nuclear Association se ve světě liší. Zatímco IAEA požaduje od nových projektů jaderných elektráren hodnotu CDF 10^{-5} , americké US NRC má limit 10^{-4} , i když většina amerických provozovaných JE splňuje podmínku CDF 10^{-5} .

Americké US NRC se rozhodlo vzhledem k velmi nízké pravděpodobnosti výskytu LB LOCA navrhnout změnu předpisu *Title 10, Section 50.46, Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water Nuclear Power Reactors* [12], který je součástí Kodexu federálních nařízení (*Code of Federal Regulations*). Navrhovaná změna by měla ovlivnit požadavky kladené na systém havarijního dochlazování (SAOZ), resp. zejména požadavky v odstavci, který se zabývá prasknutím potrubí větším než je velikost přechodu k roztržení.

Navrhovanou změnu prezentovalo US NRC ve dvou vydaných zprávách NUREG-1829 *Estimating Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Frequencies Through the Elicitation Process* [2] a NUREG-1903 *Seismic Considerations for Transition Break Size* [3]. První zpráva je věnována stanovení četností výskytu LOCA různého rozsahu, ale bez uvažování náhodných zatížení. Proto na ni navazuje další zpráva, která se zabývá závislostí vypočtených četností výskytu LOCA na pravděpodobnosti výskytu zemětřesení v lokalitě jaderné elektrárny. NUREG-1903 obsahuje řešení pro neporušené i porušené potrubí.

Dalším krokem podporujícím změny předpisu bylo vydání zprávy *Plant-Specific Applicability of 10 CFR 50.46 Technical Basis - A White Paper Supporting the Development of Regulatory Guidance for Applicants to Demonstrate that the Transition Break Size is Applicable to Their Plants* [13], tedy tzv. bílé knihy pro žadatele, která prokazuje, že *velikost přechodu k roztržení* (VPR, anglicky Transition Break Size - TBS) specifikovaná v dokumentu 10 CFR 50.46 [12] je použitelná pro zájmovou (jadernou) elektrárnu.

Všechny uvedené kroky amerického úřadu pro jadernou energii byly připraveny

před havárií v jaderné elektrárně Fukušima. V současné době (jaro 2016) je vzhledem k závažnosti havárie postup US NRC, který by vedl ke snížení požadavků kladených na SAOZ, odložen.

2 Externí vlivy

Jaderná elektrárna může být během své existence vystavena vnitřním (interním) i vnějším (externím) událostem, které mohou ovlivnit bezpečnost jejího provozu.

Pojmem externí události jsou označovány všechny přírodní jevy i události vyvolané činností člověka, které mohou v lokalitě JE nastat. K přírodním událostem patří kromě meteorologických jevů také zemětřesení a další geologické projevy. Meteorologické jevy, které mohou negativně ovlivnit bezpečnost JE jsou například extrémně silný vítr, sněhová pokrývka, námraza, nízké i vysoké teploty atd. Události způsobené činností člověka jsou například výbuchy (blízké průmyslové areály, plynovody), úniky chemických látek, pády letadel. Mezi externí události patří také sabotáž nebo teroristický útok.

Externí události, které se mohou vyskytnout v konkrétní lokalitě jsou specifické pro lokalitu (site specific). Výběru lokality pro výstavbu nové jaderné elektrárny proto předchází řada analýz, které mají za úkol případné externí jevy identifikovat. Charakteristika lokality a bezpečnostní analýzy systému JE jsou součástí předprovozní bezpečnostní zprávy každé jaderné elektrárny.

Na základě předpisů a dokumentů IAEA, WENRA, EPRI a dokumentů [14, 15] lze vytvořit seznam externích událostí, které je nutné uvažovat, viz tabulka 3. Základní dělení externích událostí je následující [15]

- přírodní události,
- události vyvolané lidskou činností, tzv. *man-made* události.

Tabulka 3: Seznam externích událostí (*příčina: P-přírodní, L-způsobené lidskou činností*)

Pořadí	Externí událost	Příčina
1	Anomálie spodní vody	P
2	Blesk	P
3	Dopravní nehody	L

Pokračování na další straně

Tabulka 3 – pokračování z předchozí strany

Pořadí	Externí událost	Příčina
4	Důlní činnost	L
5	Eroze pobřeží	P
6	Externí záplavy (povodně)	P
7	Extrémní rychlost větru	P
8	Extrémní sucho	P
9	Extrémní teplota podloží	P
10	Geotermální anomálie	P
11	Hurikány, Cyklony, Tajfuny	P
12	Krupobití	P
13	Lavina	P
14	Ledová bouře, mrznoucí déšť	P
15	Ledová tříšť	P
16	Mlha	P
17	Mohutná přílivová vlna	P
18	Náhodný dopad vojenských aktivit	L
19	Námraza	P
20	Nízká teplota vody	P
21	Nízká teplota vzduchu	P
22	Nízká vodní hladina (nízká hladina spodní vody)	P
23	Pád letadla	L
24	Pád meteoritu	P
25	Pád trosek	L
26	Písečná nebo abrazivní bouře	P
27	Podzemní voda	P
28	Povrchová eroze	P
29	Prasklina, puklina, šterbina	P
30	Projevy fauny (zvířata)	P
31	Projevy flóry (rostliny)	P
32	Projevy havárie jaderného provozu v okolí JE	L
33	Projevy havárie průmyslového nebo vojenského zařízení	L
34	Projevy nehody uvnitř areálu JE	L
35	Projevy ostatních externích požárů	P, L

Pokračování na další straně

Tabulka 3 – pokračování z předchozí strany

Pořadí	Externí událost	Příčina
36	Projevy silných vodních proudů	P
37	Přehrazení říčního toku	P
38	Přívalové deště	P
39	Sesuv půdy	P
40	Sluneční bouře	P
41	Sněhová bouře, tvorba závějí	P
42	Sněhová pokrývka	P
43	Solná (písečná) bouře	P
44	Spad vulkanického popelu	P
45	Stojaté vlnění	P
46	Tečení (ztekucení) zeminy	P
47	Tlak vzduchu (tlaková vlna)	P
48	Tok lávy, tok pyroplastické hmoty	P
49	Tok vulkanických trosek	P
50	Tornádo	P
51	Vibrační zhutnění půdy	P
52	Vířivé zemní proudy	P
53	Vlhkost	P
54	Vliv aktivity v areálu JE	L
55	Vliv elektromagnetického záření	P, L
56	Vliv letících předmětů	P
57	Vliv úniků z transportního potrubí	L
58	Vodní vlny (seichi)	P
59	Vulkanická činnost	P
60	Vulkanické střely	P
61	Vulkanické plyny	P
62	Výstup metanu	P
63	Výstup radonu	P
64	Vysoká teplota vody	P
65	Vysoká teplota ovzduší	P
66	Vysoký příliv	P
67	Vzednutí půdy	P

Pokračování na další straně

Tabulka 3 – pokračování z předchozí strany

Pořadí	Externí událost	Příčina
68	Vzednutí vody způsobené bouří	P
69	Zemětřesení	P
70	Změna říčního toku	L

2.1 Kombinace externích událostí

Kromě identifikace a analýz jednotlivých externích událostí je součástí bezpečnostních analýz také problematika kombinací dvou nebo více externích událostí. Nemusí jít nutně o výskyt událostí ve stejný časový okamžik. Některé kombinace externích událostí mohou mít nepříjemný dopad na bezpečnost JE i v případě, že se vyskytnou po sobě, nicméně v časovém intervalu, kdy bude odezva JE ovlivněna první, resp. předchozí událostí.

Metodika identifikace kombinací externích událostí významných pro bezpečnost provozu JE je uvedena např. v [15]. Postup je založen na vytvoření matice kombinací všech externích událostí uvedených v tabulce 3, tedy matice velikosti $n \times n$, kde $n = 70$. Diagonální prvky matice jsou vyloučeny vzhledem k tomu, že představují kombinaci externí události se sebou samou. Ostatní prvky matice je třeba hodnotit individuálně s ohledem na hodnocenou lokalitu.

Při kombinaci dvou nebo obecně n externích událostí může docházet k různým interakcím. Účinky externích událostí na JE se mohou vzájemně rušit nebo naopak zesilovat. Není proto triviální úlohou rozhodnout o významu jednotlivých prvků matice kombinací externích událostí. K hodnocení všech kombinací je potřeba mnoho dat a informací, nemluvě o specifických odborných znalostech např. z oboru meteorologie, geologie, hydrologie apod.

Výskyt více externích událostí během krátkého časového intervalu byl také příčinou havárie v jaderné elektrárně Fukušima.

2.2 Havárie JE Fukušima

Japonsko je jedním z hlavních uživatelů jaderné energetiky na světě. Před havárií v jaderné elektrárně Fukušima provozovalo Japonsko 53 reaktorů o celkovém výkonu přibližně 46 GW_e . Podíl jaderných elektráren na výrobě elektrické energie

v Japonsku se pohybuje okolo 30 %. Zároveň je Japonsko zemí, která leží na ostrovech tzv. pacifického ohnivého kruhu. Jedná se o pás ležící na okraji Pacifické litosférické desky, kde jsou velmi častá silná zemětřesení a zároveň jsou zde četné aktivní sopky. Japonsko má na svém území více než 50 aktivních vulkánů. Seismické ohrožení a ohrožení sopečnou aktivitou jsou tedy v Japonsku vysoké. Proto patří Japonsko ke světové špičce v technickém řešení odolnosti a bezpečnosti technologií, infrastruktury i civilních objektů vůči zmíněným jevům.

Jaderná elektrárna Fukušima se nachází na východním pobřeží ostrova Honšú. Velikost zemětřesení, ke kterému došlo 11. března 2011 ve 14:46 místního času [16], dosáhla magnituda 9,0. Zemětřesení mělo epicentrum v hloubce 24 km, 150 km severovýchodně od elektrárny. Jaderná elektrárna byla havarijně odstavena okamžitě při zaznamenání otřesů. V důsledku zemětřesení však došlo k poškození elektrizační sítě a JE Fukušima se ocitla ve stavu bez zdroje vnějšího napájení. Pro zajištění cirkulace chladiva a odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny byly automaticky spuštěny dieselgenerátory. JE se v tu chvíli nacházela ve stabilním stavu [16].

Přibližně 50 minut po hlavním otřesu zasáhla pobřeží vlna tsunami vysoká 14 – 15 m, tedy přesahující projektovou hodnotu pro ochrannou bariéru elektrárny. Vlna tsunami zaplavila kromě jednoho všechny dieselgenerátory a zatopeny byly také záložní baterie [16].

Podle zprávy IAEA [16] se připojení k externí elektrizační síti pro 1. a 2. blok JE Fukušima podařilo obnovit po 9 dnech, pro 3. blok po 14 dnech. Než dokázala společnost TEPCO dopravit do elektrárny mobilní zdroje napájení, uběhlo cca 10 – 20 hodin. Protože nebyl zajištěn dostatečný odvod tepla z AZ reaktorů, došlo k rozvoji havárie a poškození aktivních zón reaktorů 1., 2. a 3. bloku.

Výsledky analýz dokládají, že nejzávažnější situace byla na 1. bloku, kde k prvnímu poškození aktivní zóny došlo zřejmě již první den havárie hodinu po ztrátě dochlazování. Po odkrytí palivových článků a jejich zahřátí nad teplotu 900°C začala probíhat exotermická reakce, při které vzniká vodík a oxid zirkonia. Vodík vznikající při reakci stoupá vzhůru, tj. při havárii docházelo k nahromadění plynu pod střechou a po dosažení výbušné koncentrace došlo k explozi. Důsledkem bylo šíření radioaktivních látek do okolního prostředí [16].

Události z 11. 3. 2011 ukázaly, že ztráta vnějšího napájení v důsledku zemětřesení a ztráta nouzových zdrojů napájení v areálu jaderné elektrárny v důsledku vln tsunami mohou mít fatální následky. Proto většina provozovatelů jaderných elektráren ve světě přistoupila k tzv. zátěžovým testům (stress testům).

Akcelerometry umístěné na 2. bloku JE Fukušima I naměřily při zemětřesení ná-

sledující hodnoty zrychlení podloží [16]:

- horizontální zrychlení: $a_h = 550 \text{ cm.s}^{-2}$,
- vertikální zrychlení: $a_v = 302 \text{ cm.s}^{-2}$.

Horizontální složka zrychlení při zemětřesení tedy odpovídala 0,56 *g*. Pro porovnání, horizontální složka zrychlení uvažovaná pro české jaderné elektrárny při zátěžových testech byla 0,1 *g*.

3 Zemětřesení

Zemětřesení je fyzikální jev, při němž dochází k náhlému uvolnění deformační energie nahromaděné v horninových systémech zemské kůry a zemského pláště. Zemětřesení se projevuje krátkodobými rychlými pohyby zemského povrchu, které trvají řádově jednotky až desítky sekund [17]. Uvolnění energie je následováno šířením seismických vln zemským tělesem od ohniska zemětřesení. V případě silných tektonických zemětřesení se seismické vlny mohou šířit zemským tělesem i několik hodin. V takovém případě se mluví o tzv. vlastních kmitech Země [17]. Právě seismické vlny způsobují zřícení budov, sesuvy půdy, tsunami, laviny, dokonce i trhliny v zemi, změnu reliéfu zemského povrchu nebo změnu toků řek.

Z hlediska příčiny můžeme zemětřesení rozdělit na dvě skupiny, přírodní a indukovaná. Příčina přírodních zemětřesení souvisí se strukturou Země, dělí se na [17]

- rýťová (3%) - jsou způsobena zřícením podzemních dutin, většinou krasového původu,
- sopečná (7%) - souvisí se sopečnou činností, často předcházejí erupcím sopek,
- tektonická (90%) - jsou způsobena pohybem tektonických desek, proto jsou nejničivější.

Podle hloubky ohniska (hypocentra) zemětřesení lze dělit zemětřesení na mělká, středně hluboká a hluboká [17]. Na zemském povrchu je intenzita zemětřesení největší v epicentru. Epicentrum je definováno jako průmět hypocentra na zemský povrch.

3.1 Seismické ohrožení

Pojmy seismické ohrožení (seismic hazard) a seismické riziko (seismic risk) se často zaměňují. Podle definice v [17, 18] je seismické ohrožení vyjádřeno velikostí zemětřesení (měřené intenzitou zemětřesení nebo špičkovým zrychlením podloží -

PGA), kterou lze v daném místě za specifikovaný časový interval očekávat s určitou pravděpodobností, obvykle 0,95.

Seismické riziko je podle [17] definováno jako soubor škod a ztrát, které nastanou na chráněných zájmech při působení zemětřesení. Seismické riziko je dáno seismickým ohrožením hodnocené lokality a zranitelností objektů (průmyslových a technologických objektů) a také podloží ve vybrané lokalitě. Proto platí, že v jedné konkrétní lokalitě s daným seismickým ohrožením bude seismické riziko pro různé objekty odlišné. Objekty s citlivými a nebezpečnými technologiemi budou mít vyšší seismické riziko než např. objekty civilní ve stejném místě. Důvodem jsou větší dopady na obyvatelstvo, majetek a životní prostředí. Seismické riziko konkrétního systému lze snižovat technickými prostředky, snižováním seismické zranitelnosti systému. Požadavky na specifická zařízení (např. chemické provozy nebo jaderné elektrárny) jsou obsaženy v předpisech, normách a technických standardech.

Seismické ohrožení je funkcí závislou na místě a času [17], tj. závisí na poloze uvažované lokality vzhledem k ohniskovým oblastem, jejichž zemětřesení se mohou v lokalitě projevit. Pro jednotlivé ohniskové oblasti je důležitým parametrem vzdálenost od lokality, a také parametr charakterizující útlum seismických vln ve směru od ohniska zemětřesení k lokalitě. Seismické ohrožení také závisí na časovém intervalu, který uvažujeme. Čím delší je časový interval, tím větší otřes je nutné očekávat, protože silná zemětřesení se vyskytují zřídka a značně nepravidelně, a to přesto, že je pravda, že každá seismogenní struktura má z fyzikálního hlediska jen jistou kapacitu danou svou velikostí a umístěním v tektonofyzikálních polích planety [19].

Seismické ohrožení je třeba chápat jako potenciál zemětřesení způsobit škody, ztráty a újmy na chráněných zájmech.

3.2 Intenzita zemětřesení

V kronikách a jiných historických dokumentech lze najít řadu záznamů o zemětřeseních. Často se jedná o popisy pobořených budov nebo vnímání otřesů lidmi. Na základě pozorovaných makroseismických jevů, resp. účinků zemětřesení v místě pozorování byly vytvořeny makroseismické stupnice pro hodnocení intenzity zemětřesení.

První makroseismickou stupnici hodnocení intenzity zemětřesení představil v roce 1902 italský seismolog Giuseppe Mercalli [20]. Mercalliho stupnice byla později modifikována. V USA se rozšířila *Mercalliho modifikovaná stupnice*, ve střední Evropě byla používána dvanáctistupňová škála MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg). Existuje řada dalších makroseismických stupnic, např. japonská sedmistupňová JMA (Japan

Meteorological Agency), v Evropě byla nejčastěji využívána dvanáctistupňová stupnice MSK-64, kterou vytvořili Medvedev, Sponheuer a Kárník v roce 1964. Každá stupnice obsahuje označení stupně intenzity zemětřesení, jeho název, popis dopadů a hodnotu zrychlení, které bylo vyvoláno danými otřesy [21].

Jednotlivé stupně MSK-64 jsou stručně uvedeny v tabulce 4 [17, 21, 22]. Charakteristiky jednotlivých stupňů stupnice MSK-64 vychází z přesných definic typů budov, počtu pozorování zemětřesení a klasifikace škod způsobených zemětřesením na budovách. Hodnoty zrychlení jsou vzhledem k makroseismické povaze stupnice obvykle uváděny pouze pro $5 - 10^\circ$. Podrobný popis jednotlivých stupňů MSK-64 je prezentován např. v [23].

Tabulka 4: Popis stupnice MSK-64 s uvedeným zrychlením povrchu [17, 21, 22]

Stupeň	Označení	Zrychlení [$mm.s^{-2}$]	Popis
I.	nepozorovatelné	-	Člověk nerozpozná, pouze přístroje.
II.	slabé	-	Rozpoznatelné v horních patrech budov citlivými lidmi.
III.	lehké	-	Vibrace, lustry se pohybují; srovnatelné s vibracemi způsobenými projíždějícím těžkým nákladním automobilem.
IV.	mírné	-	Drnění oken, cinkot příborů a nádobí, zdi vydávají praskavé zvuky.
V.	dosti silné	120 – 250	Lze rozpoznat v krajině, probouzí spící, praskání oken, kyvadlové hodiny se mohou zastavit.
VI.	silné	250 – 500	Vrávorání při chůzi, padají předměty, rozbíjí se nádobí, praskliny v omítce.
VII.	velmi silné	500 – 1000	Lze jen obtížně stát, zvony zvoní, trhliny ve zdech.
VIII.	bořivé	1000 – 2000	Padají komíny, poškození budov, pohybující se těžký nábytek.
IX.	pustošivé	2000 – 4000	Panika, vážné poškození domů, větší trhliny v půdě.
X.	ničivé	4000 – 8000	Zničené budovy, porušení přehrad, velké trhliny v půdě.
XI.	zemětřesná katastrofa	-	Roztržení kolejí a potrubí, zničené mosty, změny terénu.
XII.	velká zemětřesná katastrofa	-	Velké předměty létají vzduchem, úplné zničení, rozsáhlé terénní změny.

Nejznámější charakteristikou používanou pro vyjádření velikosti zemětřesení od 40. let 20. století je tzv. *magnitudo*. Tzv. lokální magnitudo zavedl jako první Charles Richter [24]. Magnitudo je definováno jako veličina, jejíž hodnota je přibližně stejná při určení ze seismogramů v libovolné vzdálenosti od zdroje [24].

Nejprve je třeba definovat amplitudu A seismické vlny [24]. V homogenním a isotropním prostředí platí

$$A = \alpha_z \cdot \Delta^{-\beta}, \quad (3.1)$$

kde α_z je parametr definující velikost zemětřesení v ohnisku a β parametr vyjadřující úbytek amplitudy se vzdáleností Δ . Existuje řada definic magnituda, uveďme zde Gutenbergův vztah pro magnitudo vypočítané z prostorových vln, který umožňuje použití pro zemětřesení značně rozdílných hloubek [24], další definice obsahují např. publikace [23] a [25]. Dle Gutenberga je magnitudo dáno vztahem

$$m_b = \log \frac{A}{T} + \sigma(\Delta, h) + konst, \quad (3.2)$$

kde $\sigma(\Delta, h)$ je tzv. kalibrační funkce různá pro jednotlivé typy vln. Samotná informace o zemětřesení o magnitudu n není úplnou informací. Je třeba ji vždy doplnit dalšími údaji, a to o hloubce ohniska zemětřesení, vzdálenosti od epicentra atd.

V současné době lze velikost otřesů způsobených zemětřesením měřit přístroji, tzv. akcelerometry, které zaznamenávají akcelerogramy. Výsledkem je akcelerogram, časový průběh zrychlení. Získaná data jsou mnohem přesnější, navíc přístroje zaznamenávají intenzity, které člověk nepocítí uje. Naměřená data lze využívat pro návrhy seismicky odolných staveb.

Při studiu zemětřesení je třeba pracovat s množinou dat, která je homogenní v celém svém rozsahu. Jestliže část dat byla zaznamenána v makroseismické stupnici, bylo třeba najít způsob, jak záznamy vyjádřit formou zrychlení podloží.

Vyjádření vztahu mezi intenzitou a zrychlením podloží není triviální úlohou. V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty prezentované v práci [26], lze je najít i v dalších pracích, např. [17].

3.3 Zemětřesení na území České republiky

Území České republiky se může jevit jako seismicky klidná oblast, přesto je pro civilní i technologické celky nezbytné respektovat chování objektů při zemětřeseních a jim podobných jevech jako jsou exploze, vibrace a důlní otřesy. K tomu je potřeba

Tabulka 5: Vztah intenzity zemětřesení (MSK-64) a zrychlení podloží [26]

Intenzita [°MSK-64]	Zrychlení [$m.s^{-2}$]
4	<0,025
5	0,025
6	0,05
7	0,1
8	0,2
9	0,4
10	>0,4

znát nejen hodnoty špičkového zrychlení podloží (PGA), ale také další specifické charakteristiky jako jsou akcelerogramy, spektra odezvy a odezva místního podloží. Prvním krokem při návrhu civilních i technologických objektů je stanovení seismického ohrožení vybrané lokality.

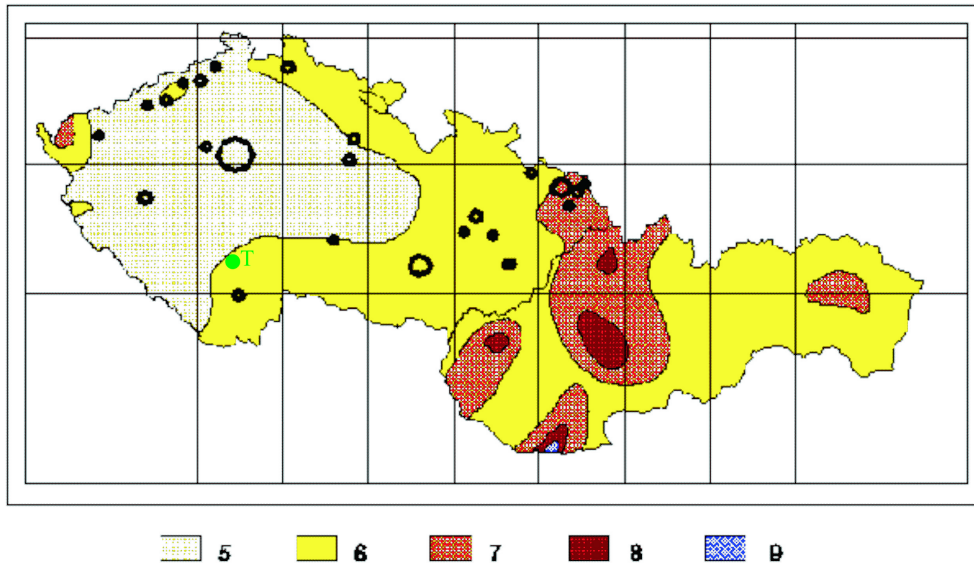
Z analýzy historických zemětřesení vyplývá, že zemětřesné ohrožení na území České republiky je malé [27]. Geotektonickou strukturu území České republiky tvoří Český masiv, k seismické aktivitě dochází převážně v hraničních oblastech s Alpskou soustavou [21]. Seismicky nejaktivnější oblastí na území České republiky je severní Morava, severovýchodní Čechy a dále oblasti tzv. zemětřesných rojů - Chebsko, Sokolovsko a Kraslicko v západních Čechách [28]. Ke slabým zemětřesením v uvedených oblastech dochází neustále. Významná série citelnějších zemětřesení, která trvala více než dva měsíce, se objevila na přelomu let 1985-1986. Otřesy způsobily mnoho škod na budovách. Dále jsou aktivními zónami mariánskolázeňský, podkrušnohorský a hronovsko-poříčský zlom a oblast Slezska.

Na území České republiky je rozmístěna síť seismologických stanic, které mají důležitou úlohu v oblastech, kde jsou seismicky zranitelné objekty – vodní nádrže, chemické provozy, jaderné elektrárny apod.

Mapa seismických oblastí České a Slovenské republiky je uvedena na obrázku 1 [21]. Síla otřesů je vyjádřena na základě stupnice MSK-64, viz výše tabulka 4.

3.4 Zemětřesení v lokalitě JE Temelín

Jaderná elektrárna Temelín se nachází v nadmořské výšce 510 m n.m. Elektrárna leží ve vzdálenosti 45–50 km od státní hranice s Rakouskem a se SRN. Okolí jaderné



Obrázek 1: Mapa seismických oblastí ČR, SR s vyznačenou polohou JE Temelín [21]

elektrárny bylo z geologického hlediska detailně zkoumáno až do vzdálenosti 30 km od JE. Původní geologické průzkumné práce z 80. let jsou postupně doplňovány, např. v letech 1991 - 1994 proběhly další průzkumy na doporučení IAEA. [1].

Lokalita JE Temelín se vzhledem ke geologickým strukturám nachází na podloží tvořeném jihočeskou větví moldanubika a jihočeské pánve, které jsou součástí Českého masívu. Český masív byl vytvořen na konci paleozoika (prvohor) v závěrečné fázi variského horotvorného cyklu. Nejrozšířenějšími horninami jsou zde ruly, žuly a křemeny [1].

Jaderná elektrárna Temelín má skalní podklad, hlavní objekty byly umístěny na homogenním bloku s rozměry většími než 500 x 500 m [1].

Seismická aktivita v okolí JE Temelín je monitorována sítí seismologických stanic, kterou spravuje Ústav fyziky země Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně [29]. Monitorování probíhá od roku 1991 a splňuje doporučení IAEA.

V roce 2006 proběhlo rozšíření a modernizace soustavy měřicích stanic a zároveň byl uveden do provozu *Seismologický informační systém* dostupný veřejně na webové stránce <http://sid.ipe.muni.cz/>.

Další obor, který umožňuje rozšíření souboru dat o výskytu zemětřesení v lokalitě, je paleoseismologie. Silná prehistorická zemětřesení zanechala stopy, které lze nalézt v geologických strukturách. Pro JE Temelín byl například v letech 2009-2010 proveden paleoseismologický výzkum tzv. Hlubockého zlomu [29].

Diagnostická měření na JE Temelín zajišťuje systém TMDS (Temelin Monitoring

Diagnostic System), který je tvořen devíti specializovanými diagnostickými systémy [30]. Vibrace tlakové nádoby reaktoru a jeho vnitřních částí jsou monitorovány systémem RVMS (Reactor Vibration Monitoring System). Seismické buzení monitoruje podsystém SMS (Seismic Monitoring System). Snímače systému SMS jsou tříosé akcelerometry umístěné v ochranných skříňkách a kotvené do stavby, z nichž

- dva akcelerometry jsou umístěny ve volném terénu,
- jeden akcelerometr je umístěn na spodní základové desce reaktorovny 1. bloku,
- jeden akcelerometr je umístěn na vnitřní vestavbě kontejmentu 1. bloku ve výšce 1,5 m.

Systém SMS poskytuje diagnostické parametry pro další vyhodnocení. Jedná se o údaje o seismické odezvě systému, špičkovém zrychlení, kumulativní absolutní rychlosti, spektru odezvy. Cílem systému je nejen monitorování vibrací vyvolaných zemětřesením, ale také vyhodnocení událostí vzhledem k limitům a archivace naměřených dat. Dále systém zajišťuje vytvoření signálů „ALARM“ pro blokovou dozornou obou bloků a TMDS - signál „zemětřesení“ nebo signál „překročeno projektové zemětřesení“. Systém SMS poskytuje podklady pro činnost obsluhy blokové dozorny, tj. alarmová hlášení, doporučení pro případné odstavení bloku, podklady pro analýzu seismické události a doporučení pro rozsah prohlídky zařízení [30].

3.5 Projektové hodnoty zrychlení pro JE Temelín

Projektové hodnoty pro výstavbu jaderných zařízení jsou obvykle stanovovány ve dvou úrovních [31]:

- MVZ (maximální výpočtové zemětřesení), někdy označované jako MDE (Maximum Design Earthquake) nebo SL2, resp. v amerických předpisech SSE (Safe Shutdown Earthquake),
- PZ (projektové zemětřesení), označované také jako DE (Design Earthquake) nebo SL1, resp. dle amerických předpisů OBE (Operating Basis Earthquake).

První hodnocení seismického ohrožení v lokalitě JE Temelín bylo provedeno v roce 1979 [32]. Tehdy bylo stanoveno, že seismické ohrožení lokality nepřekročí s pravděpodobností větší než 90% intenzitu 5,5°MSK – 64, resp.

$$MVZ = 6^\circ \text{MSK-64}, PZ = 5^\circ \text{MSK-64}.$$

Další hodnocení seismického ohrožení lokality proběhlo na doporučení mise IAEA v letech 1993-1995. Výsledkem hodnocení bylo zvýšení hodnoty MVZ na 6,5° MSK-64. S ohledem na požadavky IAEA byla hodnota navýšena na 7° MSK-64. Stanovený údaj byl použit pro výstavbu elektrárny pro všechny komponenty, které mají vliv na jadernou bezpečnost. Hlavní komponenty byly projektovány dokonce na hodnotu 0,2 g [36]. Po roce 2000 byly vydány předpisy IAEA (NS-G-3.3 [33] a NS-G-1.6 [34]). Předpis NS-G-3.3 [33] byl v roce 2010 nahrazen předpisem SSG-9 [35].

Závěrem zátěžových testů provedených po havárii v JE Fukušima je, že ve střední Evropě a na území ČR se nevyskytují žádné tektonické struktury, které by mohly zapříčinit vznik velmi silných zemětřesení [10]. Projektové hodnoty odolnosti zařízení i stavebních objektů pro obě české jaderné elektrárny jsou uvedené v tabulce 6 [10, 32]. Doba trvání největších intenzit (maximální fáze pohybu podloží) dle [17] je jedním z fyzikálních parametrů zemětřesení, jehož hodnota ve střední Evropě dosahuje maximálně několika sekund.

Tabulka 6: Závazné projektové hodnoty zrychlení pro JE Temelín a JE Dukovany [10]

DBE	Úroveň	Zrychlení PGA [g]	Doba trvání největších intenzit	Porovnatelná intenzita I [° MSK – 64]
MVZ	$SL2_{hor}$	0,1	4 – 8 s	7
	$SL2_{ver}$	0,07	4 – 8 s	
PZ	$SL1_{hor}$	0,05	4 – 8 s	6
	$SL1_{ver}$	0,035	4 – 8 s	

4 Primární okruh jaderné elektrárny Temelín

V současné době je ve světě nejčastěji používaným typem jaderných reaktorů tlakovodní reaktor (přibližně 60% všech reaktorů [37]), obecně označovaný zkratkou PWR (Pressurized Water Reactor). V České republice jsou v obou jaderných elektrárnách JE Dukovany a Temelín v provozu tlakovodní reaktory ruské koncepce označované zkratkou VVER (z rus. водо-водяной энергетический реактор, vodo-vodní energetický reaktor). V JE Dukovany jsou instalovány čtyři jaderné reaktory typu VVER 440/213, v JE Temelín dva reaktory typu VVER 1000/320.

Tlakovodní reaktory jsou charakteristické především dvouokruhovým systémem, kompaktním uspořádáním aktivní zóny, využíváním obohaceného paliva ve formě oxidu uraničitého UO_2 nebo tzv. paliva MOX (z angličtiny Mixed OXide fuel), kompenzací přebytečné reaktivity pomocí kyseliny borité H_3BO_3 , řízením reaktoru absorpčními tyčemi zasouványi shora. Mezi další charakteristiky tlakovodních reaktorů patří relativně jednoduchý chladicí systém reaktoru, korozní a erozní problémy zvětšující se s tlakem, teplotou a rychlostí vody v primárním okruhu reaktoru, kampanová výměna paliva pod vrstvou vody, vysoká stabilita reaktoru daná velkou hodnotou záporného teplotního koeficientu reaktivity, a ochranná obálka (kontejnment) [38].

Za dlouhou dobu provozování tlakovodních reaktorů ve světě byly zjištěny také jejich technické limity - omezení výkonu (výkonový limit tlakové nádoby reaktoru 6000 MWt), omezená intenzita přestupu tepla z hlediska krize varu ($< \sim 180 Wcm^{-2}$), omezená teplota zirkoniového pokrytí ($< 380^\circ C$) [38].

Za nevýhody tlakovodních reaktorů lze označit vyšší požadavky na štěpný materiál dané především vysokou absorpcí neutronů ve vodíku lehké vody chladiva a v konstrukčních materiálech aktivní zóny reaktoru, nízkou účinnost termodynamického cyklu (kolem 30 až 34%), která je dána nízkými parametry sekundární páry - turbína pracuje se sytou párou [39].

4.1 Popis funkce jaderné elektrárny

Teplu vznikající v aktivní zóně reaktoru štěpením jader uranu je odváděno chladicí demineralizovanou vodou, která slouží také jako moderátor neutronů. K regulaci výkonu reaktoru přispívá příměs kyseliny borité (max. 12g/l vody). Cirkulace ohřáté vody v primárním okruhu jaderné elektrárny je zajištěna hlavními cirkulačními čerpadly (HCČ). Chladivo proudí do reaktoru studenými větvemi hlavního cirkulačního potrubí (HCP). Z reaktoru je ohřáté chladivo vedeno horkými větvemi HCP do parogenerátorů, kde dochází k předání tepla z primárního okruhu do sekundárního. Z PG proudí chladivo zpět studenou větví HCP do reaktoru.

Parogenerátor je horizontálně umístěný válcový výměník, v němž jsou teplosměnné trubky. Parogenerátory jsou styčnou částí mezi jadernou (primární) a nejadernou (sekundární) částí elektrárny. V JE Temelín je každý blok vybaven čtyřmi parogenerátory, tj. čtyřmi chladíci smyčkami.

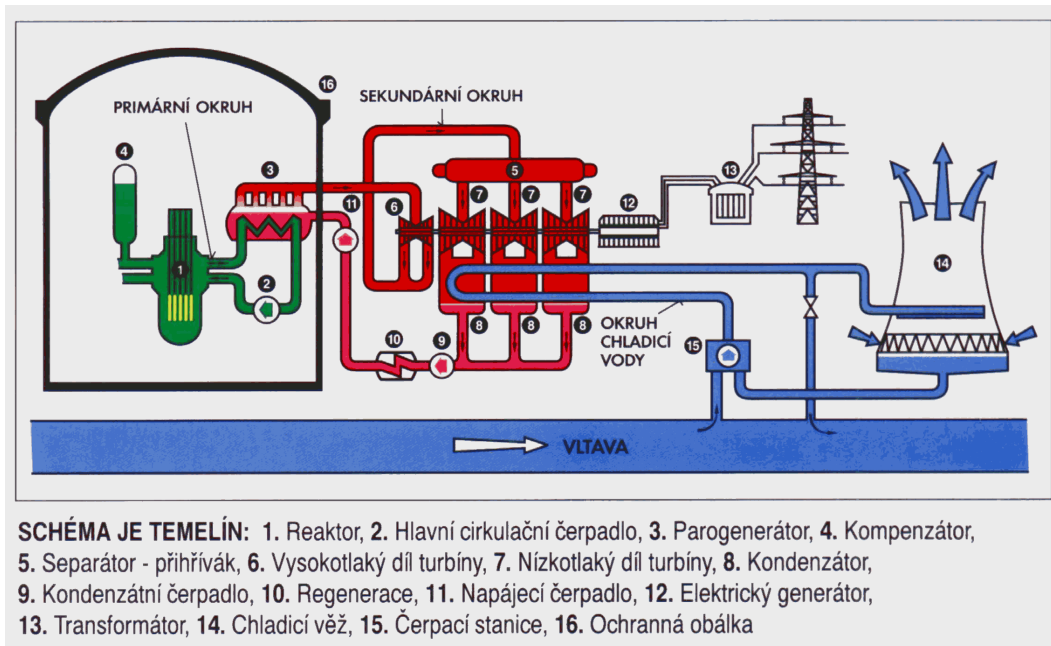
Hlavní součástí *sekundárního okruhu* je turbogenerátor tvořený parní turbínou, elektrickým generátorem, budičem a pomocným budičem. V parogenerátorech se voda přeměňuje na páru, kterou jsou poháněny turbíny. Pára má tlak 6,3 MPa a teplotu 278,5°C. V JE Temelín je každý z bloků vybaven jedním turbogenerátorem o elektrickém výkonu 1000 MW.

Cyklus pokračuje v tzv. *terciálním (chladícím) okruhu*, kde se v kondenzátorech umístěných pod turbínami pára sráží na povrchu titanových trubek, ve kterých cirkuluje chladicí voda. Terciální okruh odvádí vodu do *chladících věží*, tzv. koncového jímače tepla, kde se voda ochlazuje samovolně odparem a prouděním vzduchu. Do ovzduší uniká jen čistá vodní pára.

Schéma jaderné elektrárny Temelín ilustrující funkci jaderné elektrárny je zobrazeno na obrázku 2 [40]. Realističtější pohled nabízí prostorové schéma na obrázku 3 [39].

4.2 Hlavní komponenty primárního okruhu JE Temelín

Primární okruh každého z bloků JE Temelín je tvořen jaderným reaktorem, čtyřmi parogenerátory, cirkulačními čerpadly a systémem kompenzace objemu. Primární okruh každého bloku JE Temelín je uzavřen v hermetické ochranné obálce tvaru válce s vrchlíkem - v plnotlakém železobetonovém *kontejnmentu*. Kontejnment je



Obrázek 2: Schéma jaderné elektrárny Temelín [40]

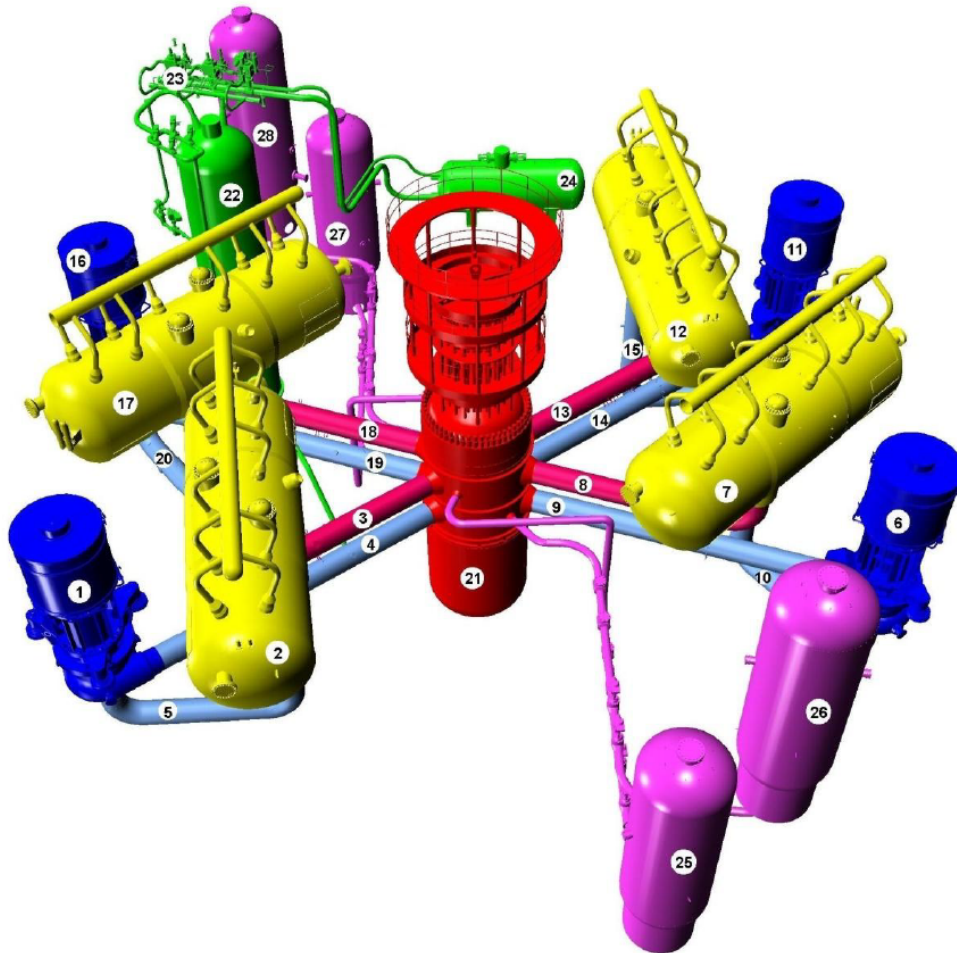
železobetonová stavba z předpjatého betonu. Výška kontejnmentu je 56 m, vnitřní průměr 45 m a tloušťka stěny je ve válcové části 1,2 m, tloušťka stěny vrchlíku je 1,1 m. Vnitřní povrch kontejnmentu kryje 8 mm silná vrstva nerezové oceli. Uvnitř kontejnmentu je trvale udržován podtlak [36].

Tlaková nádoba

Tlaková nádoba reaktoru (TNR) JE Temelín byla projektována na životnost 40 let. Základním materiálem je feritická ocel *15CH2NMFA* s nerezavějícími návary *04Ch20N10G2B* [39].

Těleso TNR je válcová nádoba svařená z kovaných prstenců a eliptického dna. Horní část je tvořena přírubovým prstencem, na jehož čelní ploše je 54 otvorů se závitem M 170 x 6 pro závrtné šrouby těsnicího uzlu a jeden pár drážek pro uložení těsnicích kroužků. Pod přírubovým prstencem je horní řada hrdel se čtyřmi nátrubky Js 850 pro výstup chladiva z reaktoru se dvěma nátrubky Js 270 systému havarijního chlazení aktivní zóny a nátrubek kontrolního a měřicího systému. Pod horní řadou je řada hrdel se čtyřmi nátrubky Js 850 pro vstup chladiva a dvěma nátrubky Js 270 systému havarijního chlazení aktivní zóny [39].

Opěrným nákrůžkem pod dolní řadou hrdel dosedá těleso tlakové nádoby na nosný kroužek, který je upevněn na opěrném rámu v betonové šachtě reaktoru. Po obvodu opěrného nákrůžku jsou výřezy pro pera, středící a upevňující nádobu na nosném



Obrázek 3: Prostorové schéma primárního okruhu JE Temelín [39]

Vysvětlivky: : 1–HCP, 2–PG, 3–horká větev HCP , 4–studená větev HCP, 5–studená větev HCP, 6–HČČ, 7–PG, 8–horká větev HCP , 9–studená větev HCP, 10–studená větev HCP, 11–HČČ, 12–PG, 13–horká větev HCP , 14–studená větev HCP, 15–studená větev HCP, 16–HČČ, 17–PG, 18–horká větev HCP , 19–studená větev HCP, 20–studená větev HCP, 21–reaktor, 22–KO, 23–Uzel pojistných ventilů systému kompenzace objemu, 24–barbotážní nádrž, 25–28–hydroakumulátory.

kroužku. V oblasti hrdel jsou na vnějším povrchu vybrání a záchyty pro upevnění vodících kroužků systému ultrazvukové kontroly tělesa nádoby. Na vnitřním povrchu přírubového prstence je osazení určené k zavěšení šachty reaktoru. K radiálnímu upevnění šachty reaktoru je ve spodní části tělesa tlakové nádoby navařeno osm konzol s vodícími pery, která zapadají do výřezů šachty. Mezi horní a dolní řadou hrdel je uvnitř nádoby rozdělovací kroužek, ke kterému při provozu těsně přiléhá šachta a odděluje tak vstupní a výstupní proud chladiva [39].

V nátrubcích SAOZ jsou tenkostěnná nerezová pouzdra, která vytvářejí tepelnou ochranu materiálu nátrubků během přívodu havarijní chladicí vody.

Na čelní ploše přírubového prstence ve zkoseném vybrání je nátrubek pro odvod případných úniku vody těsněním hlavního přírubového spoje. Vnější průměr příruby nádoby je $D = 4570 \text{ mm}$ a výška nádoby je 10880 mm [39]. Další parametry TNR jsou uvedeny v tabulce 7 [41].

Tabulka 7: Parametry tlakové nádoby JE Temelín [41]

Průměr TNR	4,5 m
Výška TNR	10,9 m
Síla stěny válcové části TNR	193 mm
Hmotnost TNR	322 t
Palivové kazety	163 ks
Hmotnost paliva	92 t
Chladivo a moderátor	H_2O
Tlak v reaktoru	15,7 MPa
Teplota chladiva	290 °C – 320 °C

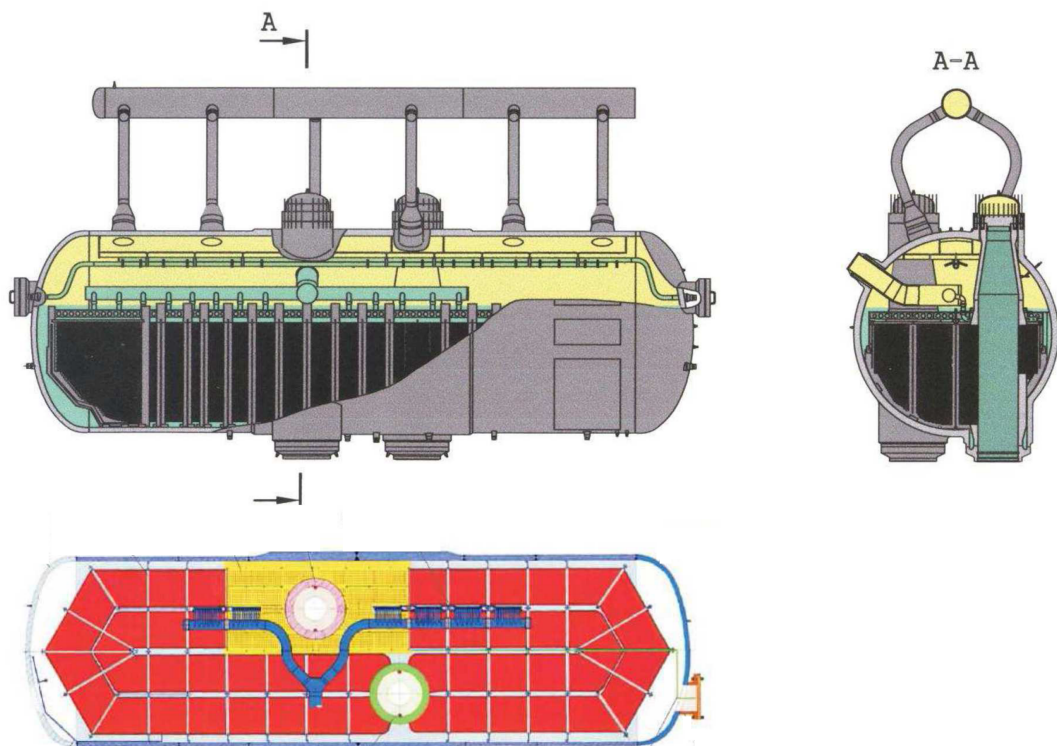
Parogenerátor

Parogenerátor (PG) je rekuperační výměník vyrobený z chromniklové korozi-vzdorné oceli. Přídavné části jsou vyrobeny z nízkolegované konstrukční oceli. Funkcí parogenerátoru je přenos tepla z primární vody ohřívané v reaktoru přes teplosměnné trubky do sekundárního okruhu. PG tak plní současně úlohu výměníku a bariéry, která zajišťuje, že primární radioaktivní voda zůstává uzavřena v primárním okruhu. Těleso a nátrubky parogenerátoru jsou vyrobeny z oceli *10GN2MFA*, kolektor páry z oceli *16GS* a kolektor napájecí vody z oceli *20*. Teplosměnné trubky, kterých je v parogenerátoru 11 000, jsou vyrobeny z oceli *08Ch18N10T* [39].

Parogenerátory v JE Temelín jsou typu PGV - 1000M o výkonu 750 MW_t . Parogenerátorem projde za hodinu 21200 m^3 chladiva a vyrobí se 1470 t páry za hodinu. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 8 [39]; schéma parogenerátoru je znázorněno na obrázku 4 [42].

Tabulka 8: Parametry parogenerátorů JE Temelín [39]

Pracovní tlak na straně II.O.	$6,28 \pm 0,2$ MPa
Pracovní tlak na straně I.O.	$15,7 \pm 0,3$ MPa
Tlak tlakové zkoušky na pevnost na straně II.O.	10,8 MPa
Tlak tlakové zkoušky na pevnost na straně I.O.	24,5 MPa
Teplota napájecí vody	220 ± 5 °C, <i>min.</i> 164 ± 4 °C
Teplota chladiva I.O. - vstup	$320 \pm 3,5$ °C
Teplota chladiva I.O. - výstup	$289,7$ °C
Teplota vyrobené páry	$278,5 \pm 2$ °C
Vlhkost vyrobené páry	<i>max.</i> 0,2%



Obrázek 4: Schéma horizontálního parogenerátoru [42]

Systém kompenzace objemu

V průběhu provozu jaderného reaktoru dochází ke změnám výkonu; také při nájždění a odstavení reaktoru se mění teplota a objem chladiva, což vede ke změnám tlaku v I.O. [43]. Systém kompenzace objemu slouží k vyrovnávání tlakových a objemových změn v chladivu v primárním okruhu [36, 44]. Systém kompenzace objemu tvoří kompenzátor objemu, barbotážní nádrž, pojistné ventily, odlehčovací

ventil a elektroohříváky. Změny tlaku a objemu chladiva v primárním okruhu jsou primárně způsobeny teplotními objemovými změnami chladiva. Přestože koeficient objemové teplotní roztažnosti vody je relativně malý [36], vzhledem k objemu chladiva v I.O. by objemová změna bez kompenzace způsobila významné mechanické namáhání I.O., při kterém by mohlo dojít k porušení některé z komponent I.O. a k úniku radioaktivního chladiva.

Kompenzátor objemu je vertikální ocelová tlaková nádoba zapojená do jedné z horkých větví HCP. Výška KO je 16 m, průměr 3,5 m. KO je naplněn do dvou třetin své výšky vodou, horní třetina obsahuje páru. Ve spodní části KO, mezi dolním hladkým prstencem a spodním eliptickým dnem je umístěn blok elektroohříváků [45]. Každý z elektroohříváků je tvořen topnou spirálou v trubce s příkonem 90 kW. Elektroohříváky se spouštějí v případě poklesu tlaku. Dojde ke zvětšení objemu páry v horní části KO a tím se zvýší tlak v I.O. V opačném případě, kdy tlak v I.O. vystoupí nad povolenou hranici, spouští se sprchový systém uvnitř KO. Zmenší se tak objem páry v KO a tím i tlak v I.O. V případě, že by zásah sprchového systému nebyl dostatečný, dojde k otevření odlehčovacího ventilu, popř. i pojistných ventilů, přes které pára proudí do barbotážní nádrže, kde kondenzuje. Jestliže stav vyžaduje delší otevření ventilů, zkondenzovaná voda z barbotážní nádrže je odváděna do záchytných bazénů v hermetických prostorách [36].

Hlavní cirkulační čerpadlo

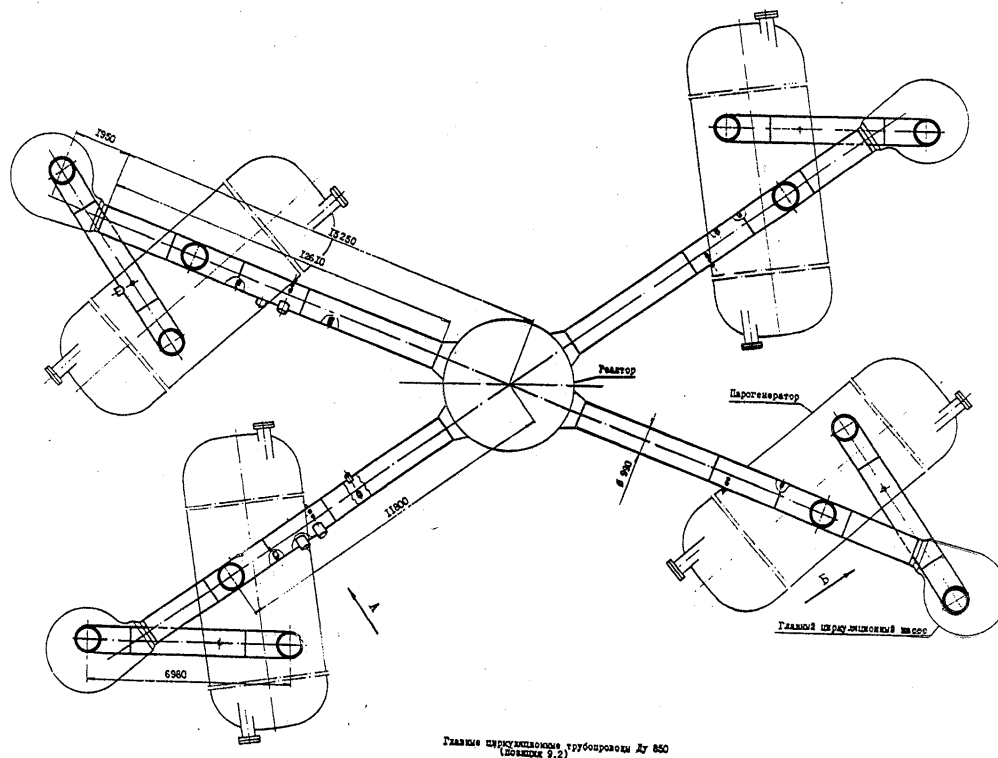
Hlavní cirkulační čerpadla (HCČ) patří mezi nejdůležitější zařízení z hlediska bezpečnosti, protože zajišťují cirkulaci chladiva v primárním okruhu JE. Zároveň se jedná o technologicky nejnáročnější čerpadla [43] v JE. Podmínky, za kterých jsou HCČ provozována, odpovídají parametrům primárního okruhu JE, tj. hodnoty tlaku jsou přibližně 16 MPa a teploty chladiva 300°C.

Z konstrukčního hlediska je HCČ radiální odstředivé ucpávkové čerpadlo poháněné asynchronním motorem. HCČ jsou umístěna v každé smyčce primárního okruhu, vždy na studené potrubní větvi.

V JE Temelín jsou instalována HCČ typu GCN 195 M [44] s nominálním průtokem při jmenovitých parametrech primárního okruhu 21 200 m³/hod [41].

4.3 Hlavní cirkulační potrubí

V jaderné elektrárně jsou řádově tisíce kilometrů potrubí. Z ekonomického hlediska se jedná o zhruba 10 % nákladů z celé elektrárny [43]. Reaktor VVER 1000 je vybaven čtyřmi hlavními cirkulačními smyčkami. Horké i studené potrubní větve vstupují do tlakové nádoby ve čtyřech místech, viz obrázek 5 [46].

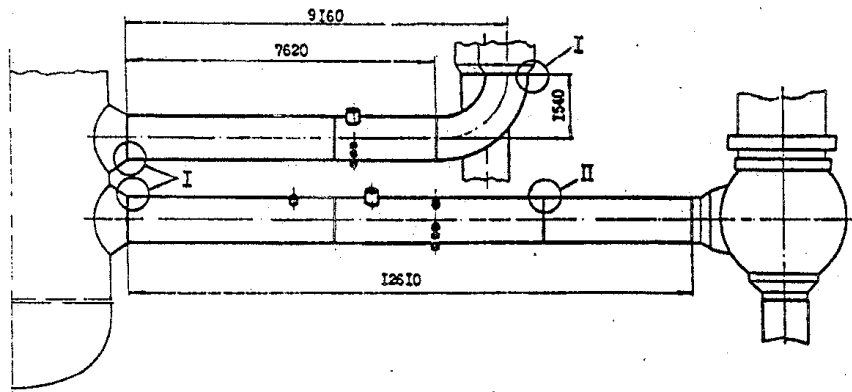


Obrázek 5: Schéma hlavních cirkulačních smyček primárního okruhu [46]

Hlavní cirkulační potrubí o vnitřním průměru 850 mm je vyrobeno z nízkoalokované uhlíkové oceli s nerezovým návarem o tloušťce 5 – 7 mm.

Systém hlavních cirkulačních smyček (HCS) je zobrazen na obrázku 5 převzatém z podkladů ÚJV Řež, a.s., kde však nelze vidět detailněji dolní (studené) a horní (horké) smyčky. Na obrázku 6 jsou znázorněny obě větve HCS včetně geometrických parametrů – horní větev HCS vedoucí do parogenerátoru, dolní větve HCS vedoucí do hlavního cirkulačního čerpadla [46].

Snaha o maximální zkrácení HCP má za příčinu zejména [43] snížení spotřeby nerezové oceli, snížení tepelných a tlakových ztrát v chladivu během průtoku HCP i zmenšení celkových rozměrů systému. Parametry systému chlazení reaktoru jsou shrnuty v tabulce 9 [41].



Obrázek 6: Schéma studené a horké potrubní větve HCS [46]

Tabulka 9: Parametry systému chlazení reaktoru [41]

Počet chladících smyček	4
Vnitřní průměr HCP	850 mm
Vnější průměr HCP	995 mm
Objem chladiva v primárním okruhu	337 m ³
Pracovní tlak	15,7 MPa
Teplota chladiva na vstupu / výstupu	290 °C / 320 °C
Tlak v reaktoru	15,7 MPa
Průtok chladiva reaktorem	84800 m ³

Svary primárního okruhu

Spojování potrubních dílů se provádí svařováním. Jedná se o jeden z klíčových technologických procesů, který je zásadní při výstavbě i provozu JE. Technologie svařování podléhá pravidlům, která stanovuje SÚJB a která jednoznačně stanovují postup a proces schvalování svarových spojů dle evropských norem WPS a WPAR [47]. Technologie svařování zařízení, armatur a potrubí je založena na svařování elektrickým obloukem v argonové atmosféře [43]. Technologický postup pro jednotlivé svary je navrhován podle základního materiálu svařovaných částí a podle účelu svaru [47]. Během provozu JE se typy spojů komponent mohou lišit, jestliže se jedná o fázi opravy nebo výměny komponent. Pro svařování v rámci oprav jsou stanoveny speciální postupy svařování pro specifické komponenty. Příkladem speciálního postupu je např. zaslepování netěsných teplosměnných trubek výměníků I.O. [47, 48].

5 Zatížení potrubí primárního okruhu

Potrubí je primárně transportní systém, který se liší podle transportovaného média a způsobu, jakým médium vzniká. Při hodnocení potrubního systému je třeba zahrnout parametry jako tlak, teplota, množství média přepravené za jednotku času atd. V případě primárního okruhu jaderné elektrárny se jedná o vysokoenergetické potrubí, u kterého je třeba uvažovat i extrémní podmínky vyvolané radiací.

Hodnocení seismické odolnosti potrubí a potrubních systémů primárního okruhu je jedním ze základních požadavků státního dozoru na bezpečnost jaderných zařízení [49]. Seismickou odolnost systémů I.O. včetně potrubí lze ve fázi návrhu zvýšit například jiným prostorovým uspořádáním nebo přidáním podpor a rozepřením do stavby [31].

Při zvyšování seismické odolnosti potrubí primárního okruhu je třeba dbát na fakt, že potrubí v I.O. JE jsou během provozu vystavena vysokým teplotám, a proto dochází k významným dilatacím. Dilatace potrubí brání využití klasických prvků pro zvýšení seismické odolnosti, tj. např. zarážky, třmeny, vedení, dorazy, osově tlumiče). Analýzy a studie ukazují, že vhodným řešením jsou viskózní tlumiče, které teplotním dilatacím potrubí vadí minimálně [50].

V případě zemětřesení je nutné zabránit nežádoucím technologickým interakcím, např. nárazům do jiných komponent zařízení. Proto jsou potrubní větve primárního okruhu opatřeny *omezovači švihnutí* nebo porušení zařízení v důsledku nedostatečné poddajnosti přípojných potrubí. Dalším důsledkem porušení potrubí může být zatopení prostorů jaderné elektrárny a umístěných zařízení, pro které je zatopení nepřipustné (např. čerpadla, armatury s elektropohonem) [31].

V případě porušení potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny dochází i k porušení jedné z bariér systému ochrany proti úniku radioaktivních látek z paliva do okolí a k úniku radioaktivního záření. Porušení potrubí primárního okruhu jaderné elektrárny se nazývá havárie se ztrátou chladiva (Loss of Coolant Accident - LOCA).

Vlivy, kterým HCP podléhá v provozu, jsou podle [51] následující:

- vnitřní přetlak,
- vysoká teplota,
- vlastní tíha,
- vibrace způsobené pulzacemi protékajících médií,
- náhodná zatížení (zemětřesení, výbuchy, střely, apod.)

5.1 Předpisy pro návrh a provedení potrubí I.O. JE Temelín

Potrubí primárního okruhu musí odolat všem zatížením vyjmenovaným v předchozím odstavci. Dle SÚJB [52] platí pro JE Temelín následující normy a předpisy:

- Normy pro pevnostní výpočet zařízení a potrubí jaderně energetických zařízení, Moskva, Energoatomizdat 1989, PNAE G-7-002-86,
- Obecná pravidla zajišťování bezpečnosti jaderných elektráren (OPB - 88), PNAE G -1-01-88, Gosatomenergonadzor, 1989,
- Všeobecně technické požadavky OTT 87, Armatury pro zařízení a potrubí jaderných elektráren,
- Předpisy pro výstavbu a bezpečný provoz zařízení a potrubí jaderně energetických zařízení, PNAE G-7-008-89, Eneroatomizdat, Moskva 1990,
- Normy projektování seismicky odolných jaderných zařízení PNAE G-5- 006-87,
- Předpisy pro kontrolu svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů PK 1514-72 Gosatomenergonadzor , Moskva 1974,
- Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů a konstrukcí JE, zkušebních a výzkumných reaktorů a zařízení OP 1513 - 72, Gosatomenergonadzor, Moskva 1974.

Obecné požadavky týkající se I.O. jsou uvedeny ve vyhlášce SÚJB č. 195/1999 Sb., zejména v § 22 „Zásady řešení primárního okruhu“ [49]. Dalšími existujícími předpisy pro české jaderné elektrárny je Normativně technická dokumentace (NTD)

Asociace strojních inženýrů (A.S.I.) ČR. Normativně technická dokumentace A.S.I. tvoří soubor pravidel rozdělených do šesti základních oddílů - Sekcí NTD [53]:

- Sekce I Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER,
- Sekce II Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER,
- Sekce III Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER,
- Sekce IV Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER,
- Sekce V Zkoušky materiálů,
- Sekce VI Vzduchotechnické systémy jaderných elektráren a jaderných zařízení,
- Zvláštní případy zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER - Sekce I až VI.

V roce 2013 vydal SÚJB dokument Stanovisko úřadu k použitelnosti NTD A.S.I. [54], v němž SÚJB doporučuje použití sekcí I až VI NTD A.S.I. pro vybraná zařízení jaderných elektráren typu VVER,.

Ve světě existuje řada předpisů a standardů pro zajištění bezpečnosti jaderných elektráren. Předpisy a normy jsou uspořádány hierarchicky do pěti následujících úrovní [55]:

- 1. úroveň: národní legislativa, požadavky musí být splněny, jsou právně závazné, nejsou dovoleny žádné odchylky,
- 2. úroveň: požadavky IAEA obsažené v Safety Fundamentals a Safety Requirements, požadavky WENRA (Reactor Safety Reference Levels) a ISO (Quality Assurance, Environmental Requirements), požadavky jsou závazné, odchylky jsou povolovány podle jednotlivých případů,
- 3. úroveň: bezpečnostní předpisy státu, který technologii dodává, nebo státu EU, požadavky IAEA uvedené v dokumentech Safety Guides a ISO Safety Guides, požadavky jsou závazné, odchylky jsou povolovány podle jednotlivých případů,

- 4. úroveň: předpisy platné pro jaderná zařízení v zemi dodavatele a předpisy platné pro jaderná zařízení požadované vlastníkem JE, požadavky jsou závazné, opodstatněné odchylky lze povolit ve fázi vývoje projektu,
- 5. úroveň: konvenční normy a předpisy navržené dodavatelem a požadované vlastníkem, požadavky jsou nezbytné, odchylky jsou povolovány na základě odůvodnění.

V následujícím přehledu jsou stručně uvedeny některé z norem platných pro potrubí jaderných elektráren, které z hlediska výše uvedené hierarchie předpisů a norem patří do 4. úrovně:

- ASME B&PV code, část III (NB, NC, ND) [5, 56, 57],
- německá norma KTA, např. [58],
- ruský PNAE standard [59],
- francouzská norma AFCEN-RCCM-M [60],
- japonský JSME&JEAG [61],
- kanadský CSA/CAN [62],
- švédský SKIFS/SSMFS [63],
- evropská směrnice pro tlaková zařízení (European Pressure Equipment Directive) [64], nová směrnice z roku 2014 bude platná od července 2016.

5.2 Seismické buzení

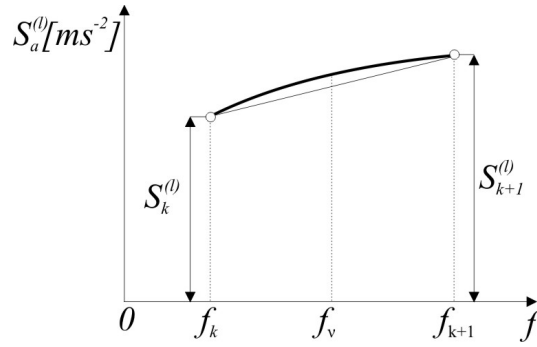
Seismické buzení je kinematické buzení, které je pro vyšetřování odezvy systému zadáno naměřenými hodnotami spekter odezev zrychlení [46]

1. v horizontálním směru, tj. ve směru os x a z ,
2. ve vertikálním směru, tj. ve směru osy y .

Spektra odezvy zrychlení v horizontálním směru jsou ve směrech x a z zadána stejná [46]. Uvedená data platí pro uložení tlakové nádoby na krakorcích.

Spektra odezvy výchylky $S_d^{(l)}(f_\nu, D_\nu)$ pro ν -tou frekvenci f_ν a ν -tý poměrný útlum D_ν vyjádříme pomocí spektra odezvy zrychlení $S_a^{(l)}(f_\nu, D_\nu)$ následovně

$$S_d^{(l)}(f_\nu, D_\nu) = \frac{1}{(2\pi f_\nu)^2} S_a^{(l)}(f_\nu, D_\nu). \quad (5.1)$$



Obrázek 7: Lineární aproximace tabelárně daných spekter odezvy zrychlení

Máme-li dány hodnoty spekter odezvy zrychlení tabelárně a označíme-li je $S_k^{(l)}$, pak spektra odezvy výchylky vyjádříme na základě lineární aproximace (viz obrázek 7) ve tvaru

$$S_d^{(l)}(f_\nu, D_\nu) = \frac{1}{4\pi^2 f_\nu^2} \left[S_k^{(l)} + \left(S_{k+1}^{(l)} - S_k^{(l)} \right) \frac{f_\nu - f_k}{f_{k+1} - f_k} \right], \quad (5.2)$$

kde pro index $l = x, y, z$, resp. $l = 1, 2, 3$, f_ν jsou vlastní frekvence [Hz] uvnitř intervalu $f_\nu \in \{f_k, f_{k+1}\}$ a D_ν jsou poměrné útlumy. Přičemž pro $k = 1, 2, \dots$ platí

- $S_k^{(1)} = S_k^{(3)}$... horizontální spektra odezvy zrychlení [ms^{-2}],
- $S_k^{(2)}$... vertikální spektra odezvy zrychlení [ms^{-2}].

5.3 Spektra odezvy pro potrubní systémy

Pohybové rovnice diskrétní lineární soustavy zapisujeme v maticovém tvaru [46], [65]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}(t). \quad (5.3)$$

Dosadíme-li v matematickém modelu (5.3) na pravou stranu rovnice seismické buzení, dostaneme matematický model chování reaktoru ve tvaru

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = -\mathbf{m}_1\ddot{u}_x(t) - \mathbf{m}_2\ddot{u}_y(t) - \mathbf{m}_3\ddot{u}_z(t), \quad (5.4)$$

kde \mathbf{m}_k značí k -tý sloupec matice hmotnosti \mathbf{M} a $\ddot{u}_x(t)$, $\ddot{u}_y(t)$, $\ddot{u}_z(t)$ jsou tzv. *akcelerogramy* (zrychlení seismických posuvů stavební šachty od roviny uložení tlakové nádoby).

Zavedením modální transformace

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{V}\mathbf{x}(t), \quad (5.5)$$

kde \mathbf{q} je vektor zobecněných souřadnic, \mathbf{V} je modální matice tvořená vlastními vektory soustavy a $\mathbf{x}(t) = [x_\nu(t)]$, $\nu = 1, 2, \dots, n$, jsou tzv. modální souřadnice, a vynásobením zleva transponovanou modální maticí \mathbf{V}^T převedeme rovnici (5.4) na tvar

$$\mathbf{V}^T\mathbf{M}\mathbf{V}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{V}^T\mathbf{B}\mathbf{V}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{V}^T\mathbf{K}\mathbf{V}\mathbf{x} = -\mathbf{V}^T \sum_{l=1}^3 \mathbf{m}_l \ddot{u}_l(t). \quad (5.6)$$

Index l vyjadřuje směry $l = x, y, z$, resp. jim odpovídající pořadí $l = 1, 2, 3$.

Z podmínek ortonormality ve tvaru

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^T\mathbf{M}\mathbf{V} &= \mathbf{E}, \\ \mathbf{V}^T\mathbf{K}\mathbf{V} &= \mathbf{\Lambda}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

kde \mathbf{E} je jednotková matice řádu n a $\mathbf{\Lambda}$ je spektrální matice, a ze vztahu definujícího pro soustavu s proporcionálním tlumením matici tlumení transformovanou modální maticí \mathbf{V} ve tvaru

$$\mathbf{V}^T\mathbf{B}\mathbf{V} = \mathbf{D} = \text{diag}(2D_\nu\Omega_\nu), \quad (5.8)$$

vyplývají pro matice \mathbf{M} , \mathbf{B} , \mathbf{K} následující vztahy

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^T\mathbf{M}\mathbf{V} &= \mathbf{E}, \\ \mathbf{V}^T\mathbf{B}\mathbf{V} &= \mathbf{D}, \\ \mathbf{V}^T\mathbf{K}\mathbf{V} &= \mathbf{\Lambda}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

kde \mathbf{E} je jednotková matice dimenze n (konkrétně pro dekomponovaný reaktor $n = 137$), $\mathbf{D} = \text{diag}[2D_\nu\Omega_\nu]$ je matice tlumení transformovaná modální maticí \mathbf{V} a $\mathbf{\Lambda} =$

$diag[\Omega_\nu^2]$ je spektrální matice. Přepisem dostaneme soustavu rovnic

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{\Lambda}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{V}^T \sum_{l=1}^3 \mathbf{m}_l \ddot{u}_l(t). \quad (5.10)$$

Rovnice (5.10) představuje soustavu n vzájemně nevázaných diferenciálních rovnic

$$\ddot{x}_\nu(t) + 2D_\nu \Omega_\nu \dot{x}_\nu(t) + \Omega_\nu^2 x_\nu(t) = -\mathbf{v}_\nu^T \sum_{l=1}^3 \mathbf{m}_l \ddot{u}_l(t). \quad (5.11)$$

Pro hledání řešení uvedené rovnice použijeme metodu Laplaceovy transformace, jenž je obecně pro funkci $f(t)$ definována vztahem

$$\bar{f}(p) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^\infty e^{-pt} f(t) dt, \quad (5.12)$$

kde p je komplexní proměnná, $\bar{f}(p)$ Laplaceův obraz funkce $f(t)$ a funkce e^{-pt} se nazývá *jádro transformace*.

Při transformování každého členu musíme přihlídnout k počátečním podmínkám. Obvykle je uvažujeme nulové, tj.

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(0) &= \mathbf{q}_0 = \mathbf{0}, \\ \dot{\mathbf{q}}(0) &= \dot{\mathbf{q}}_0 = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Laplaceovy obrazy výchylkek označme

$$X_\nu(p) = \mathcal{L}\{x_\nu(t)\}. \quad (5.14)$$

Dále označme pravou stranu rovnice (5.11) a její Laplaceův obraz následovně

$$\begin{aligned} f_\nu^{(l)}(t) &= -\mathbf{v}_\nu^T \mathbf{m}_l \ddot{u}_l(t), \\ F_\nu^{(l)}(p) &= \mathcal{L}\{f_\nu^{(l)}(t)\}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Po provedení Laplaceovy transformace bude mít pohybová rovnice vzhledem k nulovým počátečním podmínkám tvar

$$p^2 X_\nu(p) + 2D_\nu \Omega_\nu p X_\nu(p) + \Omega_\nu^2 X_\nu(p) = \sum_{l=1}^3 F_\nu^{(l)}(p), \quad (5.16)$$

kde $X_\nu(p)$ a $F_\nu^{(l)}(p)$ jsou Laplaceovy obrazy modální souřadnice $x_\nu(t)$ a transformované budící síly $f_\nu^{(l)}(t)$.

Zavedme Laplaceův obraz $G_\nu(p)$ tzv. *impulzní (váhové) funkce* $g_\nu(t)$

$$G_\nu(p) = \frac{1}{p^2 + 2D_\nu\Omega_\nu p + \Omega_\nu^2}. \quad (5.17)$$

Zpětnou Laplaceovou transformací dostaneme vztah pro impulzní funkci ve tvaru (pro $D_\nu^2 < 1$)

$$g_\nu(t) = \frac{1}{\Omega_\nu\sqrt{1-D_\nu^2}} e^{D_\nu\Omega_\nu t} \sin\Omega_\nu\sqrt{1-D_\nu^2} t. \quad (5.18)$$

Z rovnic (5.16) a (5.17) vyplývá vztah

$$X_\nu(p) = G_\nu(p) \cdot F_\nu(p). \quad (5.19)$$

Zpětnou Laplaceovou transformací získáme řešení pohybové rovnice systému (5.11) pro seismické buzení v jednom směru l ve tvaru konvolučního integrálu

$$x_\nu^{(l)}(t) = \int_0^t f_\nu^{(l)}(\tau) g_\nu(t-\tau) d\tau. \quad (5.20)$$

Opětným použitím modální transformace (5.5), tentokrát ve tvaru

$$\mathbf{q}(t) = \sum_{\nu=1}^n \mathbf{v}_\nu x_\nu(t) \quad (5.21)$$

a pro seismické buzení současně ve třech směrech

$$x_\nu(t) = \sum_{l=1}^3 x_\nu^{(l)}(t) = - \sum_{l=1}^3 \mathbf{v}_\nu^T \mathbf{m}_l \int_0^t \ddot{\mathbf{u}}_l(\tau) g_\nu(t-\tau) d\tau \quad (5.22)$$

dostaneme hledané řešení v prostoru zobecněných souřadnic $\mathbf{q}(t)$, tj. odezvu systému na seismické buzení ve tvaru

$$\mathbf{q}(t) = - \sum_{\nu=1}^n \mathbf{v}_\nu \sum_{l=1}^3 \mathbf{v}_\nu^T \mathbf{m}_l \int_0^t \ddot{\mathbf{u}}_l(\tau) g_\nu(t-\tau) d\tau. \quad (5.23)$$

Při buzení ve směru $l = x, y, z$ bude pro výchylku i -té zobecněné souřadnice $q_i^{(l)}(t)$

platit vztah

$$q_i^{(l)}(t) = - \underbrace{\sum_{\nu=1}^n v_{i,\nu} \mathbf{v}_\nu^T \mathbf{m}_l \int_0^t \ddot{\mathbf{u}}_l(\tau) g_\nu(t-\tau) d\tau}_{-q_{i,\nu}(t) \dots \text{mód výchylky } q_i^{(l)}}. \quad (5.24)$$

Spektrum odezvy výchylky (Spectral response displacement) vyjadřuje závislost mezi maximem výchylky q soustavy s jedním stupněm volnosti a vlastní frekvencí f_ν pro konkrétní poměrný útlum D_ν při buzení v daném směru l

$$S_d^{(l)}(f_\nu, D_\nu) = \max_t \left| \int_0^t \ddot{\mathbf{u}}_l(\tau) g_\nu(t-\tau) d\tau \right|. \quad (5.25)$$

Maxima absolutních hodnot módů výchylek (maxima módů) v případě buzení ve směru l jsou podle (5.24) a (5.25)

$$\hat{q}_{i,\nu}^{(l)}(t) = \max_t |q_{i,\nu}^{(l)}(t)| = |v_{i,\nu} \mathbf{v}_\nu^T \mathbf{m}_l| S_d^{(l)}(f_\nu, D_\nu), \quad (5.26)$$

$i, \nu = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, 3.$

Vhodnou kombinací maxim příspěvků jednotlivých tvarů kmitu dostaneme horní efektivní odhad maximální odezvy systému.

5.4 Dopady seismického buzení na potrubní systémy

Všechna zařízení a systémy jaderné elektrárny jsou obecně rozdělována do tzv. kategorií seismické odolnosti. Dělení je založeno na důležitosti zařízení a systémů z hlediska bezpečnosti během a po zemětřesení. Podle předpisu IAEA NS-G-1.6 (2003) [34] jsou zařízení dělena do čtyř skupin:

- 1. kategorie seismické odolnosti – zahrnuje všechny budovy a systémy důležité pro bezpečnost, které by měly být projektovány tak, aby zachovaly svou funkčnost i při zemětřesení SL2 (je dáno bezpečnostními požadavky a představuje maximální hodnotu pro projektové účely, roční pravděpodobnost výskytu je obvykle 10^{-4}),
- 2. kategorie seismické odolnosti – konstrukce, zařízení a systémy, které mohou

být vystaveny technologickým interakcím v důsledku selhání, pádu, požáru nebo zatopení při zemětřesení SL2 (stejná hodnota, ale s menším požadavkem na bezpečnostní rezervu)

- 3. kategorie seismické odolnosti – součásti a systémy, které mohou představovat radiační ohrožení, nikoli však související přímo s reaktorem (opět při úrovni zemětřesení SL2, ovšem bezpečnostní rezerva je stanovena s přihlédnutím k radiačním následkům)
- 4. kategorie seismické odolnosti - součástí a systémy projektované v souladu s předpisy pro nejaderná zařízení.

Kategorizace seismické odolnosti zařízení JE Temelín je podle dodatku úvodního projektu č. 406 konstruována tak, aby byla zajištěna jaderná bezpečnost při seismické události až do úrovně MVZ. Pro všechna zařízení JE Temelín, všechny konstrukce a technologická zařízení je zavedena pouze 1. kategorie seismické odolnosti. 2. kategorie seismické odolnosti není pro JE Temelín definována [66].

Podle [31, 66] 1. kategorie seismické odolnosti obsahuje:

- stavební konstrukce a technologická zařízení, která jsou součástí bezpečnostních systémů a vybraných systémů souvisejících s jadernou bezpečností a která jsou nutná pro plnění všeobecných bezpečnostních kritérií při zemětřesení až do úrovně MVZ a také při nárazu letadla nebo vnější tlakové vlny na reaktorovnu hlavního výrobního bloku, popř. na objekt dieselgenerátorové stanice,
- konstrukce a zařízení, jejichž porušení či selhání při zemětřesení až do úrovně MVZ včetně, resp. při nárazu letadla či vnější tlakové vlny na reaktorovnu hlavního výrobního bloku, příp. na objekt dieselgenerátorové stanice, by mohlo sekundárně ohrozit jiné konstrukce a zařízení v jejich okolí, které jsou důležité pro jadernou bezpečnost při zemětřesení, resp. při pádu letadla či nárazu vnější tlakové vlny.

Odstavení JE Temelín v případě zemětřesení nastane, jestliže dojde k překročení PZ, tj. v případě, že seismický monitorovací systém (SMS) vyhodnotí, že úroveň zemětřesení překročila PZ. V případě, že zemětřesení nezpůsobí změnu technologických parametrů bloku a nevyvolá činnost ochran, provede se rychlá inspekce zařízení důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti na obou blocích ještě před odstavením s cílem rozhodnout, zda:

- bloky lze odstavit jen do horké rezervy,

– je nutno je odstavit rovnou až do studeného stavu.

Podle výsledku inspekce přistoupí obsluha k odstavení reaktorů [66]. Po odstavení reaktorů do horkého nebo studeného stavu následuje podrobná inspekce zařízení obou bloků k určení jejich skutečného stavu.

6 Havárie se ztrátou chladiva

LOCA

Havárie se ztrátou chladiva v jaderné elektrárně s tlakovodním reaktorem představuje jednu z nejzávažnějších havárií. Obecně jsou rozlišovány havárie s poruchou chlazení podle podstaty poruchy:

- přerušení nebo omezení průtoku chladiva aktivní zónou, její částí nebo palivovým článkem (tzv. LOFA - Loss of Flow Accident),
- odvod nižšího výkonu než se uvolňuje v palivu, dochází k nárůstu teploty a hrozí přehřátí a degradace paliva v důsledku ztrát chladiva (tzv. LOCA - Loss of Coolant Accident).

Příkladem havárie se ztrátou chladiva (LOCA) byla havárie jaderné elektrárny Three Mile Island v roce 1979, která byla později označena podle stupnice INES jako havárie stupně 5 [67]. Stupeň 5 INES označuje události s významným poškozením technologie jaderné elektrárny a s omezeným vlivem na okolí elektrárny ve formě úniku radioaktivních látek.

Obecně může dojít k trhlině kdekoli v I.O. Rozsah LOCA havárie lze definovat podle *velikosti trhliny* v potrubní větvi HCS:

- velká LOCA (LB LOCA): více než 150 mm,
- střední LOCA (medium LOCA): 50 mm až 150 mm,
- malá LOCA (small LOCA): 15 mm až 50 mm.

V dalším textu bude pozornost věnována výhradně případu LB LOCA.

6.1 Havárie se ztrátou chladiva typu velká LOCA

Havárie typu velká LOCA (Large LOCA - LLOCA, Large Break LOCA - LB LOCA) je definována okamžitým úplným prasknutím potrubí primárního okruhu,

tzv. gillotinovým prasknutím (double ended guillotine break - DEGB). LB LOCA je maximální projektovou havárií, která je jednou z nejzávažnějších poruch primárního okruhu jaderné elektrárny. Pravděpodobnost jejího výskytu je obvykle pohybuje v rozmezí $10^{-4} - 10^{-5}$ za rok [68].

Pro zjednodušení modelování a analýz průběhu LB LOCA se průběh havárie rozděluje na čtyři fáze [68]:

1. Dekomprese a vyprazdňování I.O. (tzv. *blowdown*).
2. Opětné zaplavení spodního prostoru reaktorové nádoby (tzv. *refill*).
3. Znovuzaplavení aktivní zóny (tzv. *reflood*).
4. Dlouhodobé dochlazování aktivní zóny.

Uvedené rozdělení na čtyři fáze je možné pouze pro situace, kdy jsou úspěšně aktivovány systémy havarijního dochlazování SAOZ. V opačném případě vede havárie k tavení aktivní zóny reaktoru a těžké havárii.

6.2 Průběh havárie LB LOCA

Při havárii typu LOCA dochází v důsledku prasknutí potrubí k porušení hermetičnosti I.O. Předpokladem je prasknutí hlavní potrubní větve v režimu 100% výkonu. Odtlakování primárního okruhu probíhá za současné velké ztráty chladiva z obou konců potrubní větve. Chladivo se s klesajícím tlakem mění v páru a dochází k obnažení aktivní zóny a k nárůstu teploty paliva. Reaktor je odstaven, štěpná řetězová reakce přerušena a nastupují systémy havarijního vstřikování chladiva. Stále roste teplota paliva.

Dále je doplňováno chladivo z hydroakumulátoru a z vysoko a nízkotlakého systému havarijního chlazení AZ. Ve chvíli, kdy je vyčerpána kapacita hydroakumulátoru, opět klesá hladina chladiva v reaktoru. Opět je obnaženo palivo a jeho teplota roste. Objem chladiva ale narůstá vlivem vysoko a nízkotlakého havarijního vstřikování. Po zaplavení AZ bude postupně teplota paliva klesat v závislosti na parametrech chlazení [68].

V popsané situaci je stále zajištěna ochrana dvěma bariérami ze čtyř - strukturou paliva a kontejnmentem. Šíření radioaktivních látek do okolí JE závisí na netěsnostech kontejnmentu. LB LOCA představuje poruchu s největším únikem radioaktivních látek a porušením dvou ochranných bariér.

6.3 Analýzy havárií typu LB LOCA pro JE

Temelín

Havárie typu LB LOCA je nehoda kategorie IV ANSI, tzv. limitující nehoda [68]. Výskyt události je dle vyhlášky SÚJB 195/1999 Sb. [49] obsažen v Havarijních podmínkách. Pro reaktor typu VVER 1000/320 je LB LOCA definována jako gilotinové roztržení studené smyčky HCP obsahující KO, v blízkosti reaktorové nádoby [69].

LB LOCA je problematika zpracovaná řadou analýz, simulací a výpočtů. Kritéria přijatelnosti, která jsou popsána v dokumentu *10CFR50.46*, byla stanovena z hlediska zajištění významné rezervy pro SAOZ po havárii LB LOCA a jsou obsažena také v PpBZ [68]:

1. Maximální vypočítaná hodnota povlaku palivového článku nesmí překročit teplotu 1204°C .
2. Lokální oxidace povlaku nesmí překročit limit 17% z celkové tloušťky povlaku před oxidací.
3. Množství povlaku palivových proutků, které chemicky zreaguje s vodou nebo s párou, nesmí překročit 1% z celkového povlaku obklopujícího palivo.
4. AZ musí zůstat chladitelná v průběhu prasknutí i po něm.
5. Teplota AZ se sníží a zbytkové teplo je odváděno po dostatečně dlouhou dobu, což se požaduje z hlediska dlouhodobé radioaktivity, která zůstává v palivu.

Výpočty provedené pro JE Temelín předpokládaly gilotinové roztržení studené větve 4. smyčky. Provoz reaktoru před prasknutím byl se všemi 4 smyčkami. Výtokový koeficient trhliny byl v intervalu od 0,8 do 1,2, s předpokladem neurčitostí $\pm 20\%$. Použita byla metodika nejlepšího odhadu (*best estimate*). Výsledkem výpočtů [68] bylo potvrzení:

- vypočtená maxima teplot povlaku 961°C , resp. 1082°C nepřekročila limitní hodnotu 1204°C ,
- maximální lokální oxidace povlaku dosáhla hodnoty menší než 2%,
- celková reakce kov-voda v AZ je menší než 0,2%, tedy méně než kritérium *10CFR50.46* [12] 1%.

Závěrem tedy lze říci, že podle výsledků analýz provedených pro JE Temelín, nedojde k tavení palivových proutků [68].

7 Redefinice havárie se ztrátou chladiva

Havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA reprezentovaná gilotinovým prasknutím potrubí (double ended guillotine break - DEGB) hlavní cirkulační smyčky primárního okruhu jaderné elektrárny o průměru $d = 850 \text{ mm}$ je nepravděpodobná [2].

Americké US NRC se zaměřilo na snižování přísných požadavků na SAOZ. Pomocí metody expertního posouzení bylo US NRC určeno, že tzv. *velikost přechodu k roztržení* (VPR) je pro reaktory typu PWR (VVER) v rozsahu 305 – 356 mm pro potrubí připojené k hlavnímu cirkulačnímu potrubí. Pro reaktory typu BWR je to 500 mm. Postupy a výsledky byly vydány ve zprávě NUREG - 1829 [2], ve které se vyskytla otázka, do jaké míry je uvedená velikost přechodu k roztržení ovlivněna výskytem seismické události.

Základní myšlenkou redefinice velké LOCA je nutnost zajištění dostatečného chlazení v případě roztržení největšího potrubí primárního okruhu gilotinovým prasknutím (DEGB). Množství chladiva je třeba zajistit vhodným dimenzováním systémů havarijního chlazení aktivní zóny. Přestože typ havárie velká LOCA s DEGB je na základě současných poznatků z provozování tlakovodních reaktorů událost s velmi nízkou pravděpodobností výskytu, US NRC předložila koncept velikosti přechodu k roztržení [70]: *Navržené pravidlo by mělo rozdělit současné spektrum velikostí LOCA do dvou oblastí. Hranice mezi nimi je pojmenována „velikost přechodu k roztržení“. Prvá oblast zahrnuje roztržení větší než VPR až do DEGB chladicího potrubí s největším průměrem. Termín „roztržení“ v konceptu VPR neznamena DEGB, ale spíše ekvivalentní plochu otevření trhliny v tlakových hranicích systému chlazení reaktoru.*

Pro tlakovodní reaktor je VPR definována následovně: *Velikost přechodu k roztržení je plocha roztržení rovnající se výtokové ploše z vnitřního průměru specifického potrubí specifického reaktoru. Specifické potrubí reaktorů typu PWR je největší potrubí připojené k systému chlazení reaktoru.*

Velikost přechodu k roztržení byla stanovena pomocí metody *expert elicitation*

[70], která bude popsána v odstavci 7.2. Vyvozeným závěrem bylo rozmezí velikosti VPR pro reaktory typu PWR, a to 305-355 mm. V rámci žádosti o licenci JE musí žadatel prokázat, že SAOZ je schopen zajistit patřičné množství chladiva za konzervativních předpokladů a v rozmezí mezi VPR a DEGB musí SAOZ zajistit dostatečné množství vody na základě nejrealističtějších předpokladů. Proto je potřeba se zabývat otázkou, zda a jak významnou měrou může seismická událost ovlivnit pravděpodobnost roztržení potrubí primárního okruhu nad VPR.

7.1 Koncept použitý pro redefinici

První dokument, který oficiálně doporučil věnovat větší pozornost využití PRA (Probabilistic Reliability Analysis, pravděpodobnostní analýza spolehlivosti), resp. PSA (Probabilistic Safety Assessment), jako doplňku deterministických přístupů včetně využití přístupu *ochrany do hloubky* (defense in depth), byl *Policy Statement on the Use of Probabilistic Risk Assessment (PRA)* [71] vydaný v roce 1995 US NRC. Aplikace PRA musí vždy odpovídat aktuální úrovni poznání a existujících dat.

Dalším navazujícím dokumentem byl *White Paper on Risk-Informed and Performance Based Regulation*, v němž NRC prezentuje pojem *přístup založený na riziku* (rozhodování). Jedná se o strategii, která zavádí hledisko rizika společně s ostatními faktory při formulaci požadavků tak, aby takto pojaté licencování včetně projektu JE a jejího provozu bylo úměrné jejich významu z hlediska ochrany zdraví a bezpečnosti veřejnosti [72].

Oba uvedené dokumenty byly založeny na vyšší úrovni znalostí a chápání, která vycházela ze zkušeností US NRC za dlouhé období provozování velkého počtu reaktorů, poznatků výzkumu týkajících se paliva a nadprojektových havárií a rostoucích možností využití výpočetní techniky.

V současné době jsou na základě dokumentu *10CFR 50.46 Appendix K*, části 50 *10CFR 50.46* definovány požadavky na instalaci systému havarijního chlazení zóny (Emergency Core Cooling System) a zároveň musí být postulována havárie se ztrátou chladiva v dostatečném rozsahu velikostí potrubí a míst postulace, použité modely provozně ověřené, zajištěno účinné chlazení aktivní zóny [70].

Požadavek LB LOCA není pokryt pouze dokumentem *10CFR 50.46* [12]. Navazuje na něj řada dalších předpisů, např. 50.36 [73] (Technické specifikace), 50.49 [74] (Kvalifikace elektrozařízení na vlivy okolí) a další, vzájemně provázané předpisy. Požadavky na parametry systému se pak stávají složitou optimalizační úlohou.

Poruchy, které typicky přispívají k pravděpodobnosti tavení aktivní zóny (core damage frequency - CDF), jsou následující [72]:

- ucpávka HCČ,
- činnosti operátorů,
- ztráta napájení,
- poruchy závěsů, podpěr apod.,

Dominantním přispěvatelem k riziku porušení kontejnmentu není LOCA, ale poškození aktivní zóny a následné uvolnění velkého množství energie. Dominantním přispěvatelem k riziku pozdního porušení kontejnmentu je nedostatečný odvod tepla uvolněného z aktivní zóny reaktoru, který může nastat při havárii se ztrátou chladiva.

7.2 Metoda expertního posouzení

Metoda expertního posouzení (*expert elicitation method*) je vícestupňová delfská metoda [18]. Pro stanovení seismického rizika jaderných elektráren na základě pravděpodobnostní metodiky byl vydán předpis NUREG/CR-6372 [75]. Záměrem dokumentu je popsat postup agregace názorů jednotlivých expertů a jejich názorů a přístup k ocenění a stanovení neurčitostí [17, 76].

Delfská metoda je metoda využívající názory jednotlivých expertů formou dotazníků. Experti pracují individuálně a jsou pravidelně informováni o výsledcích předchozích anket. Postup je následující [17]:

- písemně každý expert odpoví na otázky v dotazníku,
- odpovědi expertů se zpracují a experti dostanou hodnoty mediánu a intervalu mezi krajními kvantily, pak jsou experti požádáni o přezkoumání odpovědí a případné korekce.

Experti, jejichž ocenění leží mimo interval, vymezený krajními kvantily, musí zdůvodnit oprávněnost svých stanovisek. Odpovědi expertů jsou opět zpracovány a získané výsledky jsou opět předány účastníkům expertízy. Vedle toho experti dostávají stručný souhrn zdůvodnění, která byla uvedena na podporu stanovisek, jež se značně odlišovala od mínění většiny expertů. Metoda se obvykle realizuje ve 4 - 5 etapách.

Za jednotný názor expertní skupiny se považuje medián z konečných hodnot odpovědí.

Expertem je osoba s prvotřídními znalostmi v oblasti dat, modelů a zákonitostí ve specifickém oboru. Vlastností experta by měla být schopnost dekomponovat složité problémy, odhalovat a řešit výjimečné úlohy. Dále je třeba, aby se jednalo o osobu se silným smyslem pro zodpovědnost, nezaujatost a schopnost konsenzu. Výběr expertů pro konkrétní úlohu se rozděluje na hledání osob tří skupin - experti s všeobecným zaměřením (generalists), experti specialisté (specialists) a experti normativní (normative experts). Zatímco experti s všeobecným zaměřením mohou pro případ hodnocení jaderné elektrárny být např. geologové, hydrologové, experti specialisté jsou špičkoví odborníci se zaměřením na jednu oblast týkající se jaderné elektrárny. Experti normativní jsou obvykle odborníci v oblasti pravděpodobnosti, teorie rozhodování [76].

K metodě expertního posouzení je obvykle přistupováno specificky především z hlediska hodnocené lokality a typu hodnoceného zařízení. Podle [17] např. R.J. Budnitz ve své publikaci *Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Recommendations and Guidance* rozděluje experty na úzké specialisty a na syntetiky. Členové první skupiny mohou zastávat pouze roli poradce v oblastech, kterou znají. Členové druhé skupiny mohou provádět hodnocení typů „peer review“, účastnit se diskuse skupiny expertů o určitém problému a při dostatku zkušeností z oboru a z řízení (schopnost navrhnout několik variant řešení dané problematiky) diskuse i řídit. Přístup je zahrnut v normách USA pro jaderné elektrárny (NUREG/CR-6372) [75].

H. Kameda v publikaci *Study on Methodology of Seismic Hazard Evaluation in Japan* [77] popsal specifickou seismickou normu (SHEAT), která platí v Japonsku pro stanovení seismického rizika jaderných zařízení; konkrétní výpočty pro jaderné elektrárny dělá firma NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation). Velký důraz je kladen na názory expertů, kteří oceňují neurčitosti používaných vstupních dat [17].

7.3 Historie a vývoj potrubních norem ASME

V roce 1946 byla v USA ustanovena *Atomic Energy Commission* (AEC) na základě zákona Atomic Energy Act. V roce 1962 byl komisí v dokumentu *Reactor Site Criteria, 10 CFR 100* [78] zaveden pojem maximální věrohodná nehoda označovaná později jako *maximální projektová havárie* (Design Basis Accident - DBA). Jako iniciační událost je definováno tavení aktivní zóny v důsledku ztráty chladiva.

Později se uvedeným myšlenkovým postupem dospělo k pojmu *projektová havárie se ztrátou chladiva*, která je způsobena gilotinovým roztržením potrubí (Double Ended Guillotine Break - DEGB). Kontejnmenty začaly být konstruovány tak, aby dokázaly odolat tlakovým změnám uvnitř kontejnmentu v případě nehody. Byly vyvinuty nové požadavky na systémy havarijního chlazení aktivní zóny. Následovaly požadavky na další postulace roztržení potrubí, prostředky pro omezení efektů švihajícího potrubí a ochranu proti tryskajícímu proudu chladiva [79].

V průběhu výstavby jaderných reaktorů první generace bylo třeba vytvořit legislativní základ pro povolovací řízení jaderných elektráren. Obecné principy byly obsaženy v dokumentech Spojených států i bývalého Sovětského svazu. Zásadní rozdíl však vznikl v požadavku zachování integrity tzv. vysokoenergetických potrubí. O vysokoenergetických potrubích mluvíme v případě, kdy je splněna alespoň jedna z následujících podmínek: tlak média vyšší než 2 MPa (275 psi) nebo teplota vyšší než 100 °C [79].

V roce 1915 byla vydána první norma s požadavky na energetická zařízení, Standard Specification for Power Piping. O dvacet let později, v roce 1935 následovala další norma *American Tentative Standard for Pressure Piping*. Další normou byla v roce 1942 ASA B 31.1, *American Standard Code for Pressure Piping*, který byl později několikrát revidován [79].

Poprvé byla vydána revize v roce 1953, ASA B 31.1a, pro kterou je příznačné stanovení dovoleného napětí totožným způsobem jako v kódech pro výpočty kotlů [79].

Revize verze z roku 1953 vyšla v roce 1955 pod označením B 31.1 - 1955 a již obsahovala návrhové parametry pro tlaková potrubí [79]:

- minimální tloušťka stěny potrubí t_p ,
- dovolený pracovní tlak pro potrubí P_d ,
- pouze slovní vymezení externích zatížení $\leq S_h$ (dovolené namáhání při pracovní teplotě),
- formulace rovnice pro teplotní dilatace zahrnující součinitel intenzifikace napětí i (rovnice je označena (10) v ASME kódu).

Právě poslední bod byl významným zlomem pro další vývoj. V roce 1963 byl vydán předpis *Section III Nuclear Pressure Vessels* (Jaderné tlakové nádoby), který obsahoval přístup *design-by analysis*, ale nebyl v něm zahrnut standard B 31.1 - 1953.

V roce 1969 navázal předpis USAS B31.7 *Nuclear Power Plant Piping Class 1, 2 and 3* (Potrubí jaderných elektráren 1., 2. a 3. třídy), kde pro 1. třídu byl položen vztah (dle ASME ozn. (10)) [79]

$$C_1 \frac{P_d D_0}{2t_p} + C_2 \frac{D_0}{2I_S} M_i + \frac{1}{2(1 - \alpha_t)} E \alpha_t |\Delta T_{t1}| + C_3 E_{ab} |\alpha_{ta} T_{ta} - \alpha_{tb} T_{tb}| \leq 3S_m, \quad (7.1)$$

kde C_i , B_i jsou součinitelé napětí, P_d dovolený pracovní tlak pro potrubí, D_0 vnější průměr potrubí, t_n minimální tloušťka stěny potrubí, M_i jsou momenty zatížení, α teplotní součinitel délkové roztažnosti, I kvadratický moment průřezu, E modul pružnosti a T_t teplota.

V roce 1971 vyšel *ASME Code Section III. B 31.7*, ve kterém už byly zakotveny části [79]

- článek NB 3600 Piping Design for Class 1,
- článek NB 3600 Piping Design for Class 2/3,

ovšem bez zahrnutí seismické události pro 2. třídu potrubí. Seismická událost byla zahrnuta až v roce 1972 v dokumentu *Winter Addenda of Section III* [80] a zároveň byly formulovány pro potrubí 2. a 3. třídy rovnice pro trvalá zatížení (dle ASME ozn. (8))

$$0,5 \frac{P_d D_o}{2t_n} + 0,75i \frac{M_a + M_b}{W_o} \leq S_h \quad (7.2)$$

a pro jednorázová zatížení (dle ASME ozn. (9))

$$0,5 \frac{P_d D_o}{2t_n} + 0,75i \frac{M_a + M_b}{W_o} \leq 1,2S_h. \quad (7.3)$$

Kombinací rovnic (7.2) a (7.1) (dle ASME (8) a (10)) byla odvozena rovnice (7.4) (dle ASME ozn. (11))

$$0,5 \frac{P_d D_o}{2t_n} + 0,75i \frac{M_a}{W_o} + 0,75i \frac{M_c}{W_o} \leq S_h + S_A, \quad (7.4)$$

kde

$$S_A = f(1,25S_h + 0,25S_A), \quad (7.5)$$

kde f je součinitel respektující počet cyklů ($f = 1$, po dosažení 6000 cyklů se hodnota snižuje), S_h je dovolené namáhání při pracovní teplotě a S_A je dovolený rozsah teplotních napětí. Postupně byly zavedeny *provozní mezní hodnoty (Service Limits)* pro normální, abnormální, pohotovostní a poruchový stav [79]. V roce 1974 byly

provozní mezní hodnoty ve *Winter Addenda* [80] z roku 1972 změněny na *provozní mezní hodnoty A, B, C, D*.

V roce 1981 byly zavedeny *indexy primárního napětí* B_1 a B_2 . Zároveň byla zvýšena dovolená namáhání pro provozní mezní hodnoty A a B [79]

$$B_1 \frac{P_{max} D_o}{2t_n} + B_2 \frac{M_A}{W_o} \leq 1,5 S_h, \quad (7.6)$$

$$B_1 \frac{P_{max} D_o}{2t_n} + B_2 \frac{M_A + M_B}{W_o} \leq 1,8 S_h \quad \text{nebo} \quad 1,5 S_y, \quad (7.7)$$

$$i \frac{M_c}{W_o} \leq S_A. \quad (7.8)$$

Dovolená namáhání pro třídu C byla ve vztahu (7.7) zvýšena na

$$2,25 S_h \quad \text{nebo} \quad 1,8 S_h$$

a pro třídu D na

$$3,05 S_h \quad \text{nebo} \quad 2,0 S_y.$$

Účinek při jednorázovém neopakovaném pohybu jedné kotvy byl stanoven vztahem

$$i \frac{M_D}{W_o} \leq 3S_C.$$

Pro třídu 1 byla rovnice (7.1) upravena do tvaru

$$C_1 \frac{P_o D_o}{2t} + C_2 \frac{D_o}{2I_S} M_i + C_3 E_{ab} (\alpha_a T_a - \alpha_B T_B) \leq 3S_m. \quad (7.9)$$

V současné době je platná revize z roku 1992.

7.4 Pravděpodobnost LB LOCA vyvolané zemětřesením

Odhady četností US NRC pro výskyt havárie se ztrátou chladiva LB LOCA uvedené ve zprávě [2] nezahrnují vliv náhodných buzení. Proto byla vydána zpráva, NUREG-1903 [3], která se věnuje vlivu výskytu zemětřesení na četnost výskytu LB LOCA. Metoda bude podrobně uvedena v kapitole 9 Použité metody.

8 Vstupní data

Kapitola obsahuje přehled vstupních dat potřebných k provedeným výpočtům.

8.1 Vstupní data pro stanovení seismického ohrožení lokality JE Temelín

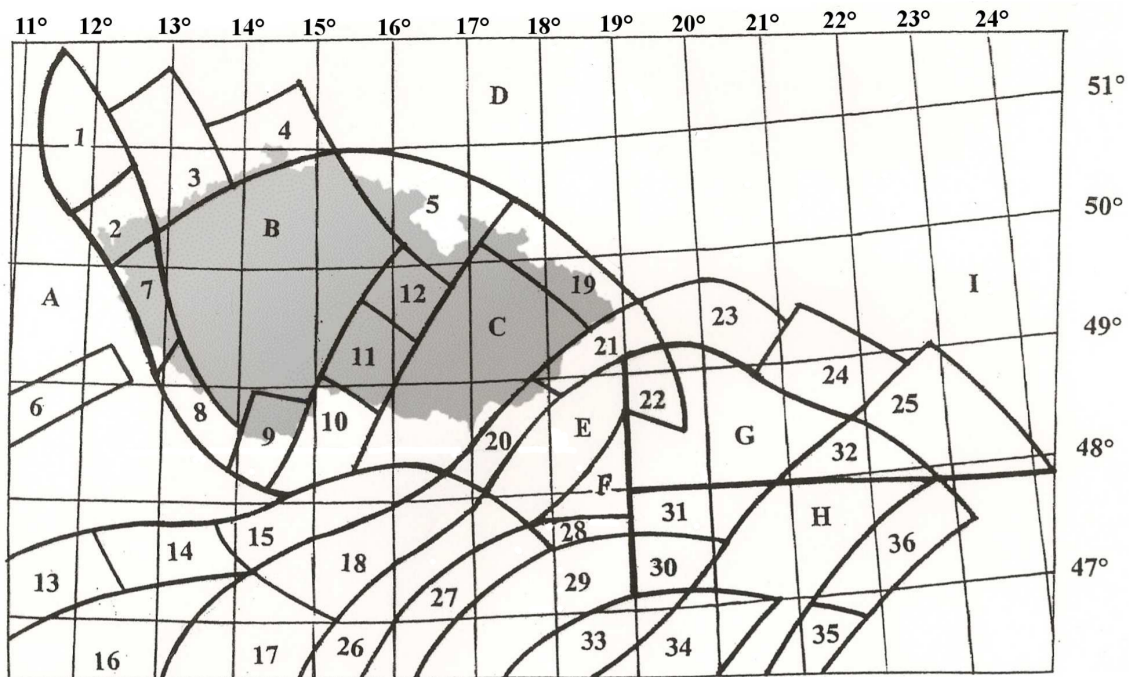
Základním stavebním kamenem pro stanovení seismického ohrožení jsou vstupní data. Zároveň jsou ale zdrojem řady neurčitostí, které je třeba v postupu zahrnout. Proto je třeba vždy věnovat značné úsilí vytvoření reprezentativního souboru dat pro stanovení seismického ohrožení.

Pro konkrétní výpočet v předložené práci byl použit katalog zemětřesení [27], který byl vytvořen na základě dlouholetého sběru dat a následného ověření a jednotného zpracování údajů z různých zdrojů. Ukázka uspořádání seismického katalogu je uvedena v tabulce 10. Pro každé zemětřesení jsou uvedeny základní parametry - doba vzniku otřesu, zeměpisné souřadnice epicentra a hloubka ohniska a velikost otřesu vyjádřená epicentrální intenzitou, maximální pozorovanou makroseismickou intenzitou, magnitudem, seismickou energií a v posledních třiceti letech seismickým momentem a rozměrem ohniska [27]. Celý katalog zemětřesení vybraných pro hodnocení lokality JE Temelín je uveden v Příloze 1.

Tabulka 10: Ukázka uspořádání vstupních dat z katalogu zemětřesení

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice epicentra		Hloubka epicentra [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Pozn. ohnisková oblast
		°N	°E				
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Na základě shromážděných dat a údajů o stavbě a struktuře zemského tělesa, fyzikálních a tektonofyzikálních vlastnostech svrchních částí zemského tělesa v oblasti mezi Rýnem a Uralem, od střední Itálie po Baltské moře bylo možné vytvořit mapu ohniskových oblastí pro střední Evropu, obrázek 8 [27].



Obrázek 8: Ohniskové oblasti střední Evropy, území ČR [27]

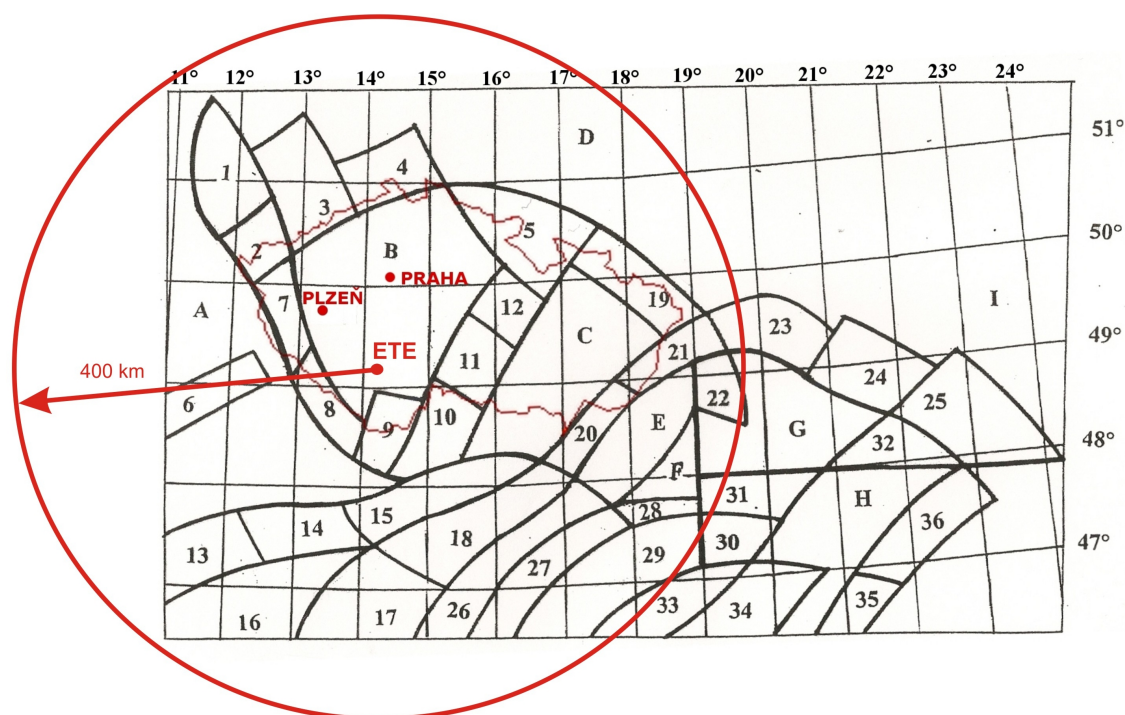
Značení ohniskových oblastí na obrázku 8 je následující (ohniskové oblasti s difúzní seismicitou jsou označeny velkými písmeny):

A – Západní okraj Českého Masívu, B – Střední část Českého Masívu, C – Moravská a Vídeňská pánev, D – Horní a dolní Slezsko, E – Střední Slovensko, F – Nové Zámky – Levice – Banská Štiavnica, G – Revúca – Rožňava – Miskolc, H – Debrecen – Szeged – Csongrád, I – Ruská tabule, J – SZ Rumunsko.

Ohniskové oblasti, v nichž jsou zemětřesení spojena s výskytem zlomů, jsou následující: 1 – Thüringer – Wald Gera, 2 – Kraslice – Aš – Plauen, 3 – Komořany – Leipzig, 4 – Zittau – Bautzen (Horní Lausiciz), 5 – Trutnov – Klodsko – Strzelin – Šumperk, 6 – Regensburg – Augsburg, 7 – Domažlice – Tachov, 8 – Šumava – Grafenau – Thalberg, 9 – Kaplice – Freistadt, 10 – Waidhofen – Jindřichův Hradec, 11 – Jihlava a okolí, 12 – Vysoké Mýto – Litomyšl – Svitavy, 13 – Innsbruck a okolí, 14 – Salzburg – St. Martin, 15 – Linz – Pregarten – Molln – Neulengbach, 17 – Friuli, 18 – Východní Alpy, 19 – Český Těšín – Opava, 20 – Malé a Biele Karpaty, 21 – Trenčín – Žilina, 22 – Martin – Prievidza – Banská Bystrica – Dolný Kubín, 23 –

Kežmarok – Zakopané – Krakow, 24 – Prešov – Košice – Humenné, 25 – Užgorod – Mukačevo – Beregovo, 26 – Graz – Maribor – Oberschützen – Sopron – Kapuvár, 27 – Körmand – Győr, 28 – okolí Komárna, 29 – Nagykanisza – Mór, 30 – Budapest – Monór – Jászbereny, 31 – Mátra a okolí, 32 – Zemplín – Tokaj, 33 – Kaposvár – Dunaföldvár, 34 – Kecskmet – Szolnok, 35 – Békés – Gyula, 36 – Oradea – Satu Mare.

Na základě metodiky popsané v pracích [17, 19], která respektuje požadavky IAEA, je v praxi pro stanovení seismického ohrožení konkrétní lokality třeba zahrnout ohniskové oblasti až do vzdáleností 200 – 400 *km* od sledované lokality. Pro zvolenou lokalitu JE Temelín je třeba volit oblast o poloměru 400 *km*, vzhledem k nízké hodnotě útlumu intenzity zemětřesení se vzdáleností, která je typická pro Český Masív [81]. Zvolená oblast je znázorněna na obrázku 9 společně s obrysem území České republiky.

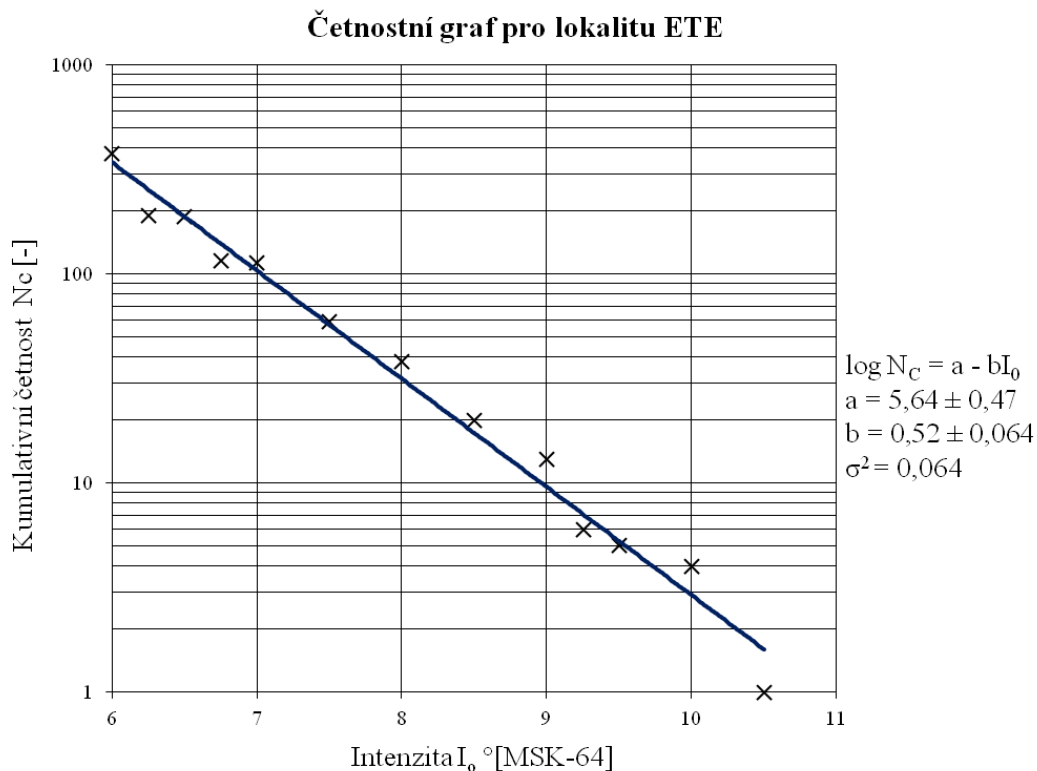


Obrázek 9: Vyznačené území o poloměru 400 *km* pro hodnocení seismického ohrožení JE Temelín

Na základě takto vybraného souboru dat pro zájmový region pro lokalitu JE Temelín byl sestaven četnostní graf, obrázek 10. Četnostní graf znázorňuje rozložení počtu zemětřesení v závislosti na intenzitě zemětřesení v epicentru. Na osu *x* četnostního grafu vynášíme intenzitu zemětřesení v epicentru I_o [°MSK – 64], na osu

y kumulativní četnost zemětřesení $N_c(I_o)$.

Kumulativní četnost zemětřesení vyjadřuje počet zemětřesení s intenzitou rovnou nebo větší hodnotě I_{oi} , přičemž součtová křivka začíná u velkých intenzit, a tím se liší od klasické četnosti používané ve statistice. Používá se logaritmická stupnice a součtová křivka se nahrazuje přímkou $\log N_c = a - bI_o$. Parametry a , b se stanovují metodou nejmenších čtverců, metodou Monte Carlo a dalšími simulačními metodami. Parametr b vyjadřuje sklon přímky a je základním parametrem, který charakterizuje fyzikální proces uvolňování seismické energie v čase probíhající v každé konkrétní ohniskové oblasti [82].



Obrázek 10: Četnostní graf pro zájmový region JE Temelín

Pro výpočty seismického ohrožení lokality jaderné elektrárny Temelín byla použita data z katalogu [27], který obsahuje celkem 985 záznamů zemětřesení, a to od roku 819 do 21.7.1998. Katalog představuje reprezentativní množinu dat, která je homogenní pro časový interval 800 let [17]. Pro hodnocenou lokalitu JE Temelín bylo v souladu s metodikou uvedenou v odstavci 9.1 vybráno z katalogu 392 záznamů o zemětřeseních v ohniskových oblastech náležících do oblasti o poloměru 400 km, viz obrázek 9. Vzhledem k rozsahu vybraných dat, která mají strukturu uvedenou v tabulce 10, jsou vybrané údaje uvedeny v Příloze 1.

Křivky ohrožení stanovené pro lokalitu JE Temelín jsou uvedeny v odstavci 9.1.2 včetně interpretace výsledků. V odstavci 9.1.4 jsou prezentovány vypočítané hodnoty seismického ohrožení pravděpodobnostně. Všechna data byla použita pro další výpočty uvedené v dizertační práci.

8.2 Pevnostní údaje

Hodnota pro dovolené namáhání potrubí primárního okruhu byla zvolena dle české normy pro jaderné elektrárny *NTD A.S.I. SEKCE III., Pevnostní výpočty komponent a potrubních systémů, Sekce 2, Materiály* [83] pro materiál 10MFAGN2, $\min(R_p/1, 5; R_m/2, 6)$. Zvolená hodnota dovoleného namáhání je při dané teplotě

$$S_m = 188,8 \text{ MPa}. \quad (8.1)$$

8.3 Hodnoty napětí v I.O.

Pro potřeby výpočtu dle US NRC [3] je třeba znát napětí v primárním okruhu způsobená normálními provozními podmínkami (NPP), seismicitou o intenzitě MVZ a současným působením NPP+MVZ. Z dat vypočítaných v Ústavu aplikované mechaniky (ÚAM) Brno, s.r.o., byly stanoveny hodnoty napětí uvedené v tabulce 11. Výpočty ÚAM prezentované ve zprávách [84, 85] platí pro teploty v ochranné obálce reaktoru v rozmezí $50^\circ - 60^\circ\text{C}$, což jsou běžné podmínky v HVB při provozu.

Jedná se o maximální hodnoty napětí pro studenou větev HCP, které byly vypočteny ve čtyřech řezech studené potrubní větve. Přejaté údaje tvoří data potřebná ke krokům výpočtu uvedenému v odstavci 9.2, konkrétně dle postupu Box 1 – Box 3.

Tabulka 11: Napětí ve studené větvi HCP I.O. JE Temelín

Maximální napětí při NPP $\sigma_{NPP}[\text{MPa}]$	Maximální napětí při MVZ $\sigma_{MVZ}[\text{MPa}]$	Kombinace napětí $\sigma_{NPP} + \sigma_{MVZ}$ [MPa]
71,90	83,99	155,88

8.4 Váhový součinitel SF

Hodnoty jednotlivých faktorů prezentovaných v odstavci 9.2.2 použité pro výpočet součinitele bezpečnosti jsou uvedené v tabulce 12. Jedná se o mediánové hodnoty parametrů uvedených v dokumentu [3] pro případ jaderné elektrárny typu PWR umístěné na skalním podloží. Jaderná elektrárna Temelín je umístěna také na skalním podloží.

Tabulka 12: Volba parametrů pro stanovení váhového součinitele SF

Název faktoru	Označení faktoru	Mediánová hodnota parametru
Faktor spektrálního tvaru	F_{SS}	1,60
Faktor historie pohybu podloží	F_{gmth}	1,0
Faktor interakce podloží-struktura	F_{SSI}	1,0
Faktor inkoherence	F_{incoh}	1,0
Faktor tlumení	F_d	1,29
Faktor konzervatismu modelování	F_m	1,0
Faktor modálních kombinací	F_{mc}	1,0
Faktor směrových kombinací	F_{ec}	1,0
Faktor nelinearit	F_{nl}	1,0
Výsledná hodnota součinitele bezpečnosti	F_{rs}	2,06

Výslednou hodnotu součinitele bezpečnosti lze interpretovat a využít dvěma způsoby [3]:

- pro analýzy porušitelnosti budovy reaktoru a jejích součástí je maximální výpočtové zrychlení opraveno váhovým koeficientem 2,06, Důvodem je zajištění konzervatismu ve výpočtech seismické odezvy systému,
- pro přímé hodnocení selhání potrubí primárního okruhu vyvolaného napětím je součinitel bezpečnosti využit pro výpočet váhového součinitele SF , který je převrácenou hodnotou součinitele bezpečnosti, tj.

$$SF = \frac{1}{F_{rs}}, \quad (8.2)$$

$$SF = \frac{1}{2,06}, \quad (8.3)$$

$$SF = 0,48. \quad (8.4)$$

9 Použité metody

9.1 Metody stanovení seismického ohrožení lokality pro jaderná zařízení

Výběr vhodné lokality pro umístění technologických zařízení, jako jsou jaderné elektrárny a další významné objekty, je jedním ze základních kroků zajištění bezpečnosti jaderných zařízení. V úvahu je třeba brát celou řadu faktorů charakterizujících lokalitu, především stabilitu podloží, geografické umístění lokality, osídlení, hospodářství a životní prostředí, blízké průmyslové, vojenské a dopravní objekty, meteorologické a hydrologické poměry, podzemní vody, geologii a seismickou situaci lokality, a také stav přírodního životního prostředí.

Stavební předpisy v České republice a ve většině zemí stanovují pro hodnocení seismického ohrožení deterministický přístup, jehož výsledky jsou velmi konzervativní [17]. Uvedení konzervativních výsledků a jejich realizace v praxi je v souvislosti s konstrukcí technologických celků velmi finančně a technicky náročné. Proto v řadě zemí je snaha zavést do norem metody založené na pravděpodobnostním přístupu, např. v USA (NUREG/CR-6372) pro inspekce seismické odolnosti JE. Výsledky lze při použití pravděpodobnostního přístupu ovlivnit výběrem variant a výběrem metody agregace [17]. Proto jsou právě zásady pro výběr variant a metoda agregace dat, které je třeba právně formalizovat, tj. přesně a logicky i systémově formulovat.

Stanovení seismického ohrožení konkrétní lokality lze provést na základě několika metod. V inženýrské praxi jsou používány dva přístupy pro odhady seismického ohrožení, deterministický a pravděpodobnostní.

Deterministický přístup je označován jako *deterministic seismic hazard assessment* (DSHA), podle něhož se stanovuje seismické ohrožení nejprve zvážením neurčitostí množiny vstupních parametrů a následně volbou nejméně příznivé hodnoty parametru pro konkrétní případ. Deterministický přístup lze realizovat dvěma postupy, a to na základě nejméně příznivých odhadů buď pomocí dat o zemětřeseních nebo o geologických strukturách v tektonofyzikálním poli [17].

Druhý přístup je pravděpodobnostní, tzv. *probabilistic seismic hazard assessment* (PSHA), je založený na statistickém odhadu a používá pravděpodobnosti výskytu zemětřesení. Pravděpodobnostní přístup je založen na předpokladu, že výskyt každého jevu má určitou nejistotu, tj. četnost výskytu náhodného jevu je odhadnuta určitou hodnotou pravděpodobnosti [19].

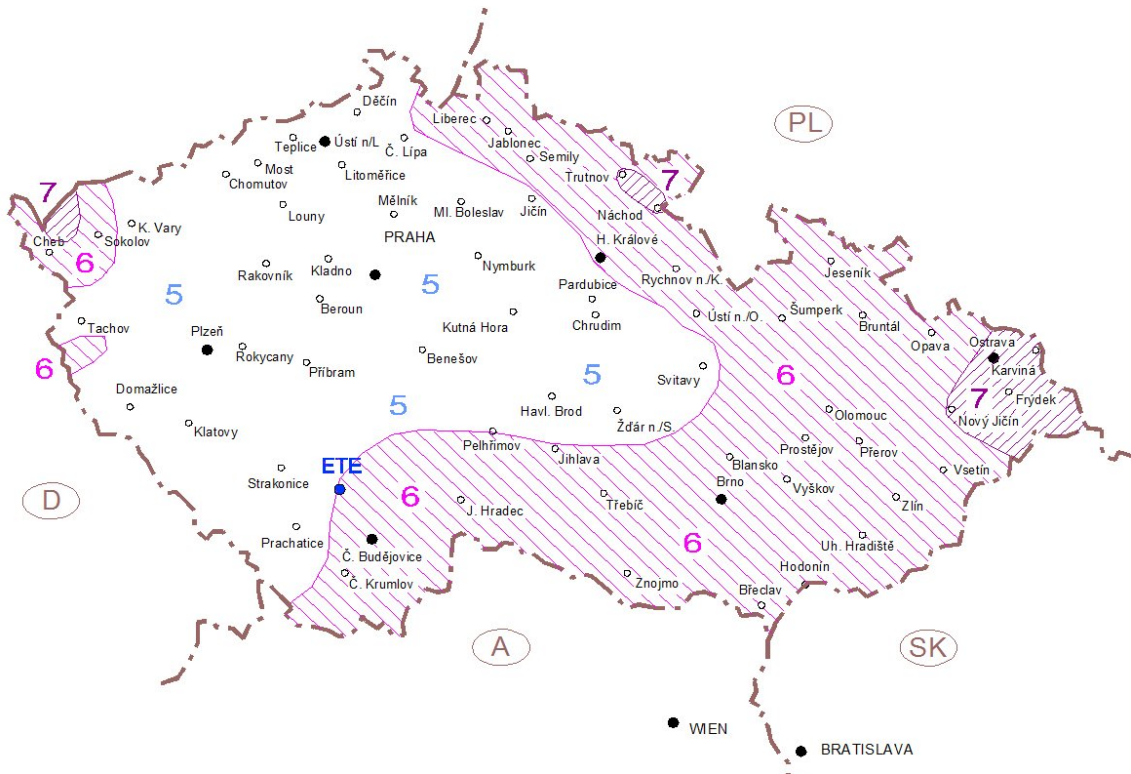
Při projektování se používá první přístup, deterministický, který je konzervativní a někdy náročný na realizaci. Druhý přístup lépe odpovídá realitě. Odlišnost mezi oběma přístupy spočívá v přístupu k určení vstupních dat pro projektování. Pro deterministický přístup dosazujeme nejméně příznivé hodnoty jednotlivých parametrů, ale pro pravděpodobnostní přístup jsou to hodnoty získané ze zpracování možných variant, a to způsobem medián nebo medián + σ .

V následujících odstavcích budou uvedeny dvě deterministické metody odhadu seismického ohrožení pro lokalitu JE Temelín, a to odhad na základě mapy maximálních pozorovaných intenzit a odhad na základě metody extrémních hodnot. Dále bude budou demonstrovány hodnoty získané pravděpodobnostním přístupem.

9.1.1 Mapa maximálních pozorovaných intenzit

Jednou z nejjednodušších metod odhadu seismického ohrožení pro konkrétní lokalitu je *mapa maximálních pozorovaných intenzit*, viz obrázek 11 [17], která je zároveň jedním ze základních zdrojů seismologických dat. Mapa respektuje celkové dopady od všech zemětřesení, jejichž dopady jsou na území České republiky doloženy a v případě nedostatku dat u historických zemětřesení jsou nahrazeny realistickými simulacemi [19]. Jedná se o zemětřesení, jejichž ohniska leží na území České republiky, i silná zemětřesení s ohnisky např. v Alpách, Západních Karpatech, atd.

Přestože lze uvedeným odhadem poměrně jednoduše stanovit úroveň seismického ohrožení lokality, je třeba brát v úvahu, že postup nemusí být dostatečně konzervativní, protože nerespektuje specifické vlastnosti lokality a specifické příspěvky od velkých zemětřesení, pro která chyběla data, při konstrukci mapy. Lze jej proto použít pro civilní objekty a pro technologické celky, které nemusí splňovat zvláštní požadavky z pohledu bezpečnosti, a proto ho také doporučuje příslušná norma ČSN. Například pro všechny veřejné budovy ČSN stanovuje požadavek seismické odolnosti pro seismické ohrožení 6° MSK-64. Jinak je tomu u objektů, na které jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska bezpečnosti, např. jaderné elektrárny.



Obrázek 11: Mapa maximálních pozorovaných intenzit zemětřesení pro území ČR [17]

9.1.2 Metoda extrémních hodnot

Výpočet pravděpodobnosti vzniku zemětřesení o intenzitě I_0 , která není menší než intenzita I_{0i} v čase t_0 , podle metody založené na teorii extrémních hodnot je v [17] popsán rovnicí

$$R_t(I_0 \geq I_{0i}) = 1 - \left[\frac{T}{T + t \cdot P(I_0 \geq I_{0i})} \right]^{n+1}, \quad (9.1)$$

kde T je doba pozorování zemětřesení, n je počet pozorovaných zemětřesení, t představuje zvolený časový interval a funkce P je dána rovnicí

$$P(I_0 \geq I_{0i}) = \frac{e^{-\beta I_{0i}} - e^{-\beta I_{0max}}}{e^{-\beta I_{0min}} - e^{-\beta I_{0max}}}. \quad (9.2)$$

V obou uvedených rovnicích představuje I_{0min} minimální hodnotu intenzity zemětřesení (pro kterou je katalog kompletní, tj. hodnota vyjadřuje *hranici homogenity* množiny dat). Analogicky I_{0max} označuje maximální pozorovanou intenzitu v zájmovém regionu pro hodnocení vybrané lokality. Pro hodnoty intenzit platí vzájemný vztah

$$I_{0min} \leq I_{0i} \leq I_{0max}. \quad (9.3)$$

Parametr $\beta = b \ln 10$ stanovíme použitím koeficientu b z četnostního vztahu, viz odstavec 8.1

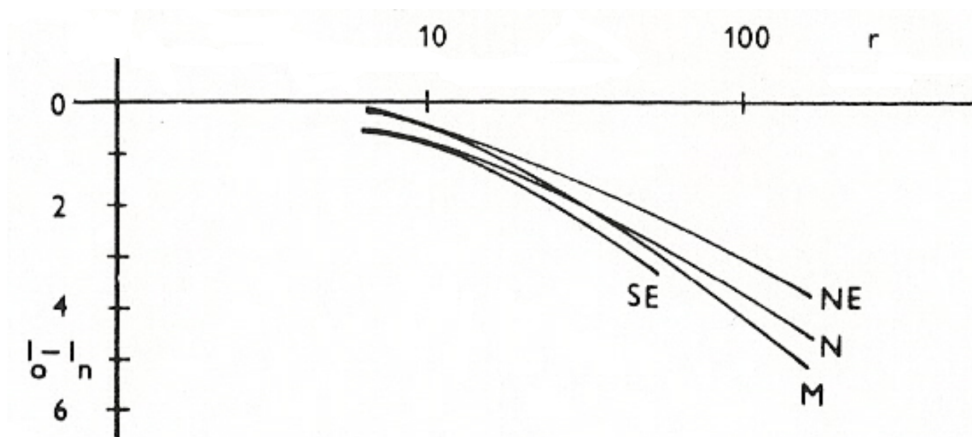
$$\log N_c = a - b I_{0i}, \quad (9.4)$$

kde N_c je *kumulativní četnost*. Funkce $R_t(I_0 \geq I_{0i})$ pak vyjadřuje pravděpodobnost, že intenzita zemětřesení I_0 nepřekročí hodnotu intenzity I_{0i} během časového intervalu t , a $P(I_0 \geq I_{0i})$ je pravděpodobnost, že intenzita zemětřesení I_0 překročí hodnotu I_{0i} během časového intervalu t . Pravděpodobnost $R_t(I_0 \geq I_{0i})$ někdy označujeme jako *pravděpodobnost nepřekročení* a $P(I_0 \geq I_{0i})$ jako *pravděpodobnost překročení*. Vykreslením závislostí $R_t(I_0 \geq I_{0i})$ a $P(I_0 \geq I_{0i})$ na intenzitě zemětřesení intenzity I získáme křivky seismického ohrožení.

9.1.3 Útlumový faktor

Každá z ohniskových oblastí obsažených ve vyznačeném kruhu o poloměru 400 km (viz mapa ohniskových oblastí, obrázek 9) má charakteristické parametry. Útlumový faktor popisuje šíření seismických vln z ohniskové oblasti do okolí a útlum vln s rostoucí vzdáleností.

Velký vliv na hodnotu ohrožení má azimut křivek útlumu. Český masiv je charakteristický velmi nízkým útlumovým faktorem seismických vln v porovnání s okolními ohniskovými oblastmi [81]. Na obrázku 12 je zobrazen příklad rozdílného průběhu křivek popisujících šíření seismických vln v různých směrech pro ohniskovou oblast Kraslice [81]. V grafu I_0 označuje intenzitu zemětřesení v epicentru, I_n [°MSK-64] je intenzita zemětřesení ve vzdálenosti r [km] od epicentra. Značení směrů: N - sever, NE - severovýchod, SE - jihovýchod, M - střední hodnota.



Obrázek 12: Příklad útlumové křivky pro ohniskovou oblast Kraslice [81]

Útlumový faktor byl v práci [81] stanoven pro každou ohniskovou oblast zobrazenou na obrázku 9).

Jestliže známe maximální očekávanou intenzitu zemětřesení v jednotlivých ohniskových oblastech a známe-li také útlumový faktor ve směru *ohnisková oblast* \rightarrow lokalita JE Temelín, můžeme odečtením hodnoty útlumu od maximální očekávané intenzity zemětřesení v konkrétní ohniskové oblasti stanovit intenzitu zemětřesení v zájmové lokalitě. Tabulka hodnot seismického ohrožení od jednotlivých ohniskových oblastí pro lokalitu JE Temelín je uvedena v Příloze 2.

9.1.4 Pravděpodobnostní přístup

Stanovení hodnoty seismického ohrožení na základě pravděpodobnostního přístupu je v praxi založeno na použití stejných metod a algoritmů jako pro deterministický přístup. Rozdíl tkví v tom, že v celém procesu nedosazujeme do algoritmu nejméně příznivé hodnoty jednotlivých parametrů, ale hodnoty odpovídající jednotlivým variantám procesu výskytu největších dopadů zemětřesení ve vybrané lokalitě. Výsledná hodnota je stanovena agregací hodnot získaných pro jednotlivé varianty, které musí být připraveny předepsaným způsobem [18, 82].

Podle analýzy pro konkrétní lokalitu je třeba stanovit varianty procesu dopadu zemětřesení ve vybrané lokalitě způsobem, že zvažíme neurčitosti v zadání hranic ohniskových oblastí, v seismickém režimu ohniskových oblastí (např. parametr b z četnostního vztahu výskytu zemětřesení, velikost maximálního možného zemětřesení, hranice homogenity dat) a také neurčitosti parametru útlumu intenzity zemětřesení se vzdáleností mezi ohniskovou oblastí a vybranou lokalitou. Agregace výsledků hodnocení jednotlivých variant zadaným způsobem znamená stanovení reprezentativní hodnoty seismického ohrožení z hodnot spočítaných pro jednotlivé varianty. V praxi se často k agregaci používají hodnoty medián, medián $+\sigma$ (σ je směrodatná odchylka) [18].

9.1.5 Doba návratu a roční pravděpodobnost překročení

K vyjádření četnosti výskytu opakovaných jevů se v praxi používají dvě metody, doba návratu a roční pravděpodobnost překročení [18].

Ohrožení je rovno hodnotě I_o , pro kterou platí, že $R_t(I_o \leq I_{oi}) = 0,05$ pro zvolený časový interval. Doba návratu (return period) τ pro událost o intenzitě I_o , někdy nazývaná střední perioda opakování nebo střední doba návratu, je rovna času t ,

pro který platí rovnost [18]

$$R_\tau = 0,633.$$

Při stanovení rizika je nutné znát ohrožení, které může způsobit extrémní událost, a zranitelnost systému, který je třeba sledovat. Pro určení ohrožení a doby návratu se využívají algoritmy teorie extrémních hodnot, experimentální pozorování a matematické modelování, expertní přístupy, založené na odhadech, analogiích a zkušenostech [18].

Výpočet vychází z rovnice popisující pravděpodobnost nepřekročení, viz 9.1

$$1 - \left[\frac{T}{T + t \cdot P(I_0 \geq I_{0i})} \right]^{n+1} = 0,633, \quad (9.5)$$

ze které lze vyjádřit dobu návratu v následujícím tvaru

$$\tau_i = \frac{1}{P(I_0 \geq I_{0i})} \cdot \left[\frac{T}{\sqrt[n+1]{0,377}} - T \right]. \quad (9.6)$$

Jestliže vyjádříme střední hodnotu doby návratu τ_i pro intenzitu zemětřesení I_{0i} , pak lze vyjádřit tzv. *kumulativní četnost* \bar{N}_{ci}

$$\bar{N}_{ci} = \frac{T}{\tau_i}. \quad (9.7)$$

V případě homogenní množiny dat lze vypočtenou hodnotu porovnat s pozorovanou kumulativní četností (viz četnostní graf 10 v odstavci 8.1).

9.1.6 Metoda PSA

Pravděpodobnostní hodnocení bezpečnosti (PSA – Probabilistic Safety Assessment), někdy též PRA (Probabilistic Risk Assessment) je stále častěji používanou součástí rozhodovacího procesu pro zajištění úrovně bezpečnosti jaderných elektráren. PSA je metoda analýzy bezpečnosti jaderné elektrárny, kterou zjišťujeme a propojujeme kombinace událostí, které mají za důsledek vážnou havárii. Zároveň metoda PSA určuje pravděpodobnost vzniku každé z kombinací a stanovuje její následky. Metody používané pro analýzy PSA se stále vyvíjejí a poznatky jsou využívány společně s konzervativními výsledky deterministických analýz k dosažení reálných výsledků pro zadávací dokumentace nových jaderných elektráren. Metoda PSA je definována jako postup, který stanovuje pořadí bezpečnostních rizik, tj. rizik, která narušují bezpečí a udržitelný rozvoj systému. Metoda PSA je významným

nástrojem využívaným při projektování a provozu jaderných elektráren. Postup metody spočívá v několika krocích. Prvním krokem je analýza systému zařízení a sběr relevantních dat o chování systému v provozu. V druhém kroku je třeba identifikovat iniciační události a stavy poškození zařízení. Následně je možné přikročit k modelování systémů a řetězců událostí pomocí metodiky založené na logickém stromu a hodnocení vztahů mezi událostmi a lidskými činnostmi. Závěrečným krokem metody PSA je vytvoření databáze dokumentující spolehlivost systémů a komponent [35].

Pro metodu PSA rozlišujeme tři úrovně. První úroveň metody PSA stanovuje sekvence událostí, identifikuje systémy jaderné elektrárny a vede k určení pravděpodobnosti tavení aktivní zóny. Druhá úroveň PSA zahrnuje tzv. analýzy kontejnmentu, při nichž se určuje pravděpodobnost uvolněného množství radioaktivních materiálů do okolí jaderné elektrárny. Třetí úroveň PSA se zabývá analýzou následků, a to okamžitých i pozdějších účinků radioaktivních materiálů na zdraví obyvatelstva. Smysl a cíle metody PSA obecně spočívají v použití teorie pravděpodobnosti a počítačového modelování pro získání odpovědí na otázky: co se může přihodit, jak je to pravděpodobné, jaké jsou hlavní příčiny, jaké jsou následky?

Specifikem metody PSA je výsledek v podobě pořadí rizik od existujících pohrom podle závažnosti. Výsledné pořadí poskytuje možnost zaměření se na nejvíce nebezpečné pohromy a případnou aplikaci cílených nápravných opatření, kterými dosáhneme zvýšení bezpečnosti. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) vydala metodiku pro jaderná zařízení, *IAEA-TECDOC-724* [86].

Historie využívání pravděpodobnostních metod

Využívání pravděpodobnostních metod pro hodnocení spolehlivosti a bezpečnosti není žádnou novinkou, přesto v posledních desetiletích zaznamenalo významný posun v aplikaci nejen pro jadernou energetiku, ale ve všech oborech. Na počátku 40. let minulého století byly formulovány bezpečnostní kvantitativně pravděpodobnostní požadavky pro letecký průmysl. Byla stanovena hodnota pravděpodobnosti letecké nehody, a to hodnota jedenkrát za 100 000 letových hodin. V roce 1942 byl během měření poruchovosti německých raket V-2 poprvé použit koncept závislostí mezi částmi systému potvrzující myšlenku, že systém je tak dobrý jako jeho nejslabší článek. V následujícím období byly vyvinuty statistické modely pro analýzu selhání komponent a spolehlivostní teorie [86].

Další významnou etapou rozvoje byla 60. léta, kdy v americkém US NASA (United States National Aeronautical and Space Agency) probíhal program Apollo. Poprvé byl použit důležitý nástroj „vliv druhu výpadku a analýza kritického stavu“.

V roce 1962 společnost Bell Telephone Laboratories použila metodu stromu poruch ve spolehlivostní studii pro US Air Force zaměřené na spolehlivost odpálení a řízení střel Minuteman [87]. V jaderném oboru použil pravděpodobnostní metodu poprvé F. R. Farmer v roce 1967 pro stanovení hranice oblasti výskytu jódu uvolněného při havárii [18].

Průkopnickou zprávou v aplikaci pravděpodobnostních metod na bezpečnost jaderného reaktoru byla zpráva WASH-1400 [88], tzv. *Reactor Safety Study* (Studie bezpečnosti reaktoru), známá jako Rasmussenova studie v roce 1975. Zpráva obsahovala analýzu dvou lehkovodních jaderných reaktorů (jeden tlakovodní jaderný reaktor, jeden varný jaderný reaktor) z hlediska pravděpodobností a následků možných havárií. Rasmussenova zpráva navazovala na předcházející, o osmnáct let starší, pokus o analýzu následků možných katastrofických havárií jaderných elektráren, zprávu WASH-740. Výsledky zprávy WASH-740 neměly praktický význam vzhledem k nedostatečným datům a velmi malé znalosti metod analýzy. Výsledky další zprávy WASH-1400 již měly praktický dopad v oblasti pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti jaderných elektráren. Významným přelomem byla změna pořadí mezi bezpečností a spolehlivostí založená na tvrzení, že bezpečný systém je spolehlivý systém, ale obráceně to neplatí, protože technická spolehlivost nezajistí, že lidé a jiná veřejná aktiva nebudou ohrožena. Od té doby se kladou na tři základní otázky pravděpodobnostního hodnocení bezpečnosti [18]

- co se může stát?
- jaká je četnost výskytu?
- jaké jsou důsledky?

Havárie jaderné elektrárny Three Mile Island (TMI) v roce 1979 zásadně zasáhla do dalšího vývoje použití pravděpodobnostních metod pro jaderné elektrárny. Posthavarijní skupiny, zejména tzv. Kemeny Commission (Kemeniova komise), ve svých závěrečných zprávách podtrhovaly potřebu většího důrazu na pravděpodobnostní metody. Zjištění, že zpráva WASH-1400 předvíдалa průběh událostí, který byl podobný průběhu při havárii v TMI, přispělo ke změně situace a podpořilo využívání pravděpodobnostních metod v jaderné energetice [18].

Metoda seismické PSA

Zemětřesení jsou častou příčinou nestandardních událostí v jaderných elektrárnách. Mohou způsobit narušení provozu jaderné elektrárny, vyvolat chybný zásah

operátorů a havarijních systémů, ale také mohou mít za následek poruchy redundance (zálohování systémů) a diverzity (rozmanitost systémů).

Cílem seismické PSA (SPSA) je v první řadě ocenění průběhu havárie (následky a role operátora), dále porozumění nejpravděpodobnějším sekvencím událostí, které byly způsobeny zemětřesením, výpočet celkové pravděpodobnosti poškození aktivní zóny způsobeného zemětřesením, identifikace rozmezí zrychlení, která významně přispívají k celkovému riziku, porovnání seismického rizika s riziky od ostatních událostí a stanovení priorit pro dodatečnou nápravu.

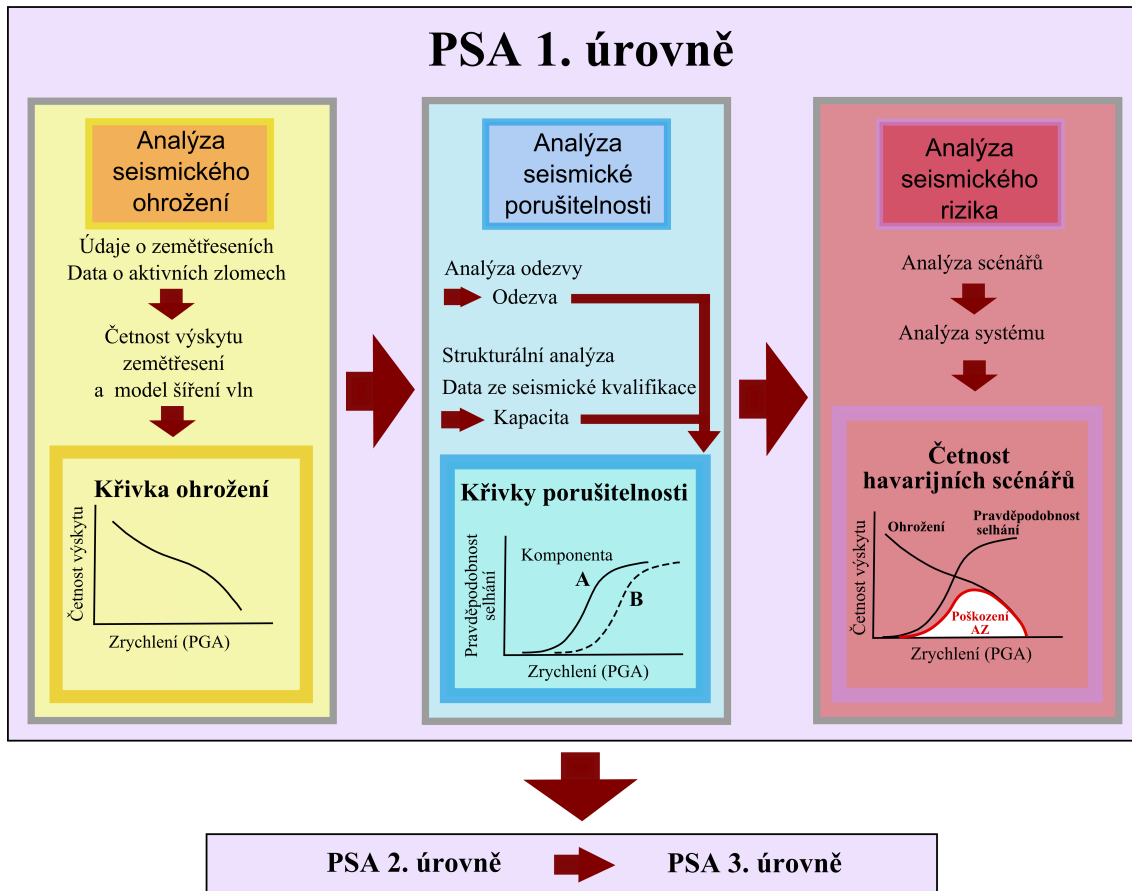
Seismické ohrožení pro účely PSA

Seismické zadání pro metodu PSA je založeno na pravděpodobnostních předpokladech. Dostupná data jsou deterministická, ale pravděpodobnostní analýza seismického ohrožení (PSHA – Probabilistic Seismic Hazard Analysis) zahrnuje i problém neurčitostí a nejistot. Cílem je vytvořit křivku ohrožení, která bude vyjadřovat, jak často je vybraná lokalita vystavena tzv. primárním účinkům, tj. vibračním pohybům podloží. Analýza je založena na historických a naměřených datech, geologii oblasti a fyzikálních důkazech o dřívější seismicitě.

Dokument *IAEA-TECDOC-724* [86] obsahuje pouze stručný popis metody s odkazem na další dokument, tzv. Safety Guide; původní dokument *50-SG-S1* (1978) [89] obsahoval podrobný popis, byl postupně aktualizován: *NS-G-3.3* (2002) [33] a dnes platí dokument *SSG-9 (Specific Safety Guide): Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations* [35]. Schéma postupu popsáno v [35] je zobrazeno na obrázku 13.

Významný posun v obsahu dokumentů uvedených výše je názorný např. v odlišné hodnotě poloměru kruhové oblasti se středem ve vybrané lokalitě. Zatímco v dokumentu *NS-G-3.3* [33] je minimální hodnota poloměru stanovena na 150 km, v dokumentu *SSG-9* je doporučenou hodnotou poloměru již 300 km. Další podstatné změny najdeme v požadavcích na vstupní data pro stanovení seismického ohrožení. V dokumentu *SSG-9* byly požadavky rozšířeny o další parametry jednotlivých zemětřesení.

Postup seismické PSA

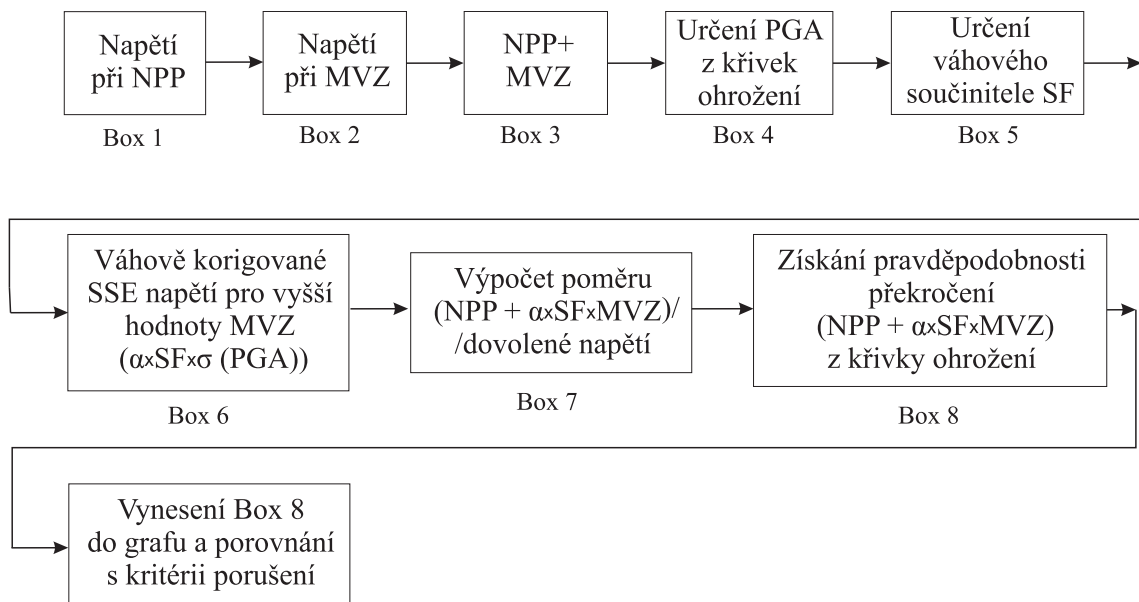


Obrázek 13: Schéma metody SPSA

9.2 Pravděpodobnost vzniku LB LOCA vyvolané zemětřesením

Schéma postupu dle dokumentu NUREG-1903 [3] je uvedeno na obrázku 14. Hodnoty napětí pro normální provozní podmínky (NPP, Box 1), napětí při maximálním výpočtovém zemětřesení (MVZ, Box 2) a kombinace v Boxu 3 jsou charakteristické pro konkrétní projekt a lze je najít v databázích projektu LBB dané elektrárny [72].

Vzhledem ke konzervativosti projektových analýz je účelné získat realistické odhady seismických napětí, tj. příspěvků od zemětřesení k celkové napjatosti. Proto byl pro výpočet napětí odpovídajících hodnotám maximálního výpočtového zemětřesení, které odpovídá ročním pravděpodobnostem nepřekročení 10^{-5} nebo 10^{-6} , definován tzv. *váhový součinitel* (Scale Factor, SF). Váhový součinitel upravuje projektová napětí při MVZ hodnotám „best estimate“ a zároveň extrapoluje hodnoty k vyšším MVZ. Bere se v úvahu realistický popis pohybu soustavy *podloží-stavba-potrubí* s rostoucí hodnotou zrychlení.



Obrázek 14: Kroky postupu hodnocení porušení potrubí

Postup, který se tabeluje, lze popsat v následujících bodech [3, 72]:

1. Výpočet, resp. převzetí hodnot napětí při NPP a MVZ (Box 1 – Box 3).

2. Z křivek seismického ohrožení odečítáme hodnoty zrychlení v násobcích g (Box 4).
3. Stanovíme hodnotu váhové součinitele SF (Box 5).
4. Stanovíme hodnoty součinitele $\alpha = \text{zrychlení zemětřesení} / \text{hodnotou PGA}$ pro danou lokalitu.
5. Vypočteme korigovaná seismická napětí podle vztahu $\alpha \times SF \times \text{hodnota napětí při MVZ}$ (Box 6).
6. Stanovíme poměr (normální + korigované seismické napětí) / dovolené namáhání (Box 7).
7. Pokračujeme stanovením pravděpodobnosti překročení k jednotlivým hodnotám zrychlení z předchozího bodu (Box 8).
8. Vykreslujeme závislost z Boxu 8.

Splněním všech předchozích bodů jsou splněny kroky 1 - 8, dle obrázku 14 máme všechny údaje potřebné k vynesení grafu ročních pravděpodobností překročení v závislosti na $((NPP + \text{korigované seismické napětí při MVZ}) / \text{dovolené namáhání})$. Zvolená závislost je vhodná pro porovnání s výsledky testů EPRI uskutečněných v rámci programu Piping and Fitting Dynamic Reliability Program a následně hodnocených US NRC. Výsledkem jsou napět'ové hodnoty při 1% pravděpodobnosti porušení, viz tabulka 13. Pro 50% pravděpodobnost porušení potrubí platí násobek dovoleného namáhání $6,3 S_m$.

Tabulka 13: Hodnoty napětí při 1% pravděpodobnosti porušení

Komponenta	Hodnota napětí odpovídající 1% pravděpodobnosti porušení
Obvodový svar - přímé potrubí	6× dovolené napětí (dle ASME)
Obvodový svar - nátrubek	4, 5× dovolené napětí (dle ASME)
PWR koleno	(4, 2 ÷ 6)

Pro 50% pravděpodobnost porušení potrubí platí násobek dovoleného namáhání $6,3 S_m$.

Finálním krokem postupu [3] je vynesení vypočítaných hodnot do semilogaritmického grafu. Z křivky závislosti ročních pravděpodobností překročení a podílu součtu

napětí a dovoleného namáhání (*NPP+ korigované seismické napětí při MVZ*) / *dovolené namáhání* se prokáže, zda byla pravděpodobnost překročení 10^{-5} nebo 10^{-6} překročena.

9.2.1 Stanovení součinitele bezpečnosti

V odstavcích 9.2.1, 9.2.2, 9.2.3 jsou shrnuty informace z publikací [3, 72].

Váhový součinitel (Scale Factor, SF) uvedený výše je převrácenou hodnotou součinitele bezpečnosti. Součinitel bezpečnosti F je obecně definován následujícím vztahem

$$A_C = F A_{MVZ}, \quad (9.8)$$

kde A_{MVZ} je hodnota PGA vybrané lokality a A_C představuje kapacitní součinitel PGA. Součinitel bezpečnosti F představuje vazbu mezi návrhovým zrychlením podloží *PGA* a „best estimate“ hodnotou seismické kapacity. A_C i F mají dle předpokladů lognormální rozdělení s mediány popsány níže a logaritmicou směrodatnou odchylkou β_C . Faktor bezpečnosti F se dále vyjadřuje ve formě součinu

$$F = F_C \cdot F_{rs}, \quad (9.9)$$

kde F_C je součinitel kapacity a F_{rs} je součinitel odezvy stavby. Mediánová hodnota součinitele bezpečnosti F_m a mediánová hodnota kapacity zrychlení podloží jsou vázány vztahem

$$F_m = \frac{A_m}{A_{MVZ}}. \quad (9.10)$$

Výše zmíněná logaritmicá směrodatná odchylka β_C respektuje vliv nejistot β_U a vliv náhodnosti β_R . Platí vztah

$$\beta_C = \sqrt{\beta_U^2 + \beta_R^2}. \quad (9.11)$$

9.2.2 Součinitel bezpečnosti stavby

Součinitel bezpečnosti stavby F_{rs} se zavádí pro odstranění konzervatismu z hodnot odezvy stavby, které byly vypočteny na základě hodnoty PGA stanovené pro vybranou lokalitu. Faktor F_{rs} je definován formou součinu devíti faktorů

$$F_{rs} = F_{SS} \cdot F_{gmth} \cdot F_{SSI} \cdot F_{incoh} \cdot F_d \cdot F_m \cdot F_{mc} \cdot F_{ec} \cdot F_{nl}. \quad (9.12)$$

Faktory figurující v rovnici mají následující význam:

F_{SS}	součinitel tvaru spektra odezvy,
F_{gmth}	součinitel vyjadřující konzervatismus syntetických akceleroogramů,
F_{SSI}	součinitel vazby mezi „best estimate“ modelováním SSI (Soil-Structure Interaction, interakce konstrukce s podložím) a projektovým modelováním,
F_{incoh}	součinitel zahrnující vliv průchodu vln a náhodných jevů při pohybu podloží ve volném terénu, je funkcí velikosti základů, je významný při výskytu pohybů s frekvencí nad 10 Hz,
F_d	součinitel tlumení, představuje poměr mezi hodnotami tlumení <i>best estimate</i> a projektovým
F_m	součinitel konzervatismu při výpočtu vázaný na výpočtové předpoklady,
F_{mc}	součinitel vyjadřující jednostrannost ve výpočtu odezvy vzhledem k předepsaným kombinacím tvaru kmitu,
F_{ec}	součinitel vyjadřující jednostrannost ve výpočtu odezvy vzhledem k předepsaným směrovým kombinacím,
F_{nl}	součinitel nelineárního chování stavby při výpočtu vstupů podepřených komponent a systémů.

Podobně jako ve vztahu (9.12) lze vyjádřit výslednou logaritmickou směrodatnou odchylku ve tvaru

$$\beta_{rs} = \sqrt{\beta_{SS}^2 + \beta_{gmth}^2 + \beta_{SSI}^2 + \beta_{incoh}^2 + \beta_d^2 + \beta_m^2 + \beta_{mc}^2 + \beta_{ec}^2 + \beta_{nl}^2}. \quad (9.13)$$

9.2.3 Potrubí, zařízení a komponenty

Dle US NRC [3] je věnována pozornost odezvě a kapacitě komponent, zařízení a potrubí. Pro výpočet seismické kapacity potrubí je třeba přepsat rovnici 9.8 pro součinitel bezpečnosti do tvaru

$$F = F_{rs} \cdot F_{re} \cdot F_C, \quad (9.14)$$

kde součinitel F_{re} pro odezvu potrubí *best estimate* bude mít tvar analogický rovnici 9.12

$$F_{re} = F_{ess} \cdot F_{ed} \cdot F_{em} \cdot F_{ean} \cdot F_{mc} \cdot F_{ec} \cdot F_{enl}. \quad (9.15)$$

Faktory figurující v rovnici mají následující význam:

F_{ess}	součinitel vyjadřující generování podlažních spekter odezvy, která zahrnují rozšíření a vyhlazení vypočítaných spekter odezvy,
-----------	---

F_{ed}	faktor tlumení představuje poměr mezi hodnotami tlumení <i>best estimate</i> a projektovým,
F_{em}	součinitel konzervatismu pro návrh subsystémů,
F_{ean}	součinitel systémových analýz, v rámci analýzy je za <i>best estimate</i> metodu považována přímá integrace pohybových rovnic systému, zatímco ostatní metody, např. metoda spektra odezvy, jsou považovány za konzervativní,
F_{mc}	součinitel vyjadřující jednostrannost ve výpočtu odezvy vzhledem k předepsaným kombinacím tvaru kmitu,
F_{ec}	součinitel vyjadřující jednostrannost ve výpočtu odezvy vzhledem k předepsaným směrovým kombinacím,
F_{ent}	součinitel nelineárního chování subsystémů.

Podobně jako ve vztahu (9.13) lze vyjádřit výslednou logaritmicou směrodatnou odchylku β_{re} ve tvaru

$$\beta_{re} = \sqrt{\beta_{ess}^2 + \beta_{ed}^2 + \beta_{em}^2 + \beta_{ean}^2 + \beta_{mc}^2 + \beta_{ec}^2 + \beta_{ent}^2}. \quad (9.16)$$

na základě uvedených vzorců lze stanovit součinitel bezpečnosti, jehož převrácenou hodnotou je váhový součinitel potřebný k výpočtu korigovaných seismických napětí dle schématu, viz odstavec 9.2.

9.3 Metoda SBRA

Metoda Simulation-Based Reliability Assessment (SBRA) [90] je jednou z pravděpodobnostních metod založených na simulační technice Monte Carlo.

Spolehlivost konstrukce obecně lze definovat jako odolnost konstrukce větší než je účinek zatížení působícího na konstrukci. Celková odolnost konstrukce je proměnná veličina závisající na materiálových vlastnostech, přesnosti analytických modelů, geometrických parametrech a dalších mnoha faktorech. Podobně i zatížení, která souvisí s vlivem vnějších jevů, jako např. vítr, zemětřesení nebo vibrace způsobené okolními komponentami nebo např. projíždějícími vozidly jsou ve své podstatě náhodné veličiny [90, 91].

Řada norem a předpisů používaných v praxi je založena na deterministických nebo částečně pravděpodobnostních přístupech. V současnosti je vzhledem k pokročilým

výpočtovým nástrojům možné a zároveň vhodné používat postupy, které více respektují náhodný charakter některých vstupních veličin výpočtu, zejména zatížení, geometrických a materiálových parametrů. Jedná se o přístup, díky kterému lze přejít k plně pravděpodobnostnímu výpočtu spolehlivosti konstrukcí [92]. Zatímco deterministický přístup považuje vstupní veličiny za konstantní, pokud použijeme přístup stochastický, vstupní veličiny budou mít charakter náhodných veličin, které mají příslušné pravděpodobnostní rozdělení a statistické parametry [93].

Jednou z možností, jak postupovat při výpočtu s náhodnými vstupními veličinami, jsou metody založené na využití techniky Monte Carlo. Jednou ze simulačních metod je metoda SBRA, popsána velmi detailně včetně řady příkladů v publikacích [90, 94]. Aplikace metody je pro spolehlivost konstrukcí uvedena např. v pracích [93, 95], pro problematiku seismického buzení např. v publikaci [96] a pro aplikace v jaderné energetice v prezentaci práce [97].

Metoda SBRA je pravděpodobnostní metoda určená pro výpočty spolehlivosti [93]. Její význam především ve zdůraznění nejistot při výpočtech s využitím deterministických kritérií pro bezpečnostní analýzy, zejména v případě strukturální integrity, např. pro potrubní systémy. V současné době je metoda SBRA využívána také pro výpočty návrhové pravděpodobnosti [98].

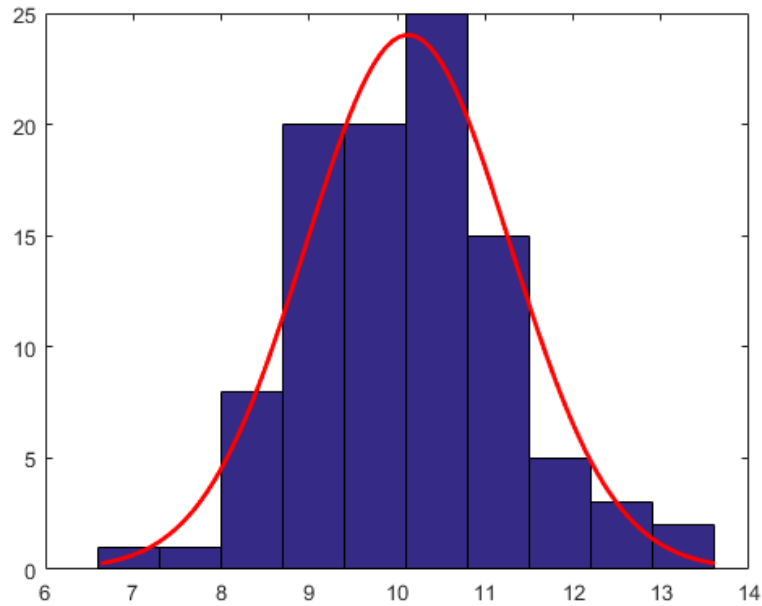
9.3.1 Vstupní náhodné veličiny

Prvním krokem metody je zavedení vstupních náhodných veličin, které jsou vyjádřeny pomocí histogramů s neparametrickým rozdělením pravděpodobnosti [100]. Vzhledem k charakteru většiny parametrů, které realisticky mohou nabývat hodnot pouze v omezeném intervalu, lze použít k popisu vstupních veličin omezená (useknutá) rozdělení, která definujeme pouze na omezeném intervalu [100]. Příkladem mohou být geometrické parametry, které nemohou reálně nabývat záporných hodnot. Podobně lze hledat intervaly např. na základě geometrických parametrů komponenty dané výrobcem.

V praxi se pro definici neparametrického rozdělení veličin na omezeném intervalu používají histogramy. Histogram zobrazený jako sloupcový graf četností reprezentuje pravděpodobnostní funkci. Na ose x jsou vyneseny intervaly měřených hodnot, na ose y četnosti hodnot spadajících do intervalů hodnot na ose x (nebo pravděpodobnosti výskytu těchto hodnot).

Jednoduchý příklad histogramu je uveden na obrázku 15 [99]. Jedná se o znázornění 100 náhodných čísel s normálním rozložením, kde střední hodnota je 10,

standardní odchylka 1 a bylo zvoleno rozdělení hodnot do deseti intervalů.



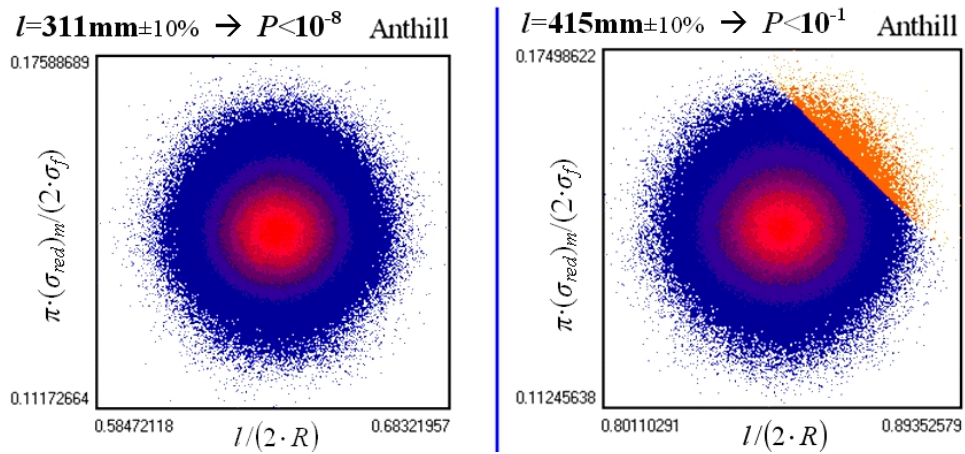
Obrázek 15: Příklad histogramu normálního rozdělení v programu Matlab

9.3.2 Použití a výstupy metody SBRA

Vývoj simulačních metod se odvíjel od dostupnosti počítačů a možnosti narůstaly s jejich rostoucím výkonem.

Pro aplikaci metody SBRA byl vytvořen program *AnthillTM* založený na technice Monte Carlo a stochastických simulačních technikách. Program vytvořili autoři prof. Ing. Pavel Marek, Dr.Sc. a Ing. Milan Guštar, Ph.D. První práce a společný výzkum autorů vznikly na začátku 90. let minulého století. Společně vydali dvě publikace popisující metodu a její aplikace *Simulation Based Reliability Assessment for Structural Engineers* [90] a *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation* [94].

Jestliže při aplikaci metody SBRA volíme vybrané vstupní parametry jako náhodné veličiny, pak výsledné hodnoty mají také náhodný charakter [101]. Typickým grafickým výstupem je tzv. mraveniště. Příklad mraveniště vytvořeného v programu Anthill je znázorněn na obrázku 16 [95].



Obrázek 16: Ukázka „mraveniště“ [95]

10 Výsledky

Kapitola představuje předpoklady výpočtů, aplikace metod uvedených v teoretické části práce a výsledky výpočtů. Použitá vstupní data byla prezentována v kapitole 8. Aplikační část práce bude představena v následujících podkapitolách:

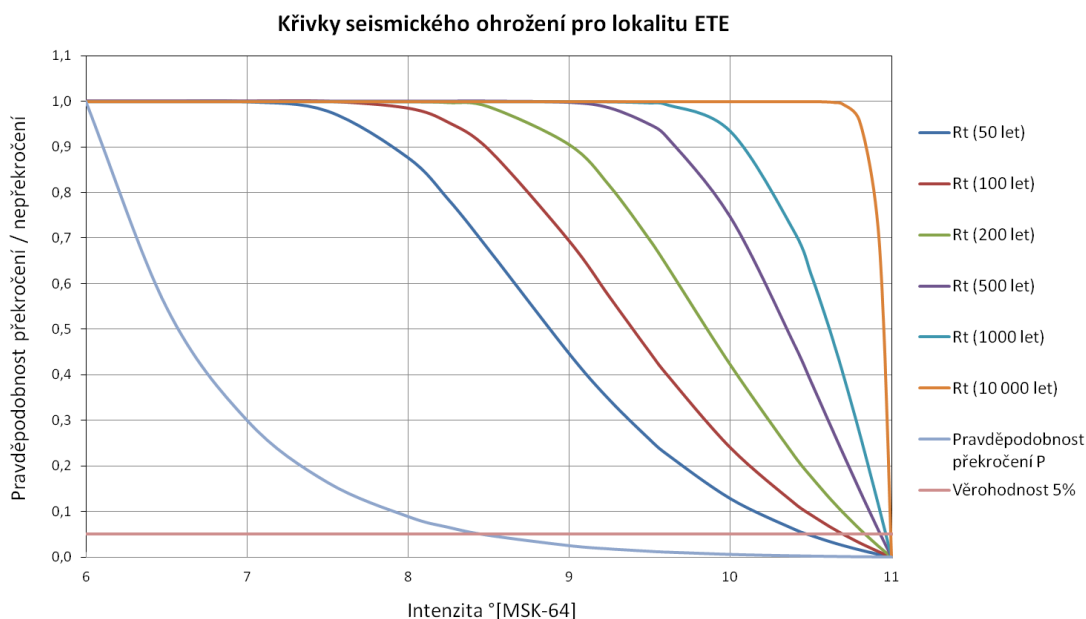
1. Výpočet seismického ohrožení lokality JE Temelín – odstavec 10.1.
2. Výpočet doby návratu a roční pravděpodobnosti překročení – odstavec 10.2.
3. Výpočet korigovaných seismických napětí dle postupu US NRC [3] a stanovení vlivu seismické události na redeficni LB LOCA – odstavec 10.3.
4. Výsledky výpočtu získané metodou SBRA – odstavec 10.4.

10.1 Stanovení seismického ohrožení lokality JE Temelín

Na základě mapy maximálních pozorovaných intenzit uvedené v odstavci 9.1.1 lze stanovit seismické ohrožení JE Temelín na hodnotu $6^{\circ}MSK-64$. Jedná se o výsledek metody, která je vhodná pro civilní objekty, nikoliv pro technologické celky.

Výsledek aplikace metody extrémních hodnot pro hodnocení seismického ohrožení lokality JE Temelín na základě údajů z katalogu zemětřesení [27] pro území se středem v lokalitě JE Temelín a s poloměrem 400 km je zobrazen na obrázku 17. Křivky vyjadřují pravděpodobnost překročení $P(I_0 \geq I_{0i})$ a pravděpodobnosti nepřekročení $R_t(I_0 \geq I_{0i})$ pro období t : 50, 100, 200, 500, 1000 a 10 000 let. Perioda pozorování byla zvolena $T = 800$ let, $I_{0min} = 6^{\circ}MSK-64$ a $I_{0max} = 11^{\circ}MSK-64$.

Z grafu uvedeného na obrázku 17 lze odečíst, že pro časový interval 100 let a intenzitu zemětřesení $10^{\circ}MSK-64$ je pravděpodobnost výskytu 0,1281. Až pro časový interval 10 000 let je pravděpodobnost výskytu rovna $0,9999 = 1$. Pro zemětřesení s intenzitou $10,5^{\circ}MSK-64$ bude pro časový interval 50 let pravděpodobnost výskytu



Obrázek 17: Křivky pravděpodobností výskytu zemětřesení podle stupnice MSK-64 pro časové intervaly 50, 100, 200, 500, 1000 a 10 000 let.

0,0474 a pro časový interval 10 000 let bude pravděpodobnost výskytu $0,9999 = 1$. S růstem časového intervalu hodnota seismického ohrožení lokality roste.

Odečtené údaje je třeba ještě upravit s ohledem na vzdálenost a útlum otřesů parametrem útlumu intenzity, který je podrobněji popsán v odstavci 9.1.3. Na základě hodnot pro parametr útlumu intenzity se vzdáleností uvedených v práci [81] můžeme stanovit útlum pro nejméně příznivý případ, který nastává v ohniskové oblasti Friuli, pro výskyt maximální intenzity v nejméně příznivé vzdálenosti. Útlum ze vzdálenosti 400 km v severním směru od oblasti Friuli je vyjádřen poklesem intenzity o $4,5^\circ$ MSK-64 [81]. Po odečtení hodnoty od maximální intenzity zemětřesení v oblasti Friuli, která dosahuje 11° MSK-64, dostaneme hodnotu seismického ohrožení JE Temelín od otřesů v oblasti Friuli $6,5^\circ$ MSK-64 s přesností $\pm 0,5^\circ$ MSK-64.

Dle tabulky 19 uvedené v Příloze 2 lze konstatovat, že největší intenzity zemětřesení v lokalitě JE Temelín pro časový interval 10 000 let jsou:

- $6,5^\circ$ MSK-64 v případě maximálních otřesů v ohniskových oblastech Friuli a Východní Alpy,
- 6° MSK-64 v případě maximálních otřesů v ohniskových oblastech Regensburg-Augsburg a Innsbruck a okolí,
- $5,5^\circ$ MSK-64 v případě maximálních otřesů v ohniskové oblasti Linz-Pregarten-

Molln-Neulengbach.

Pro stanovení seismického ohrožení pravděpodobnostním přístupem za použití metody extrémních hodnot byla vstupní data tvořena stejnou množinou dat použitou pro deterministický přístup. Varianty pro výskyt zemětřesení byly vytvořeny kvalitativní změnou parametru b z četnostního grafu pro lokalitu JE Temelín, podobně jako v [102, 103].

Bylo tak vytvořeno 129 variant s krokem 0,001. Simulací získáme pro parametr $b = 0,520 \pm 0,064$ sto dvacet devět variant ($b = 0,456; 0,457; \dots; 0,583; 0,584$). Výpočtem podle rovnic uvedených v odstavci 9.1.2 pro metodu extrémních hodnot s ohledem na přesnost dat $0,5^\circ\text{MSK-64}$ dostaneme hodnoty seismického ohrožení pro lokalitu JE Temelín:

Časový interval 50 let:

$6,1; 6,1; \dots; 6,0; \dots; 5,7; 5,7^\circ\text{MSK} - 64$.

Časový interval 100 let:

$6,3; 6,3; \dots; 6,2; \dots; 6,1; 6,0^\circ\text{MSK} - 64$

Časový interval 10000 let:

$6,5; 6,4; \dots; 6,4; \dots; 6,4; 6,4^\circ\text{MSK} - 64$.

Pro všechny tři množiny dat byly stanoveny dvě charakteristické hodnoty – medián a medián + σ (směrodatná odchylka). Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Seismické ohrožení stanovené na základě pravděpodobnostního přístupu

Časový interval	Medián [$^\circ\text{MSK-64}$]	Směrodatná odchylka [$^\circ\text{MSK-64}$]	Medián + σ [$^\circ\text{MSK-64}$]
Časový interval 50 let	6,0	0,1	6,1
Časový interval 100 let	6,2	0,1	6,3
Časový interval 10 000 let	6,4	0,1	6,5

10.2 Doba návratu a předpokládané četnosti výskytu

Použitím vzorce (9.6) uvedeného v odstavci 9.1.5 byly vypočteny doby návratu jednotlivých intenzit zemětřesení. V tabulce 15 jsou uvedeny v prvním sloupci stupně intenzity zemětřesení I_{0i} s krokem $0,5^\circ$ MSK-64, ve druhém sloupci jsou doby návratu τ_i , dále pozorované kumulativní četnosti stanovené na základě dat vybraných z katalogu zemětřesení [27] pro JE Temelín a v posledním sloupci jsou vypočtené kumulativní četnosti dle vztahu (9.7).

Hodnoty intenzity zemětřesení nejsou opraveny o parametry útlumu. Jedná se intenzity zemětřesení, které mohou nastat v okruhu 400 km od JE Temelín.

Tabulka 15: Vypočítané hodnoty doby návratu, pozorované a vypočítané kumulativní četnosti výskytu zemětřesení v regionu JE Temelín

I_{0i} $^\circ$ [MSK-64]	τ_i [roky]	N_{ci} (pozorovaná)	\overline{N}_{ci} (vypočítaná)
6	2,01	375	397
6,5	3,67	190	217
7	6,70	115	119
7,5	12,29	59	65
8	22,65	38	35
8,5	42,20	20	18
9	80,26	13	9
9,5	159,13	6	5
10	346,01	4	2
10,5	975,64	1	1
11	0	0	0

Pomocí vztahů uvedených v tabulce 5 pro vyjádření stupňů MSK-64 v násobcích gravitačního zrychlení g a pomocí aproximační křivky byly jednotlivým stupňům intenzity zemětřesení přiřazeny hodnoty zrychlení v $[cm.s^{-2}]$ a v násobcích g . Pro hodnoty zrychlení vyžadované pro výpočet US NRC byly vypočteny roční pravděpodobnosti překročení.

Roční pravděpodobnost překročení je definována jako převrácená hodnota doby návratu [104] za předpokladu, že se jedná o Gaussovo rozdělení. Výsledné hodnoty jsou uvedeny společně s dalšími výsledky v tabulce 16.

Tabulka 16: Vypočítané hodnoty zrychlení podloží a roční pravděpodobnosti překročení

Zrychlení a		Roční pravděpodobnost překročení $P[-]$
$[cm.s^{-2}]$	$[g]$	
50	0,051	$7,71 \cdot 10^{-4}$
75	0,076	$3,75 \cdot 10^{-4}$
150	0,153	$1,12 \cdot 10^{-4}$
250	0,255	$4,50 \cdot 10^{-5}$
300	0,306	$3,30 \cdot 10^{-5}$
400	0,408	$1,75 \cdot 10^{-5}$
500	0,509	$1,26 \cdot 10^{-5}$
650	0,662	$7,85 \cdot 10^{-6}$
800	0,815	$4,35 \cdot 10^{-6}$
1000	1,019	$2,18 \cdot 10^{-6}$
1200	1,223	$1,26 \cdot 10^{-6}$
1400	1,426	$8,33 \cdot 10^{-7}$
1600	1,630	$3,67 \cdot 10^{-7}$

10.3 Stanovení seismických korigovaných napětí dle US NRC

V tabulce 17 jsou uvedeny všechny vypočtené hodnoty pro výpočet korigovaných seismických napětí. Pro přehlednost jsou v tabulce zavedeny následující vztahy:

$$\delta = \frac{\sigma_{NPP} + \sigma_{kor}}{S_m}, \quad (10.1)$$

$$\alpha = \frac{a}{MVZ}, \quad (10.2)$$

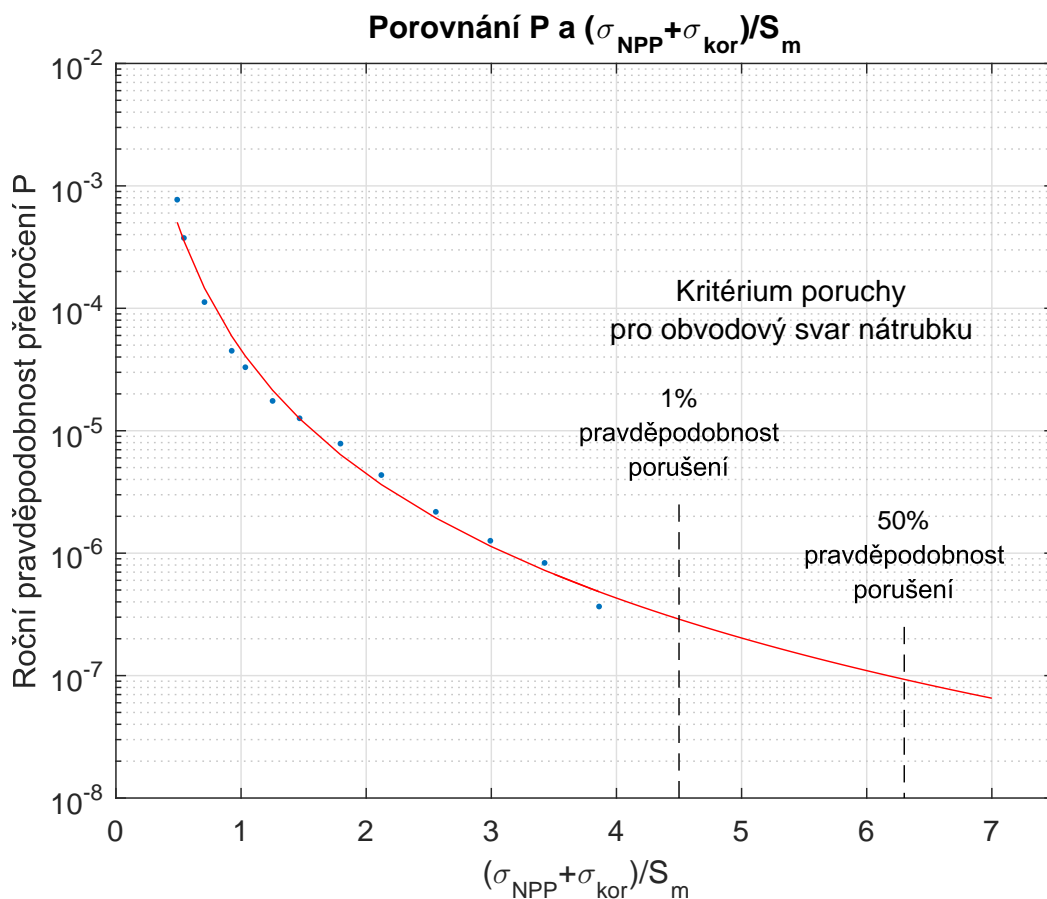
kde MVZ označuje hodnotu maximálního výpočtového zrychlení stanoveného pro lokalitu JE Temelín. Platí, že $MVZ = 0,1 g$.

Váhový součinitel SF (Safety Factor) byl v odstavci 8.4 odvozen na základě dokumentu [3], a to pro jadernou elektrárnu na skalním podloží v hodnotě $SF = 0,48$.

Tabulka 17: Stanovení korigovaných seismických napětí

Křivky ohrožení pro JE Temelín			α [-]	Korigovaná seismická napětí $\sigma_{kor} = \alpha \times SF \times MVZ$ [MPa]	Hodnoty δ [-]
Zrychlení a		Roční pravděpodobnost překročení P [-]			
[$cm.s^{-2}$]	[g]				
50	0,051	$7,71 \cdot 10^{-4}$	0,51	20,56	0,49
75	0,076	$3,75 \cdot 10^{-4}$	0,76	30,64	0,54
150	0,153	$1,12 \cdot 10^{-4}$	1,53	61,68	0,71
250	0,255	$4,50 \cdot 10^{-5}$	2,55	102,80	0,93
300	0,306	$3,30 \cdot 10^{-5}$	3,06	123,35	1,03
400	0,408	$1,75 \cdot 10^{-5}$	4,08	164,47	1,25
500	0,509	$1,26 \cdot 10^{-5}$	5,09	205,19	1,47
650	0,662	$7,85 \cdot 10^{-6}$	6,62	266,87	1,79
800	0,815	$4,35 \cdot 10^{-6}$	8,15	328,54	2,12
1000	1,019	$2,18 \cdot 10^{-6}$	10,19	410,78	2,56
1200	1,223	$1,26 \cdot 10^{-6}$	12,23	493,02	2,99
1400	1,426	$8,33 \cdot 10^{-7}$	14,26	574,85	3,43
1600	1,630	$3,67 \cdot 10^{-7}$	16,30	657,09	3,86

Vynesením vypočítaných hodnot do semilogaritmického grafu získáme porovnání hodnot $(\sigma_{NPP} + \sigma_{kor})/S_m$ a ročních pravděpodobností překročení P . Graf je znázorněn na obrázku 18. V grafu jsou zároveň vyneseny limitní hodnoty napětí pro potrubí při 1% pravděpodobnosti porušení ($4,5 S_m$), viz tabulka 13, a 50% ($6,3 S_m$) pravděpodobnosti porušení potrubí [3].



Obrázek 18: Porovnání hodnot $(\sigma_{NPP} + \sigma_{kor})/S_m$ a ročních pravděpodobností překročení P

Z grafu lze odečíst, že pravděpodobnost selhání pro limitní hodnotu napětí při 1% pravděpodobnosti porušení se blíží v případě primárního okruhu JE Temelín hodnotě $3 \cdot 10^{-7}$ /rok. Pro kritérium 50% pravděpodobnosti porušení je pravděpodobnost selhání méně než 10^{-7} /rok. Požadavek US NRC 10^{-5} je jednoznačně splněn. Podle křivky zobrazené v grafu 18 by primární okruh JE Temelín vyhověl až do hodnoty požadavku navýšené na cca $3 \cdot 10^{-7}$.

10.4 Aplikace metody SBRA

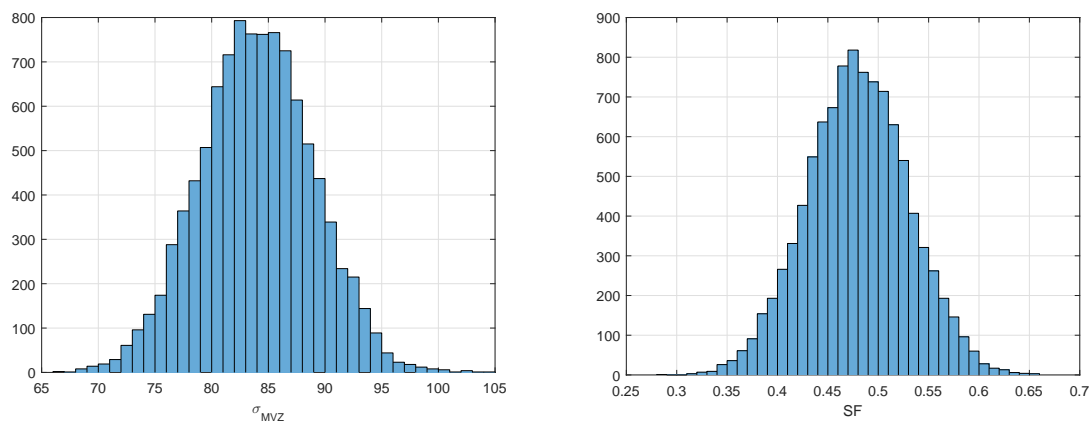
Postup navrhovaný US NRC pro výpočet pravděpodobnosti LB LOCA vyvolané zemětřesením byl dosud aplikován pouze na americké reaktory PWR. Výpočet prezentovaný v odstavci 10.3 ukazuje aplikaci postupu US NRC na JE Temelín, tj. reaktor typu VVER 1000/320. Vyvstává zde otázka, jaká je spolehlivost postupu US NRC při aplikaci na reaktor ruského typu VVER při použití hodnoty MVZ platné pro JE Temelín a dovoleného namáhání v hodnotě 188,8 MPa.

K analýze spolehlivosti výpočtu lze využít metodu Simulation Based Reliability Assessment (SBRA).

Předpokládejme nejistoty (náhodný charakter) vstupních veličin výpočtu uvedeného v odstavci 10.3. Zvolme ze vstupních veličin

- součinitel SF , který závisí na hodnotách parametrů F_{SS} , F_{gmth} , F_{SSI} , F_{incoh} , F_d , F_m , F_{mc} , F_{ec} , F_{nl} , viz odstavec 8.4,
- napětí σ_{MVZ} v potrubí primárního okruhu JE Temelín vyvolané zemětřesením o intenzitě $MVZ = 0,1 g$.

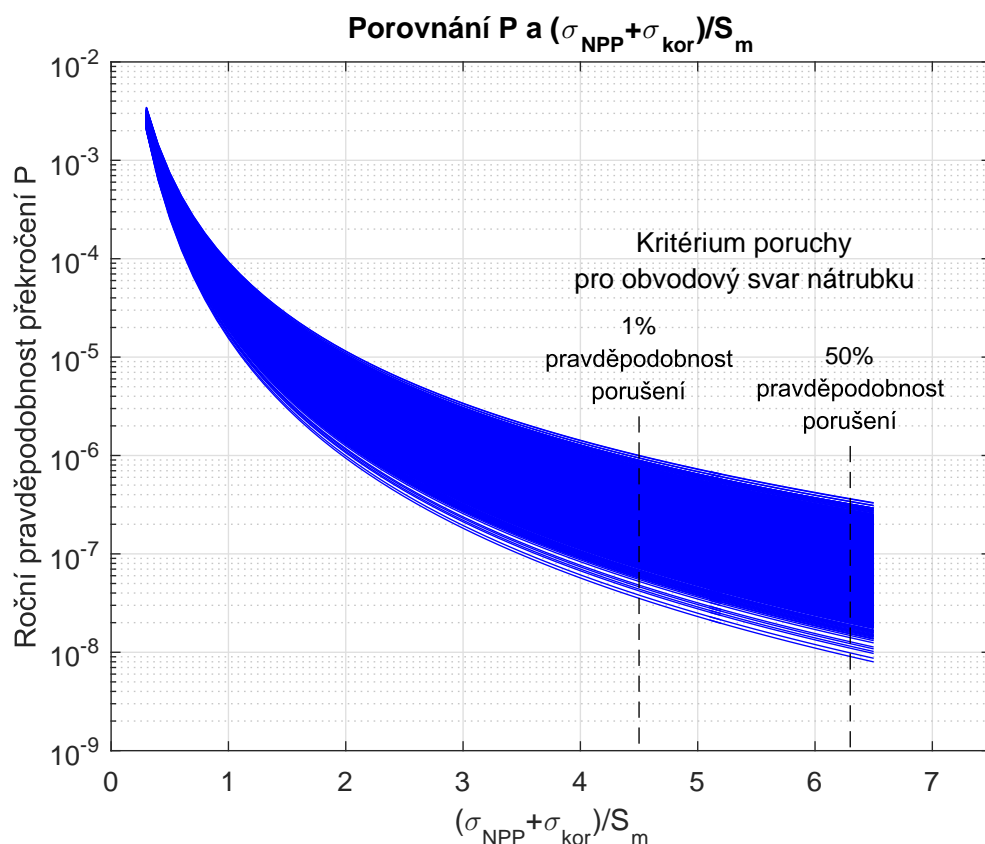
V obou případech bylo uvažováno normální rozdělení, váhovému součiniteli SF s rozptylem 10%, napětí σ_{MVZ} 5%. Histogramy obou veličin při volbě 10^5 náhodných čísel jsou zobrazeny na obrázku 19.



Obrázek 19: Histogramy vstupních veličin σ_{MVZ} a SF

Pro výpočet byl vytvořen program v SW Matlab. Program byl otestován na kontrolních výpočtech. Výpočet proběhl pro 10^8 náhodných čísel. Řešením úlohy je množina

křivek, na obrázku 20 je zobrazena množina křivek při výpočtu pro 10^5 náhodných čísel.

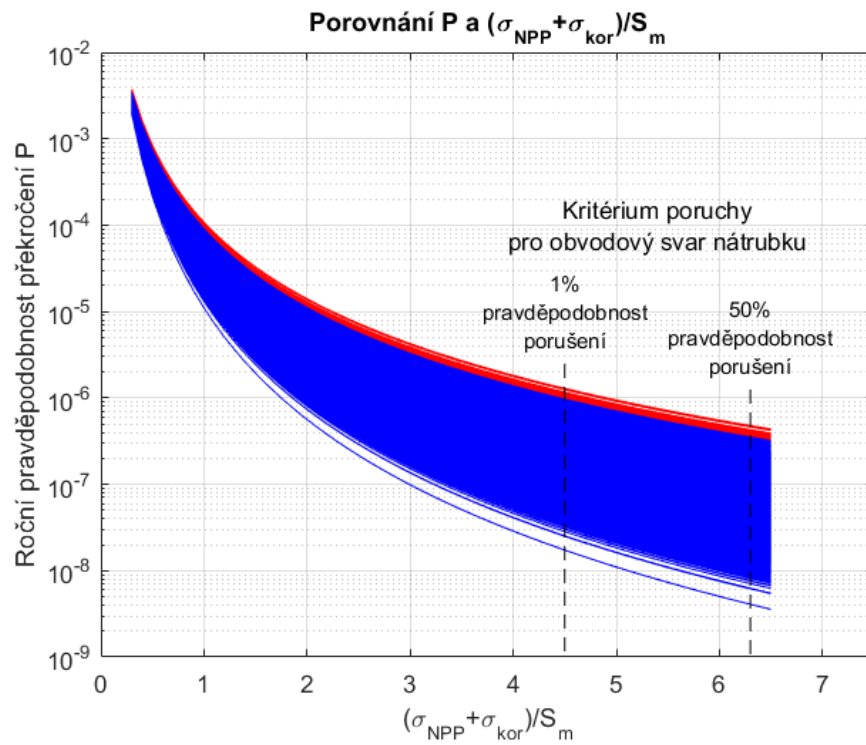


Obrázek 20: Křivky zobrazující závislost roční pravděpodobnosti překročení P a křivky $(\sigma_{NPP} + \sigma_{kor})/S_m$ pro náhodné vstupní parametry σ_{MVZ} a P

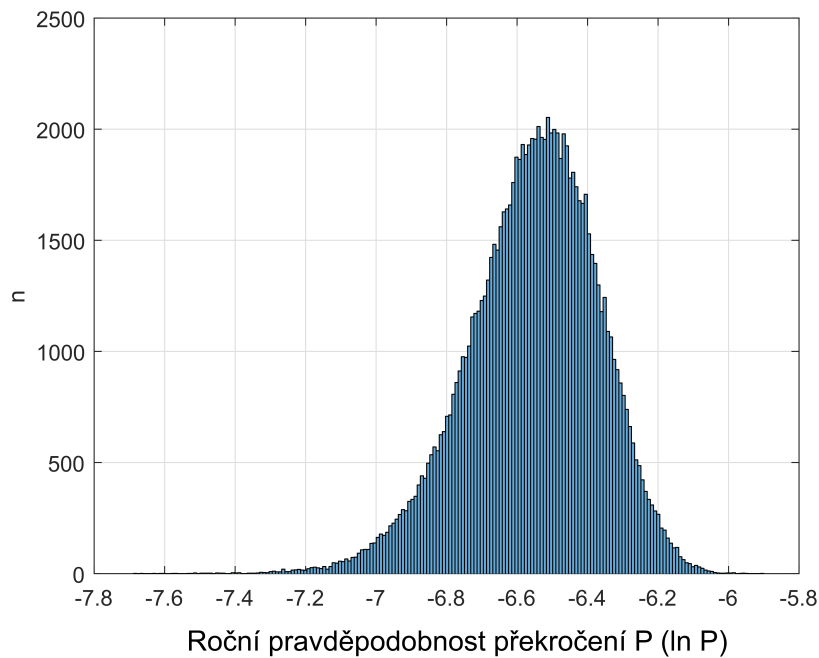
Kritériem úspěchu je dle US NRC [3] nepřekročení hodnoty 10^{-5} . Z grafu 20 je zřejmé, že kritérium nepřekročení hodnoty 10^{-5} je jednoznačně splněno.

Z hlediska vyšších požadavků lze kritérium nepřekročení zvýšit např. na 10^{-6} . Vykreslíme tedy křivky řešení vypočítané metodou SBRA s barevným odlišením, tj. křivky, které hodnotu 10^{-6} překročí, vykreslíme červeně, a křivky, které hodnotu nepřekročí, vykreslíme modře, viz obrázek 21.

Z dat znázorněných na obrázku 21 lze vytvořit histogram hodnot, který bude znázorňovat rozložení pravděpodobností překročení v hodnotě $4,5 S_m$. Histogram je uveden na obrázku 22. Z histogramu a kontrolních výpočtů metodou SBRA pro 10^6 , 10^7 a 10^8 náhodných čísel vychází, že podíl křivek, které překročí zvolenou limitní pravděpodobnost 10^{-6} , je řádově v desetinách promile.



Obrázek 21: Závislost roční pravděpodobnosti překročení P a křivky $(\sigma_{NPP} + \sigma_{kor})/S_m$ s barevným odlišením křivek, které překročily hodnotu 10^{-6}



Obrázek 22: Histogram rozložení hodnot pravděpodobnosti pro hodnotu $4,5 S_m$

11 Shrnutí a návrh opatření

Kapitola obsahuje shrnutí výsledků práce a návrhy opatření pro praxi založené na odborné diskuzi výsledků.

11.1 Shrnutí výsledků práce

Seismické ohrožení lokality

Hodnoty seismického ohrožení lokality JE Temelín byly v předložené práci stanoveny na základě deterministického i pravděpodobnostního přístupu s uvážením útlumů intenzity zemětřesení se vzdáleností pro jednotlivé ohniskové oblasti. Byla použita metoda založená na teorii extrémních hodnot, která vychází z Gumbelovy teorie extrémů [105, 106].

Stanovená hodnota seismického ohrožení 6, 5°MSK-64 konzervativně navýšená dle požadavků IAEA na 7°MSK-64 je totožná s výsledky výpočtu z roku 1994, dle kterého bylo provedeno zabezpečení JE Temelín před zkušebním provozem. Stanovená hodnota seismického ohrožení odpovídá zrychlení podloží 0, 1 *g* stanovenému v PpBZ JE Temelín, tj. MVZ vyžadovanému předpisy IAEA.

Použité metody vyhovují požadavkům SÚJB a IAEA.

Pravděpodobnost výskytu LB LOCA vyvolané zemětřesením

Aplikací postupu navrhovaného US NRC pro zmírnění bezpečnostních požadavků kladených na primární okruh jaderných elektráren bylo potvrzeno, že

- postup NRC lze aplikovat na reaktory VVER,
- i při zahrnutí nejistot ve vstupních parametrech výpočtu metodou SBRA primární okruh JE Temelín vyhoví požadavku nepřekročení pravděpodobnosti výskytu 10^{-5} ,
- pro zvýšený požadavek pravděpodobnosti nepřekročení na 10^{-6} primární okruh JE Temelín také vyhoví.

Diskuze

Odborná diskuze výsledků práce ukázala, že zásadní otázkou je volba vstupních parametrů výpočtů. Dovolené namáhání bylo v práci zvoleno na základě české normy pro jaderné elektrárny *NTD A.S.I. SEKCE III., Pevnostní výpočty komponent a potrubních systémů, Sekce 2, Materiály* [83] pro materiál primárního okruhu JE Temelín 10MFA2, $\min(R_p/1,5; R_m/2,6$ při dané teplotě 290°C $S_m = 188,8$ MPa. US NRC používá ve svém výpočtu hodnotu $18,8$ ksi, tj. cca 130 MPa. Výrazný rozdíl v hodnotách dovoleného namáhání poukazuje na kvalitu potrubních systémů JE Temelín.

Postulace LB LOCA je podmínkou kladenou ve fázi návrhu jaderné elektrárny. Prvním zmírněním požadavků, které bylo zavedeno i v předpisech IAEA byl přístup LBB. Aplikace LBB na primární okruh JE Temelín byla SÚJB potvrzena. Dalším návrhem na zmírnění požadavků, který US NRC předložilo, byla redefinice LB LOCA a vzápětí vliv seismické události na redefinici LB LOCA. Dokumenty obsahující návrh US NRC byly vydány v roce 2008. Havárie jaderné elektrárny Fukušima se stala v roce 2011. Vzhledem k náročným opatřením, která následovala v odezvě na havárii JE Fukušima, bylo zmírňování požadavků na potrubí primárního okruhu jaderných elektráren navrhované US NRC prozatím odloženo.

11.2 Návrh opatření pro praxi

V současné době se při analýzách seismického rizika klade důraz na pravděpodobnostní přístup. Je třeba zajistit, aby v případě analýzy seismického ohrožení pouze na základě pravděpodobnostního přístupu bylo vždy připojeno hodnocení epistemických nejistot. Jedná se o jedno z doporučení IAEA obsažené v dokumentu SSG-9 [35].

V rámci budoucích revizí seismického ohrožení lokality JE Temelín (i JE Dukovany) je třeba věnovat pozornost i dalším činnostem v souladu s požadavky na pravděpodobnostní hodnocení seismického ohrožení obsažené v návodu IAEA SSG-9, a to

- doplňování katalogu zemětřesení o přístrojově naměřená data, ale také o případné další historické údaje nalezené v historických pramenech,
- analýzy ohniskových oblastí a oblastí s difuzní seismicitou,
- provedení paleoseismologického výzkumu prehistorických zemětřesení, tj. průzkum zlomů v lokalitě JE Temelín a případné nalezení zlomů s potenciálem

posunu.

Dalším krokem ke zdokonalení postupu stanovení seismického ohrožení lokality je aplikace moderních výpočtových metod, např. aplikace Bayesovských funkcí pro vyjádření útlumu intenzity zemětřesení se vzdáleností.

Postup navrhovaný US NRC pro stanovení vlivu seismické události na pravděpodobnost výskytu LB LOCA představuje další změkčení požadavků na primární okruhy jaderných elektráren. V současné době lze postup přijmout jako možnou variantu pro periodické hodnocení bezpečnosti (Periodic Safety Review) existujících jaderných elektráren. Podobně jako v případě postupu LBB bude nutné prokázat přijatelnost metody v praxi včetně přijetí dozornými orgány jednotlivých států.

12 Závěr

Dizertační práce přináší analýzu postupu navrhovaného americkým dozorem US NRC pro hodnocení vlivu seismické události na četnost výskytu havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA a aplikaci na primární okruh jaderné elektrárny Temelín, tj. reaktor VVER 1000/320.

Všechny stanovené cíle práce byly splněny. Hlavní přínosy dizertační práce jsou:

- porovnání výsledků seismického ohrožení lokality JE Temelín vypočítaných na základě deterministického a pravděpodobnostního přístupu se zahrnutím útlumu intenzity zemětřesení se vzdáleností od ohniska,
- výpočet doby návratu a roční pravděpodobnosti překročení jednotlivých stupňů intenzity zemětřesení v lokalitě JE Temelín,
- aplikace postupu navrhovaného US NRC pro zmírnění požadavků na systémy havarijního chlazení aktivní zóny reaktoru a stanovení vlivu seismické události na redefinici LB LOCA,
- analýza spolehlivosti výpočtu dle postupu US NRC metodou SBRA.

Výsledky práce lze rozdělit na dvě části:

- seismická aktivita v lokalitě JE Temelín je nízká, maximální intenzita zemětřesení, kterou lze očekávat v časovém intervalu 10 000 let, je 6,5 °MSK-64,
- vliv seismické události na četnost výskytu havárie se ztrátou chladiva typu LB LOCA je zanedbatelný a jednoznačně splňuje kritérium US NRC 10^{-5} i při zahrnutí neurčitostí ve vstupních datech výpočtu.

Na základě výsledků práce lze potvrdit, že v případě jaderné elektrárny Temelín má seismická událost zanedbatelný vliv na pravděpodobnost výskytu havárie LB LOCA, a to i za předpokladu nejistot ve vstupních datech výpočtu, což bylo ověřeno metodou SBRA. Výsledky prokazují, že seismická odolnost jaderné elektrárny Temelín vychází ze samotného projektu. To je doloženo použitím přísnějšího kritéria 10^{-6} při hodnocení vlivu seismické události na četnost výskytu LB LOCA.

Literatura

- [1] ČEZ, a. s.: Technické provedení JE Temelín, Technologie a zabezpečení, Lokalita, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jaderna-elektřarny-cez/ete/technologie-a-zabezpečeni/3.html>
- [2] US NRC: *Estimating Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Frequencies Through the Elicitation Process*, NUREG 1829, April 2008.
- [3] USNRC: *Seismic Considerations for the Transition Break Size*, NUREG-1903, February 2008.
- [4] SÚJB: *O požadavcích na projekt jaderných zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti*, bezpečnostní návod JB-1.0, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, listopad 2011.
- [5] ASME: *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 1-Subsection NC-Class 2 Component*, ASME 2015, ISBN 978-07-9186-982-6.
- [6] US NRC: *Large Break LOCA Initiating Event Frequency Estimates*, Memorandum by Hossein Nourbakhsh to ACRS Members, Washington, January 2002.
- [7] Pavlíček, M.: *Přístupy k zajištění jaderné bezpečnosti u reaktorů 3. generace*, diplomová práce, VUT Brno, 2010.
- [8] IAEA: *Status report 83 - Advanced Power Reactor 1400 MWe (APR1400)*, [cit. 14.1.2016]. Dostupné z:
<https://aris.iaea.org/sites%5CPDF%5CAPR1400.pdf>
- [9] *CPR1000 Design, Safety Performance and Operability*, prezentace, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
<http://www.cgnpc.com.cn/n1500/n1529/n1534/c61263/part/61264.pdf>

- [10] ČEZ, a. s.: *Zátěžové testy JE - ČEZ, a.s.*, Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv, JE Temelín. Závěrečná zpráva, [cit. 14.4.2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/temelin/zaverecna-zprava-zt-ete.pdf>
- [11] ČEZ, a. s.: *Zátěžové testy JE - ČEZ, a.s.*, Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv, JE Dukovany. Závěrečná zpráva, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/dukovany/zaverecna-zprava-zt-edu.pdf>
- [12] US NRC: *Title 10 CFR 50.46 Acceptance criteria for emergency core cooling systems for light-water nuclear power reactors*, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, December 02, 2015, [cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0046.html>
- [13] US NRC: *Plant-Specific Applicability of 10 CFR 50.46 Technical Basis - A White Paper Supporting the Development of Regulatory Guidance for Applicants to Demonstrate that the Transition Break Size is Applicable to Their Plants*, US NRC, 2009.
- [14] Kolář, L., Demjančuková, K.: *Vliv externích hazardů na riziko provozu JE Temelín a JE Dukovany*, zpráva ÚJV, 2014.
- [15] Knochenhauer, M., Louko, P.: *Guidance for External Events Analysis*, SKI Report 02:27, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/42/022/42022460.pdf>
- [16] IAEA: *The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General*, IAEA Vienna, Austria, 2015.
- [17] Procházková, D.: *Seismické inženýrství na prahu třetího tisíciletí*, CD-ROM, Praha 2002, ISBN 80-238-8661-4.
- [18] Procházková, D.: *Analýza a řízení rizik*, ČVUT, Praha 2011, ISBN 978-80-010-4841-2, 405p.
- [19] Procházková, D.: *Analýza zemětřesení ve Střední Evropě*, Doktorská disertační práce. GFÚ ČSAV, Praha 1984, 486p.

- [20] Filiatrault, A.: *Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures*, Presses intl Polytechnique, 1996, ISBN 978-2-553-00575-6.
- [21] Přírodní katastrofy a environmentální hazardy: *Multimediální výuková příručka*, [cit. 12.3.2016]. Dostupné z:
[http : //www.sci.muni.cz/ herber/quake.htm](http://www.sci.muni.cz/herber/quake.htm)
- [22] Zátopek, A.: *Jak se studují zemětřesení*, Jednota československých matematiků a fyziků, Praha, 1949, 54p.
- [23] Bangash, M. Y. H.: *Earthquake Resistant Buildings*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, ISBN 978-3-540-93818-7.
- [24] Zahradník, J.: *Seismologie I.*, Katedra geofyziky MFF UK, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
[http : //geo.mff.cuni.cz/studium/Zahradnik – Seismologie – I.pdf](http://geo.mff.cuni.cz/studium/Zahradnik-Seismologie-I.pdf)
- [25] Matibet, J.B.: *Seismic Engineering*, Wiley, 2008, ISBN 978-1-84821-026-4.
- [26] Stevenson, J. D.: *Historical Development of the Seismic Requirements for Construction of Nuclear Power Plants in the U.S. and Worldwide and their Current Impact on Cost and Safety*, 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17), Prague, Czech Republic, 2003.
- [27] Procházková, D., Šimůnek, P.: *Fundamental data for Determination of Seismic Hazard of Localities in Central Europe*, Praha 1998. 132 p. ISBN 80-238-2661-1.
- [28] Zedník, J.: *Zemětřesení*. Geofyzikální ústav Akademeie věd ČR, [cit. 10.3.2016]. Dostupné z:
[https : //www.ig.cas.cz/userdata/files/popular/Zemetreseni_brozura.pdf](https://www.ig.cas.cz/userdata/files/popular/Zemetreseni_brozura.pdf)
- [29] Ústav fyziky Země, Masarykova univerzita Brno: *Temelín*, [cit. 2.3.2016]. Dostupné z: [http : //www.ipe.muni.cz/newweb/cesky/temelin/temelin.php](http://www.ipe.muni.cz/newweb/cesky/temelin/temelin.php)
- [30] Bláha, V.: *Metrologie v jaderné elektroenergetice - přednáška 6*, ZČU, 2012.
- [31] Tengler, M., Sedláček, J., Makovička, D.: *Požadavky na seizmické výpočty a hodnocení seizmické odolnosti stavebních konstrukcí a technologického zařízení JE Temelín, JE Dukovany a zásady jejich provedení*, zpráva Stevenson and Associates č. reo088-04.ete, duben 2005.

- [32] SÚJB: *Mimořádná národní zpráva ČR pro účely Úmluvy o jaderné bezpečnosti*. č. j. 2508/2012, [cit. 29.3.2016]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz>.
- [33] IAEA: *Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants*, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-3.3, Vienna, December 2002.
- [34] IAEA: *Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants*, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.6, Vienna, November 2003.
- [35] IAEA: *Specific Safety Guide SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*, IAEA Vienna, 2010.
- [36] ČEZ, a. s.: Technické provedení JE Temelín. Technologie a zabezpečení, [cit. 17.2.2016]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/jaderna-energetika/jadernoelektřarny-cez/ete/technologie-a-zabezpečeni/8.html>
- [37] IAEA [cit. 8. 4. 2016]: *Power Reactor Information System*, Operational & Long-Term Shutdown Reactors, IAEA, [cit. 12.4.2016]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>
- [38] Kobylka, D.: *Jaderné elektrárny a jaderné reaktory*, ČVUT, FJFI, Katedra jaderných reaktorů, prezentace, [cit. 12.1.2016]. Dostupné z: fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/U3V_eaktory.ppt
- [39] Zdebor, J.: *Primární okruh jaderné elektrárny - Přednáška 3*, ZČU, Říjen 2011.
- [40] Temelín: *na vlastní oči*. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity [online]. Dostupné na Internetu: <http://www.fi.muni.cz/~fomp/envi/eseje/polacek/schema.gif>
- [41] SÚJB: *Národní zpráva ČR pro účely Úmluvy o jaderné bezpečnosti*. Příloha 1, č. j. 6287/2.3/98, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz>.
- [42] Zácha, P.: *Jaderné reaktory a parogenerátory*, ČVUT, prezentace, [cit. 4.3.2016]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/files/JS1-JR-prednasky_3.cast-komponenty-a-systemy.pdf
- [43] Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren, 1. díl*, Vydavatelství ČVUT, 1996, ISBN 80-01-03190-X.

- [44] Švaříček, T.: *Modifikace utěsnění průlezu kompenzátoru objemu VVER 1000*, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2011.
- [45] Toman, P.: *Modifikace přírubového spoje elektroohříváku kompenzátoru objemu VVER 1000*, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
- [46] Demjančuková, K.: *Vyšetřování seismické odolnosti reaktorů VVER*, Diplomová práce, ZČU, 2009.
- [47] Hlavatý, I.: *Svařování komponent jaderných elektráren I.*, Český svářečský ústav, [cit. 21.2.2016]. Dostupné z:
[http : //homen.vsb.cz/ hla80/Publikace/HlavatyKalnica2005.pdf](http://homen.vsb.cz/hla80/Publikace/HlavatyKalnica2005.pdf)
- [48] ČEZ, a. s.: *Souhrnná zpráva o posouzení připojovacích svarů hlavního cirkulačního potrubí primárního okruhu k tlakové nádobě reaktoru JE Temelín*, [cit. 30.3.2016]. Dostupné z:
[http : //www.cez.cz/eede/content/file/energie – a – zivotni – prostredi/souhrnna – zprava – svary – tnr.pdf](http://www.cez.cz/eede/content/file/energie%20a%20zivotni%20prostredi/souhrnna%20zprava%20svary%20tnr.pdf)
- [49] SÚJB: *Vyhláška č. 195/1999 Sb. ze dne 21. října 1999 o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti*, [cit. 12. 4. 2016]. Dostupné z:
[http : //www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/19599.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/19599.pdf)
- [50] Chlud, M.: *Stanovení metodiky analýzy seismické odezvy potrubních soustav s viskózními tlumiči*, Dizertační práce, VUT v Brně, 2015.
- [51] Ellenberger, J. P.: *Piping and Pipeline Calculations Manual: Construction, Design Fabrication and Examination*, Elsevier Inc., 2010.
- [52] SÚJB: *Normy pro primární okruh JE a ochrana proti vysokému tlaku*, Konference online, [cit. 15.1.2016]. Dostupné z:
[http : //www.sujb.cz/aplikace/konference2/detail.php?page = 7&thrd = 81](http://www.sujb.cz/aplikace/konference2/detail.php?page=7&thrd=81)
- [53] Tengler, M.: *Aktuální přehled normativního kódu NTD A.S.I. pro použití na seismické hodnocení a kvalifikaci zařízení jaderných elektráren typu VVER*, prezentace Rajecké Teplice, březen 2015.
- [54] SÚJB: *Stanovisko SÚJB k NTD A.S.I., sekce I až VI a Zvláštní případy*, č. j. SÚJB/OPJZ/27534/2013, Státní úřad pro jadernou bezpečnost, Praha, 2013.

- [55] Mišák, J: *Selection of a new nuclear unit for Slovakia: Possibilities and key technical issues*, International Conference SECURE ENERGY SUPPLY, prezentace, [cit. 12.4.2016]. Dostupné z:
[http : //www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/public/43/130/43130825.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/public/43/130/43130825.pdf)
- [56] ASME: *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III*, Rules for Construction of Nuclear Facility Components-Division 1-Subsection NB-Class 1 Components, ASME 2015, ISBN 978-07-9186-981-9.
- [57] ASME: *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III*, Rules for Constructions of Nuclear Facility Components-Division 1-Subsection ND-Class 3 Components, ASME 2015, ISBN 978-07-9186-983-3.
- [58] KTA: *KTA 3201.2, Components of the Reactor Coolant Pressure Boundary of Light Water Reactors*, Part 2, Design and Analysis, the Nuclear Safety Standards Commission (KTA), 1996.
- [59] *PNAEG-7-008-89 Rostechndzor: Rules for Arrangement and Safe Operation of Equipment and Piping of Nuclear Power Installations*. Moscow, Energoatomizdat, 1990.
- [60] RCC-M Code, 2007 edition, plus 2008, 2009 and 2010 addenda, AFCEN, Paris.
- [61] JSME S NC1-PPC: *Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plants*, Class 2 Piping, Japan Society of Mechanical Engineers (JSME), 2008.
- [62] Canadian Nuclear Safety Commission: *REGDOC-2.5.2, Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants*, CNSC, 2014.
- [63] Swedish Radiation Safety Authority: *SSMFS 2008:17 The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Design and Construction of Nuclear Power Reactors*, ISSN 2000-0987, Ulf Yngvesson, January 2009.
- [64] Směrnice Evropského parlamentu a rady 2014/68/EU: *ze dne 15.května 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh*, Úřední věstník Evropské unie, L 20, 27. ledna 2015, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
[http : //eur - lex.europa.eu/legal - content/CS/TXT/PDF/?uri = OJ : L : 2015 : 020 : FULL&from = CS](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2015:020:FULL&from=CS)

- [65] Zeman, V. - Hlaváč. Z.: *Matematická teorie kmitání*, ZČU, Plzeň, 1999, ISBN 80-7082-563-4.
- [66] Brom, J.: *Seismický monitorovací systém JE Temelín*, Zpravodaj České nukleární společnosti, č.07/02, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
[http : //www.csvts.cz/cns/zprav/0207.htm](http://www.csvts.cz/cns/zprav/0207.htm)
- [67] Murray, R. L.: *Nuclear Energy: An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes*, Elsevier Science, 2008, ISBN: 978-0-0809-1944-7. 552p.
- [68] Heřmanský, B.: *Bezpečnost jaderných elektráren*, přednáška LOCA, ČVUT, 2006.
- [69] Marková, T.: *Analýza úniku velká LOCA v jaderné elektrárně s reaktorem VVER 1000*, Diplomová práce, ČVUT 2013.
- [70] Pečínka, L.: *Pravděpodobnostní LBB a redefinice velké LOCA*, zpráva ev.č. DITI 300/344, UJV Řež, a.s., říjen 2008.
- [71] US NRC: *Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Activities: Final Policy Statement*, Federal Register, Vol. 60, p. 42622 (60 FR 42622), August 16, 1995.
- [72] Pečínka, L.: *Redefinice velké LOCA: Vliv seismické události na velikost přechodu k roztržení*, zpráva ev.č. DITI 2300/10, UJV Řež, a.s., červen 2010.
- [73] US NRC: *10 CFR 50.30 Technical specifications*, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, December 02, 2015, [cit. 2.1.2016]. Dostupné z:
[http : //www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0036.html](http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0036.html)
- [74] US NRC: *50.49 Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants*, Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, December 02, 2015, [cit. 16.4.2016]. Dostupné z:
[http : //www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0049.html](http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-0049.html)

- [75] *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*, Main Report, NUREG/CR-6372, Lawrence Livermore National Laboratory, April 1997.
- [76] US NRC: *Elicitation and Use of Expert Judgement in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories*, Office of Nuclear Regulatory Research, May 1990.
- [77] Kameda, H.: *Study on Methodology of Seismic Hazard Evaluation in Japan*, Proceedings OECD/NEA Workshop on Seismic Risk. JAERI,, 1999, 22p.
- [78] US NRC: *Part 100 — Reactor Site Criteria*, NRC Regulations: Title 10, Code of Federal Regulations, 80 FR 54235, Sep. 9, 2015.
- [79] Pečínka, L.: *Special Seismic Problems of High Energy Piping*, presentation at Seismic Engineering Knowledge Transfer Seminar, Nuclear Research Institute Rez, Czech Republic, November 2011.
- [80] ASME: *BPVC Section III, Division 1, Nuclear Power Components, 1971 Edition*, Winter 1972 Addenda.
- [81] Procházková, D.: *Attenuation of Macroseismic Effects of Earthquakes*, Travaux Géophysiques. Academia Praha. 1982. p.47-95.
- [82] Procházková, D., Demjančuková, K.: *Seismic Hazard Assessment for Selected Real Locality in Central Europe - Critical Points of Assessment*, Conference Top Safe 2012, Helsinki 2012, ISBN 978-92-95064-15-7.
- [83] NTD A.S.I.: *Sekce III. Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER*. Asociace strojních inženýru, Praha, Brno 2007.
- [84] Chlud, M.: *Statický, dilatační a seizmický výpočet potrubí DPS 1.20R a 1.20G uvnitř hermetické zóny s novým typem tlumičů GERB pro HVB1 ETE*, ÚAM Brno, arch. číslo: 4968/12, březen 2012.
- [85] Chlud, M.: *Statický, dilatační a seizmický výpočet potrubí DPS 2.20R a 2.20G uvnitř hermetické zóny s novým typem tlumičů GERB pro HVB2 ETE*, ÚAM Brno, arch. číslo: 4969/12, březen 2012.
- [86] IAEA: *TECDOC-724. Probabilistic Safety Assessment for Seismic Events*, IAEA Vienna, 1993.

- [87] Ericson, C.: *Fault Tree analysis – A History*, Proceedings of The 17th International System Safety Conference, 1999, Orlando, Florida.
- [88] Rasmussen, N. C. et al.: *An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, WASH-1400 (NUREG-75/014). Technical Report, Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (USA), 1975.
- [89] IAEA: *Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting*, Safety Guide 50-SG-S1, IAEA, Vienna, 1979.
- [90] Marek, P., Guštar, M., Anagnos, T.: *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*, CRC Press, 1996, ISBN 0-8493-8286-6.
- [91] Vukazich, S., Marek, P.: *Structural Design Using Simulation Based Reliability Assessment*, Acta Polytechnica Vol. 41, No. 4-5/2001, p.85-92.
- [92] Guštar, M.: *Moderní metody simulace systémů metodou SBRA*, dizertační práce, VŠB-TUO, 2002.
- [93] Šedivý, M.: *Posouzení spolehlivosti prostorové příhradové konstrukce metodou SBRA*, VŠB-TUO, Studentská vědecká a odborná činnost, ak. rok 2005/2006, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
<http://www.fsv.cvut.cz/svoc/2006/prisp/04/sedivy.pdf>
- [94] Marek, P., Brozetti, J., Guštar, M.: *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation*, Background, Exercises and Software. ÚTAM AV ČR Praha, 2001, ISBN 80-86246-08-6.
- [95] Holý, S., Pečínka, L., Švrček, M.: *Aplikace metody SBRA na postup „únik před roztržením“*, XII. celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, 2011, ISBN 978-80-02-02294-7.
- [96] Fischer, O.: *To the Discussion on the Earthquake Loading in SBRA*, Euro-SiBRAM 2002, Praha UTAM, 2002. 1-6, 2002.
- [97] Pečínka, L., Švrček, M.: *Aplikace metody SBRA v jaderné energetice*, prezentace v tištěné formě, 2. 12. 2013, ÚJV Řež, a.s.
- [98] Frydrýšek, K.: *Pravděpodobnostní výpočty v Mechanice 1*, skriptum, Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, ISBN 978-80-248-2314-0, Ostrava, 2010, pp.149.

- [99] Mathworks: *Mathworks Support - Documentation*, Histfit, [cit. 1.3.2016]. Dostupné z:
[http : //www.mathworks.com/help/stats/histfit.html#btg7kla](http://www.mathworks.com/help/stats/histfit.html#btg7kla) – 1
- [100] Guštar, M.: *Omezené histogramy a SBRA*, II. ročník celostátní konference Spolehlivost konstrukcí, 2001, ISBN 80-02-01410-3.
- [101] Sivera, M., Klučka, R., Frydryšek, K.: *Spojení metody SBRA a metody počátečních parametrů při řešení úloh nosníků na pružném podkladu*, Konstrukce, příloha: Halové a střešní konstrukce, ISSN 1213-8762, vol.10, no.4, 2011, pp. X-XI.
- [102] Demjančuková, K.: *Srovnání výsledků pravděpodobnostního a deterministického hodnocení seismického ohrožení v západočeské metropoli*, Konference Požární ochrana 2012, SPBI 2012, ISBN 978-80-7385-115-6.
- [103] Demjančuková, K.: *Metody stanovení seismického ohrožení při výběru lokality pro technologická zařízení*, Konference Ochrana obyvatelstva 2012, SPBI 2012, ISBN 978-80-7385-109-5.
- [104] Booth, E. D., Key, D.: *Earthquake Design Practice for Buildings*, Thomas Telford, 2006, ISBN 978-07-2772-947-7.
- [105] Castillo, E.: *Extreme Value Theory in Engineering*, Statistical Modeling and Decision Science. Elsevier, 2012. ISBN 978-00-8091-725-2, 389 p.
- [106] Kotz, S., Nadarajah, S.: *Extreme Value Distributions: Theory and Applications*. World Scientific, 2000. ISBN 978-17-8326-173-4, 196p.

Příloha 1

Tabulka 18: Vstupní data vybraná z katalogu zemětřesení [27] pro hodnocení seismického ohrožení lokality ETE

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska	Intenzita v epicentru	Magni- tudo	Poznámka
		$^{\circ}N$	$^{\circ}E$	[km]	I_0 $^{\circ}$ [MSK-64]	M	Ohnisková oblast
456		47,23	16,62		9	6.2	27
518		47	19		9	6.2	33
823		51,1	12,8		7		3
827		51,1	12,8		7.5		3
984		47	19		8	5.6	33
12.5. 1022		47	19		8	5.6	33
15.8.1038		47	19		8	5.6	33
8.2.1062		49	12		8		6
12.5.1088		51,1	13,1		7.5		3
1100		47	18		8	5.6	29
1170		47	19		8		33
4.5.1201		47,1	14,2		9	6	17
1230		47,68	16,58		7		26
1250		47	19		9		33
1258		47	19		9	6.2	33
7.2.1258	01h	49	19		7		E, 22
31.1. 1259		49,7	20		8	5,2	23
8.5.1267	02h	47,5	15,4		8	5.5	18
1323		51,18	12,56		6.5	4.2	2
1326		50,8	12,2		6.5	4.2	1
1346		50,8	12,2		8	5.2	1
25.1.1348	16h	46,6	13,8	7	10	6.5	17
24.5.1366		50,8	12,2		7.5	4.8	1

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
1410		47	19		8	5.6	33
1433		50,7	16,5		6.5	4.6	5
1441		48,9	20,6		6		23
25.5.1443		47,5	16,3		8	5.6	26
5.6.1443	08h	48,71	18,94	25	8	5.9	E
1453		49	20,5		8	5.6	G, 23
May 1471		48,5	10,3		7		6
1.6.1485		47,5	16,3		7	5	26
26.3.1511	13-14h	46,1	14	15-20	10	6.9	17
26.3.1511	19-19h30m	46,2	13,4	20	10.5	7.2	17
26.2.1515		48,37	17,56		6		E
26.5.1540	19h	51,1	12,9		6.5		3
6.3.1552		50,58	13,08		6		3
12.2.1561		47,53	19,01		8	5.6	30
10.2.1562		50,5	16,7		6.5	4.6	3
1.11.1571		47,3	11,4		7	4.6	13
4.1.1572	19h45m	47,3	11,4		8	5.3	13
27.4.1578	11h	50,88	12,23		6.5	4.2	1
1.1.1585		47,5	16,3		8	5.6	26
1586		48,37	17,56		7	4.6	E
29.6.1590		47,95	16,4		6	4.2	18
15.9.1590	17h	48,2	15,91		8	4.7	15
15.9.1590	23h50m	48,2	15,91	5	9	6	15
1.10.1590		48,14	16,12		6	4.4	15
12.7.1595		47,3	11,5		6		13
16.12.1598		50,87	12,18		6.5	4.2	1
1.10.1599	8h30m	47,76	18,14		7	4.6	28
21.9.1600	19h	49,23	18,73		6		21
7.9.1601		47,5	16,3		7	5	26
27.11.1607	18h	49,06	18,29		6	4.1	21
16.11.1613	11h	49,25	18,75		8	5.2	21
5.1.1615		47,98	18,18		6	4.1	E
20.2.1615	02h	47,5	16,3		6	4.4	26
5.6.1643	11h	49,23	20,37		6	4.1	23
7.3. 1652		48,8	20		6	4.4	G
30.11.1660	08h30m	48,37	17,56		6	4.4	E

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska	Intenzita v epicentru	Magni- tudo	Poznámka
		°N	°E	[km]	I_0 °[MSK-64]	M	Ohnisková oblast
9.8.1662	23h	49	20,3		6	4.4	G
27.8.1668	06h	47,8	16,2		7	4.8	18
4.8.1669	15h15m	48,5	10,35		7		6
12.4.1670	01h30m	49,05	10,15		7		4
17.7.1670		47,3	11,5		8	5.3	13
26.3. 1676		48,5	21		6	4.4	G
22.12.1689		47,3	11,4		8	5.3	13
4.12.1690		46,6	13,8	6	9	6.2	17
Prosinec 1691		47,1	13,7		6.5	5	17
23.12.1693	12h	49,4	10,1		7		A
1700		48,14	17,12		7	4.6	20
28.7.1703		48,86	20,97		8	5.2	24, G
28.3.1706		47,3	11,4		6	3.8	13
2.12.1706		47,3	11,5		6.5		13
25.10.1711	19h15m	51,18	12,56		6.5	4.2	3
10.4.1712	11h	47,82	16,24		7	4.8	18
1.7.1720	17h	50,56	12,4		6	4	2
29.1.1724	19h45m	49,13	20,44		7	4.6	23
12.4.1724	12h	48,9	20,6		6		G, 23, 24
13.6.1724		48,9	20,6		6		G, 23, 24
18.8.1727		47,3	11,4		6.5	4.2	13
6.1.1734	02h	48,01	16,24		6	4.1	15
1736		47,8	16,3		7	5	18
30.6.1751		50,8	15,6		6	4.3	5
9.12.1755	8h30m	48,45	10,4		7		6
28.6.1763	04h22m	47,75	18,16		8.5	5.8	28
9.8.1763		47,7	17,6		6		27
5.2.1765	22h45m	47,76	18,14		6	4.1	28
5.8.1766	05h30m	47,8	16,61		7	4.6	18
16.8.1766		47,8	16,61		7	4.6	18
17.3.1767		47,76	18,14		6	4.1	18
13.4.1767		50,95	9,72		6.5	4.2	1
21.11.1767		46,9	14,3		7	4.6	17
8.12. 1767	10h	47,52	19,73		6	4.4	30
27.2.1768	01h45m	47,83	16,17	12	8	5.5	18
4.8.1769	15h15m	48,45	10,4		7		6

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
6.1.1771	16h	50,25	12,43		6	4	2
26.1.1774		50,1	18,2		6	4.3	19
28.1.1778		47,2	9,6		6		13
22.5.1778	1h30m	48,48	10,42		6		6
26.6.1780	21h20m	47,8	18,1		6	4.1	28
22.4.1783	02h30m	47,75	18,08	18	8	5.3	28
31.5.1783	11h	47,75	18,16		6		28
10.12.1783	16h	47,76	18,14		6	4.3	28
20.3.1784		50,6	13,7		7		B
15.6.1784		47,76	18,14		6	4.3	28
7.8.1784	03h40m	47,76	18,14		6	4.3	28
22.8.1785	06h	49,7	19	10	6.5		19
12.2.1786	23h	50,4	16,6		6	4	5
26.2.1786	23h45m	50	18		6		19
27.2.1786	03h	49,7	18,5	30	7.5		19
3.12.1786	16h	49,7	20	20	7.5		23
6.2.1788	07h	49,88	12,75		6		7
26.8.1789	09h30m	50,55	12,12		6	4	2
11.12.1789		50,8	15,6		6	4	5
6.2.1794	12h18m	47,4	15,1		8	5.3	18
12.5.1794		47,3	11,4		6		13
3.3.1796	23h	48,36	10,24		6		6
11.12.1799	14h45m	50,5	16,1	5	7		5
1805		48,58	17,68		6	4.3	20
22.9.1806	19h45m	47,76	18,14		7.5	5.1	28
14.1.1810	17h09m	47,38	18,2	6	8.5	5.3	29
21.1.1810	02h	47,38	18,2		6	4.4	29
27.5.1810	08h	47,38	18,2		7	5.0	29
3.6.1810		47,38	8,2		6	4.1	29
24.6.1810	14h	47,38	18,2		6	4.4	29
18.7.1810		47,6	14,5		7		15
21.12.1810	16h30m	47,38	18,2		6	4.4	29
6.9.1811	01h	47,38	18,2		6	4.1	29
4.10.1811	20h50m	47,55	15,56		6.5	5.3	18
28.4.1814		47,3	11,4		6		13
7.5.1814	16h15m	47,38	18,2		6	4.4	29

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
1815		47,73	18,33		6	4.4	28
15.6.1815	8h	48,6	17,68		6		20
17.7.1820		47,35	11,7		7	4.2	13
6.2.1822	8h	48,75	18,16		6.5		E
18.2.1822	16h15m	47,75	18,25		8	5.4	28
19.1.1824	15h30m	50,2	12,4	7	6.5		2
1.2.1824	05h	50,2	12,6		6		2
21.2.1825		46,8	14,4		6		17
15.5.1826		47,6	14,5		6		15
8.6.1830	07h10m	47,61	15,67		6.5	4.3	18
26.6.1830		47,4	15,1		6.5	4.3	18
11.7.1830	9h15m	48,75	19,35		7	4.6	22
11.8.1830		46,5	14,3		6		17
12.7.1836		46	17,5			5.3	33
14.3.1837	15h40m	47,61	15,67	9	7	5	18
11.7.1839	12h	47,45	19,68		6	4.1	30
23.4.1840		49,38	20,37		7	4.8	23
26.6.1840		49,4	20,37		6	4.4	23
13.7.1841	12h30m	47,82	16,24		7	4.8	18
24.10.1841	12h10m	47,76	18,14		7	4.6	28
31.8.1842	09h30m	46,47	17		6	4.4	29
9.5.1845	13h	47,76	18,14		6	4.3	28
7.4.1847	19h30m	50,31	10,77		6.5	4.2	A
30.8.1847		47,51	15,45		6	4	18
14.7.1850		50,2	12,8		6		2
1.7.1851	21h15m	47,74	18,15		7.5	5.1	28
16.2.1852		48,1	19,3		6		G
15.11.1852	22h30m	48,64	17,16		6	4.3	C
15.11.1852		48,63	19,15		6	4.1	G
2.10.1854	02h14m	47,78	19,13		6	4.1	31
31.1.1855	12h35m	48,46	18,96		6.5	4.5	F
18.3.1855		46,5	13,8		6	4	17
30.9.1855	20h	48,46	18,96		6	4.3	F
7.3.1857		46,6	14		6	4	17
9.6.1857	15h47m	47,76	18,14		6	4.3	28
24.12.1857		47,6	14,4		6		18, 15

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
25.12.1857		46,6	14		7	4.8	17
15.1.1858	19h15m	49,22	18,76	7	7.5	5.1	21
24.10.1858	15h14m	49,22	18,76		6	4.3	21
28.4.1859		47,4	11,8		6		13
8.11.1861		48,71	18,97		6		E
13.1.1862	00h55m	48,65	19,05		6	6	4.3
25.1.1862		46,5	14,4		6	4	17
27.5.1862		46,75	12,4		6.5	4.4	16
1.9.1864	11h05m	48,91	18,18		6	4.3	21
27.1.1865		47,5	12		6		13
16.5.1865		48,5	16,6		6.5		C
13.7.1865		47,05	16,18		6	4.3	27
10.12.1865		47,5	12		6		13
1866		48,1	19,9			6	G
29.5.1869	20h37m	48,73	19,16	7	6.5	4.3	22
8.8.1869	13h	47,8	18,1		6		28
5.1.1870	04h	48,37	17,16		6	4.3	20
18.1.1870	15h	47,65	15,92		6	4.2	18
6.3.1872	14h55m	50,86	12,28		7.5:	5.1	2
8.8.1872		47,3	11,4		6		13
3.1.1873	18h	48,25	15,96		6.5	4.4	15
2.12.1874	06h	48,7	17,5		6		20
18.3.1876	03h	49,1	20,4		6		23
17.7.1876	12h15m	48	15,17	6	7.5	5.1	15
1.12.1876		47,51	15,45		6	4	18
28.12.1877		47,1	14,4		6	4	17
31.12.1878	5h30m	47,8	19,9		6		31
11.1.1879		46,5	14,6		6	4	17
13.12.1879	18h30m	49,06	10,18		6		A
14.11.1880		47,4	11,3		6	4	13
5.11.1881		46,9	13,5		6	4.2	17
23.1.1882		47,5	10,55		6	4	13, A
31.1.1883	13h43m	50,5	15,9	6	6.5		5
27.3.1883	13h28m	48,1	20,8		6		G
30.4.1885	23h15m	47,51	15,45	8	8	5.4	18
26.8.1885		47,51	15,45		6	4	26

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
22.9.1885	02h45m	47,68	15,94		6.5	4.2	18
28.11.1886		47,3	10,8		7.5	5.2	13
12.4.1888	05h30m	47,78	16,54		7	4.6	18
12.4.1888	19h20m	47,78	16,54		6.5	4.3	18
28.1.1890	8h11m	48,76	19,4	7	6	4.1	22
25.11.1890	09h56m	48,34	17,11	10	6	4.5	20
28.11.1890	01h37m	48,25	17,04	12	7	4.5	20
24.3.1893	17h35m	48,6	17,8	4	6	4	20
11.6.1895	08h27m	50,7	16,9	8	7	4.9	5
16.5.1896	20h50m	50,5	12,1		6	4	2
20.2.1897		47,3	11,4		6		13
24.10.1897		50,3	12,5		6.5		2
25.10.1897	20h	50,3	12,4		5	6	2
29.10.1897	19h45m	50,35	12,48	5	6.5	4	2
3.11.1897		50,3	12,5		6.5		2
7.11.1897	03h58m	50,35	12,48	6	6.5		2
7.11.1897	04h45m	50,3	12,5		6	4	2
7.11.1897	04h58m	50,35	12,48		6.5	4.2	2
17.11.1897	05h30m	50,22	12,32	9	6		2
17.11.1897	06h45m	50,2	12,3	5	6		2
29.4.1899		47,3	15		6		18
5.8.1899		46,6	14,6		6.5	4.2	17
10.1.1901	02h30m	50,5	16,1	5	7.5		5
21.10.1901	01h20m	49,45	20,4		6.5	4.5	23
19.6.1902	09h23m	46,9	11,3		6		13
26.11.1902	12h15m	49,7	12,8,2016	5	6.5		7
21.2.1903,	21h09m06s	50,3	12,2	5	6.5	4.3	2
25.2.1903	23h11m 58s	50,27	12,33	8	6	4	2
5.3.1903	20h37m06s	50,37	12,42	6	7	4.5	2
5.3.1903	20h55m32s	50,37	12,42		6.5	4.5	2
6.3.1903	04h57m29s	50,34	12,47	7	7	4.3	2
7.3.1903	05h01m	50,3	12,6	8	6		2
27.4.1903	16h08m04s	50,27	12,29		6	4	2
26.6.1903	04h28m	47,9	20,38	3	6.5	4.5	31
12.2.1904	04h	46,45	17,98		6	4.2	33

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
20.4.1904	14h03m15s	48,62	17,46		6.5	4.5	20
9.6.1904	17h30m	46	13,5		6		17
12.10.1904	03h	48,68	17,39		6	4.3	20
2.2.1905	22h55m	47,15	14,4		6		17
24.2.1905	05h25m	47,3	11,7		6		13
9.1.1906	23h07m	48,58	17,46	10	8.5	5.7	20
16.1.1906	02h52m	48,62	17,56	8	7.5	5.1	20
15.4.1906	23h20m	48,6	17,6		6		20
19.4.1906	23h55m	48,6	17,6		6		20
15.6.1906	01h45m	48,6	17,6		6		20
12.8.1906		47,45	19,7		6	4.1	30
22.3.1907	19h10m	47,6	14,5	9	6	4.2	15
13.5.1907	04h23m	47,51	15,45		6.5	4.4	18
19.2.1908	21h11m	47,94	16,74	7	6.75	4.8	18
15.3.1908	17h38m	47,38	19,53		6	4.3	30
21.10.1908	14h04m23s	50,3	12,3	5	6		2
21.10.1908	20h39m48s	50,28	12,29	5	6	4.3	2
3.11.1908	13h25m02s	50,3	12,31	9	6		2
3.11.1908	17h21m42s	50,34	12,47	10	6.5	4.7	2
4.11.1908	03h33m09s	50,36	12,49	3	6.5	4.3	2
4.11.1908	10h55m	50,34	12,3	9	6.5		2
4.11.1908	13h10m	50,34	12,3	10	6.5		2
4.11.1908	20h41m57s	50,28	12,37	9	6.5		2
6.11.1908	04h36m11s	50,4	12,4	7	6.5	4.5	2
24.3.1910	14h37m	47,2	14,3		6.5	4.2	17
11.5.1910	20h18m	47,74	15,99	5	6.5	4.5	18
13.7.1910	08h32m	47,3	10,9	5	7.5	4.8	13
24.4.1911	17h19m	47,2	10,3		6		13
16.11.1911	21h30m	48,3	9	10	9.25	5.4	6, A
22.1.1912	20h08m	47,3	15,3		6		18
19.9.1912	21h	46,2	16,9			4.2	29
18.4.1914	05h15m	48,32	17,22	9	7.5	5.1	20
13.5.1914	19h07m	47,37	19,53	6	6.5	4	30
27.6.1914	01h44m50s	51,36	12,43		6	4.3	3
30.8.1914	11h22m	47,3	9,65		6		13, A
31.8.1914	13h26m	47,3	11,5		6.5		13

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
1.10.1914	20h31m	48,9	11,4	16	6		6
25.11.1914	16h12m	47,3	18,2	6	6		29
31.1.1915	07h05m	47,9	20,4		7		31
2.6.1915	02h33m	48,9	11,4	20	6.5		6
10.10.1915	03h50m	48,8	11,6	12	7		6
6.1.1916	03h45m	47,4	16,8		6		27
1.5.1916	10h24m	47,2	14,65	8	7	4.7	17
26.9.1918	0h16m	47,18	10,18		6		13
22.2.1919	14h	46,97	16,46		6	4.2	27
22.12.1920	22h14m	47,61	15,99		6	4.1	18
24.10.1921	02h06m	47,5	12,6		6.5		14
28.11.1923	06h07m	47,1	13,8		6	4.8	17
26.3.1924	17h08m	46,9	11,4		6		13
31.1.1925	07h05m	47,86	20,42	5	8.5	5	31
27.6.1925	08h15m	46,47	17		6.5	4.5	29
28.1.1926	16h57m	50,88	11,76		6		5
6.7.1926	07h39m	47,61	15,67		6.5	4.4	18
28.9.1926	15h41m	47,72	16,04	7	6.75	4.7	18
4.3.1927	06h22m37s	47,2	18,13	2	7	4	29
8.6.1927	06h09m37s	47,2	18,13	2	7	4	29
25.7.1927	20h35m	47,53	15,49	8	7.5	5.1	18
8.10.1927	19h49m	48,07	16,58	11	8	5.2	18
27.3.1928	02h33m	46,4	13	7	8.5		16
2.9.1929	05h52m	46,4	14,3		6		17
5.3.1930	23h55m44s	48,58	17,62	6	7.5	5	20
6.3.1930	05h13m	48,55	17,63	7	6.5	4.6	20
14.5.1930	00h01m	46,6	12,4		6		16
18.5.1930	04h14m	47,5	13,4		6	4.1	14
22.8.1930	05h49m	47,98	19,43	8	6.5	4.2	31
7.10.1930	23h27m	47,35	10,7	6	7.5	5.3	13
12.4.1931	21h25m	49,9	17,9	7	6.5	4	19
21.4.1931	14h22m	47,2	18,13		6	4	29
24.7.1933		46,6	16,7		6	4	29
8.11.1933	00h51m	47,35	10,7o		6.5	4.6	13
26.4.1934	16h55m30s	47,72	18,7		6	4.1	28
31.8.1934	23h29m30s	46,79	16,93	10	6.5	4.7	29

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska [km]	Intenzita v epicentru I_0 °[MSK-64]	Magni- tudo M	Poznámka Ohnisková oblast
		°N	°E				
4.9.1934	01h26m	47,4	11,8		6.5	4.7	13
23.3.1935	22h46m	49,45	19,85		6	4.3	
27.6.1935	17h19m	48	9,5	20	7.5		6, A
3.10.1936	15h48m	47,1	14,7		7.5	5.1	17
8.11.1938	03h11m35s	47,95	16,4	9	7	5	18
18.9.1939	00h14m37s	47,8	15,91	9	7	5	18
12.4.1942	00h01m	46,3	13,8		6		17
14.5.1942	08h28m	47,25	17,73	4	6	4	29
30.9.1942	02h30m	47,45	19,6	7	6	4.2	30
21.12.1947	09h43m	49,23	18,76		6	4.4	21
24.10.1950	11h48m	47	14,7		6	4.1	17
20.2.1951	00h14m12s	47,97	19,13	5	7	5.1	31
7.6.1951	04h07m	47,3	11		6		13
22.2.1953	20h15m47s	50,92	10		7.5	5.2	A
2.5.1953	12h37m	48,08	16,75		6	4.1	C
13.9.1953	08h01m50,9s	47,03	17,17	7	6.5	4.2	29
22.5.1955	04h58m	47,3	11,4,2016		7	4.6	13
12.1.1956	05h46m08s	47,35	19,9,2016	6	8	5.6	30
31.3.1956	14h07m	46,98	17	10	6.5	4.2	29
4.12.1956	06h21m47s	46,8	16,2		6	4.2	27
14.12.1956	00h12m11,7s	47,92	20,27		6	4.5	31
13.1.1958	07h36m	47,61	15,67		6	4.4	18
8.7.1958	5h02m	50,82	10,11		7	4.7	A
30.9.1958	08h45m	47,2	10,6		6.5	4.5	13
13.11.1958	07h36m	47,6	15,7		6		18
17.2.1959	01h54m	48,45	15,56		6	4	10
29.6.1961	11h52m49s	50,82	10,11		6	4	A
4.10.1961	12h21m	47,6	12,7		6		14
29.11.1962	04h57m34s	47,48	11,06		6		13
2.12.1963	06h46m09s	47,85	16,37	7	6.5	4.5	18
27.10.1964	19h46m09,1m	47,63	15,81	7	7	5.3	18
30.12.1964	03h10m08s	48,33	17,13	7	6	4.2	20
8.7.1965	23h20m	47,3	11,4		6		13
29.1.1967	00h12m11,7s	47,9	14,3	7	7	4.6	15
3.12.1967	22h10m53,4s	48,57	17,39	6	6.5	4.3	20

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska	Intenzita v epicentru	Magni- tudo	Poznámka
		°N	°E	[km]	I_0 °[MSK-64]	M	Ohnisková oblast
9.2.1969	23h08m27s	47,45	18,1	12	6	4.3	29
1.6.1969	23h21m	47	14,2		6	4.4	17
10.5.1970	01h49m	47,2	9,6		6		13
5.1.1972	04h57m41,3s	47,8	16,2	6	6.25	4.1	18
16.4.1972	10h00m04,8s	47,75	16,2	7	8	5.3	18
16.4.1972	11h04m46,6s	47,71	16,18	6	6.5	4.3	18
17.6.1972	09h03m	48,35	14,5		7		9
12.6.1973	21h02m56,7s	47,54	15,51		6.25	4.1	18
12.12.1973	00h03m	47,05	14,1		6	4.5	17
23.6.1975	13h17m36s	50,48	10		7.5		A
6.5.1976	20h00m09s	46,3	13,1	6	10	6.5	17
24.8.1976	23h23m	48,57	17,36		5.5	4	20
11.9.1976	16h34m57,2s	46,3	13,2	10	7		17
15.9.1976	03h15m17s	46,3	13,2	7	8.5		17
15.9.1976	09h21m16s	46,3	13,2	5	9.5		17
15.9.1976	11h11m07,7s	46,4	13,2		6		17
26.12.1976	09h	47,3	9,6		6		13
19.8.1978	18h43m	48,8	19,2		6	4	22
3.9.1978	05h03m31,8s	48,29	8,94	10	8.5	5.4	6
26.9.1978	16h47m34s	47,26	19,05		6	4.3	30
18.4.1979	15h19m19s	46,3	13,3	11	7		17
12.5.1979	21h34m	47,3	15,2		6		18
31.1.1981	12h49m	47,1	14,7		6		17
15.6.1981	10h17m	47	14,7		6.5		17
14.4.1983	14h52m14,14s	47,67	15,14	10	6.5	4.4	18
15.4.1984	10h57m53s	47,65	15,85	7	6.5	4.9	18
24.5.1984	19h56m08,5s	47,68	15,84	10	6	4.6	18
15.8.1985	04h28m46,9s	47,06	18,01	10	6.5	4.7	29
15.8.1985	05h29m17,9s	47,04	18,01		6	4	29
15.8.1985	10h53m17s	47,14	18,05		6	4	29
6.12.1985	05h00m28,8s	50,22	12,37	6	6		2
14.12.1985	05h38m01,8s	50,2	12,29	5	6.5		2
20.12.1985	16h36m27,4s	50,16	12,48	9	6		2
21.12.1985	10h16m19,8s	50,14	12,19	11	7		2
23.12.1985	03h24m46,6s	50,24	12,56	9	6		2
23.12.1985	04h27m07,5s	50,26	12,42	9	6.5		2

Pokračování z předchozí strany - tabulka 18

Datum	Čas [GMT]	Souřadnice ohniska		Hloubka ohniska	Intenzita v epicentru	Magni- tudo	Poznámka
		°N	°E	[km]	I_0 °[MSK-64]	M	Ohnisková oblast
24.12.1985	00h04m17,6s	50,26	12,34	8	6		2
20.1.1986	23h38m27,8s	50,27	12,42	12	6.5		2
23.1.1986	02h21m59,6s	50,09	12,55	9	6		2, 7
27.1.1988		47	17		6	4.3	29
28.4.1988	21h22m26s	48,92	18,36	5	6	4.1	E
11.2.1989	02h46m11,5s	47,94	17,02		6	4.1	E
7.6.1989	00h18m18,4s	48,72	19,29		6	4.1	22
15.11.1989	02h54m33s	48,75	19,36		6	4	22
2.5.1991	10h15m19,1s	47,91	16,42		6	4.3	18
18.9.1995	08h26m10,5s	47,87	18,83		6	4.2	28
9.1.1996	01h07m22,7s	47,96	16,49		6	4.3	18

Příloha 2

Tabulka 19: Hodnoty seismického ohrožení v lokalitě ETE od jednotlivých ohniskových oblastí; označení * vyjadřuje, že nejkratší vzdálenost ohnisková oblast - lokalita je výrazně větší než vzdálenost pro uvedený útlum

Č.	Ohnisková oblast	Maximální intenzita v oblasti [°MSK-64]	Nejkratší vzdálenost ohnisk. oblast - lokalita [km]	Útlum intenzity se vzdáleností [°MSK-64]	Očekávaná Intenzita zemětřesení v lokalitě ETE [°MSK-64]
1	Thüringer – Wald Gera	8	220	3	5
2	Kraslice – Aš – Plauen	7,5	150	3	4,5
3	Komořany – Leipzig	8	150	3	5
4	Zittau – Bautzen (Horní Lausicz)	4,5	175	4	0,5
5	Trutnov – Klodsko – Strzelin - - Šumperk	7,5	180	5	2,5
6	Regensburg – Augsburg	8	115	2	6
7	Domažlice – Tachov	7	70	5	2
8	Šumava – Grafenau – Thalberg	6	50	3	3
9	Kaplice – Freistadt	5,5	25	2	3,5
10	Waidhofen – Jindřichův Hradec	5	65	3	2
11	Jihlava a okolí	5	65	3	2
12	Vysoké Mýto – Litomyšl - - Svitavy	5,5	120	4	1,5
13	Innsbruck a okolí	9	225	3	6
14	Salzach – St, Martin	7,5	155	2,5	5
15	Linz – Pregarten – Molln - - Neulengbach	9	135	3,5	5,5
16	Bolzano – Lienz	7	200	4,5	2,5
17	Friuli	11	200	4,5	6,5
18	Východní Alpy	9,5	175	3	6,5

Pokračování na další straně

Pokračování z předchozí strany - tabulka 19

Č.	Ohnisková oblast	Maximální intenzita v oblasti [°MSK-64]	Nejkratší vzdálenost ohnisk. oblast - lokalita [km]	Útlum intenzity se vzdáleností [°MSK-64]	Očekávaná Intenzita zemětřesení v lokalitě ETE [°MSK-64]
19	Český Těšín – Opava	7,5	250	2*	*
20	Malé a Biele Karpaty	8,5	215	3*	*
21	Trenčín – Žilina	7,5	265	3*	*
22	Martin – Prievidza – Banská - Bystrica – Dolní Kubín	5,5	350	4*	*
23	Kežmarok – Zakopané - - Krakow	7,5	370	2,5*	*
26	Graz – Maribor – Oberschützen – Sopron – – Kapuvár	5,5	235	3*	*
27	Körmand – Győr	8,5	265	4*	*
28	okolí Komárna	9	300	4*	*
30	Budapest – Monór - - Jászbereny	8,5	390	3*	*
31	Mátra a okolí	8,5	370	3*	*
33	Kaposvár - Dunaföldvár	7,5	370	3*	*

Seznam publikací

Příspěvky publikované na konferencích a seminářích

1. Demjančuková, K., Pečínka, L., Švrček, M. Aplikace metody Simulation Based Reliability Analysis (SBRA) na postup „Únik před roztržením“. In Požární ochrana 2011. Ostrava: SPBI Ostrava, 2012. s. 39-41. ISBN: 978-80-7385-102-6, ISSN: 1803-1803.
2. Demjančuková, K. Influence of Large LOCA by Seismic Event. Konference ENYGF (European Nuclear Young Generation Forum), Praha, 2011.
3. Demjančuková, K. Redefinition of Large Loss of Coolant Accident (LOCA) in Context of Seismic Event. Konference NUTECH 2011, Krakow, 2011.
4. Demjančuková, K. Seismic Hazard Assessment - Methodology and Application Example to the City of Plzeň. Seismic Engineering Knowledge Transfer Seminar, ÚJV Řež, Řež u Prahy, 2011.
5. Sadílková, M., Demjančuková, K. Methods of Re-evaluation of Nuclear Safety of Nuclear Power Plants. Konference ENYGF (European Nuclear Young Generation Forum), Praha, 2011.
6. Demjančuková, K. Risk Management, Risk Engineering and Nuclear safety. Konference NUSIM 2011, Plzeň, 2012.
7. Demjančuková, K. Metody stanovení seismického ohrožení při výběru lokality pro technologická zařízení. In Ochrana obyvatelstva 2012. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2012. s. 32-34. ISBN: 978-80-7385-109-5 , ISSN: 1803-7372.

8. Procházková, D., Demjančuková, K. Seismic Hazard Assessment for Selected Real Locality in Central Europe - Critical Points of Assessment. In Transactions. Brussels: European Nuclear Society, 2012. s. 60-64. ISBN: 978-92-95064-15-7.
9. Demjančuková, K. Return Period and Annual Exceedance Probability in Seismic Hazard Assessment of a Real Locality for Technological Equipment. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 1241-1245. ISBN: 978-80-214-4514-7.
10. Demjančuková, K. Critical Points of Seismic Hazard Assessment for Selected Locality for Technological Facilities. In ES 2012 Energetické stroje a zařízení, termomechanika a mechanika tekutin. Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. s. 1-9. ISBN: 978-80-261-0113-0.
11. Demjančuková, K. Srovnání výsledku pravděpodobnostního a deterministického hodnocení seismického ohrožení v západočeské metropoli. In Požární ochrana 2012. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2012. s. 35-37. ISBN: 978-80-7385-115-6 , ISSN: 1803-1803.
12. Demjančuková, K. Probabilistic and Deterministic Approach of Seismic Hazard Assessment – Comparison and Discussion of Results. In ENC2012 Transactions. Brussels: European Nuclear Society, 2012. s. 20-26. ISBN: 978-92-95064-14-0.
13. Demjančuková, K., Procházková, D. Comparison of seismic hazard values calculated according to selected standards. In Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon. London: Taylor & Francis, 2014. s. 3267-3272. ISBN: 978-1-138-00123-7.
14. Demjančuková, K. Hodnocení bezpečnosti jaderných elektráren metodou PSA pro případ zemětřesení. In Ochrana obyvatelstva - DEKONTAM 2013. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2013. s. 25-27. ISBN: 978-80-7385-122-4 , ISSN: 1803-7372.
15. Demjančuková, K. Impact of Seismic Event on Rupture Probability of Circumferentially Cracked Large-Diameter Piping. In Engineering Mechanics (EM) 2013. Prague: Institute of Thermomechanics AS CR, 2013. s. 27-28. ISBN: 978-80-87012-47-5.

16. Demjančuková, K. Probability of Large Diameter Piping Rupture in Context of Seismic Event. In ES 2013. Energetické stroje a zařízení, termomechanika a mechanika tekutin. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. s. 1-4. ISBN: 978-80-261-0230-4.
17. Demjančuková, K. Earthquake Load Effects on NPP Primary Circuit Pipelines. Konference 2nd International Conference of CENEN-NET. Praha, 2013.
18. Demjančuková, K. Stanovení seismického ohrožení lokality v zemích s nízkou intenzitou seismicity. In Sborník příspěvků z konference Ochrana obyvatelstva 2014. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2014. s. 17-19. ISBN: 978-80-7385-142-2 , ISSN: 1803-7372.
19. Demjančuková, K. Extreme external events identification and screening for NPPs. In ES 2014. Energetické stroje a zařízení, termomechanika a mechanika tekutin. Plzeň: 2014. ISBN:978-80-261-0348-6.

Knihy a články v časopisech

20. Procházková, D., Demjančuková, K. Earthquakes, Hazards and Principles for Trade-off with Risks. 1. vyd. Plzeň : University of West Bohemia, 2012, 215 s. ISBN: 978-80-261-0170-3.
21. Demjančuková, K. Seismické ohrožení města Plzně - přístupy a porovnání výsledků. SPEKTRUM, 2013, roč. 13, c. 1, s. 25-27. ISSN: 1211-6920.
22. Demjančuková, K. Methodology and Problems of Seismic Hazard Assessment in Regions with Low Seismic Activity. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava; Rada bezpečnostního inženýrství, 2014, roč. IX, c. 1, s. 31-35. ISSN: 1801-1764.
23. Procházková, D., Demjančuková, K. Seismic Hazard Assessment for Selected Real Locality in Central Europe – Critical Points of Assessment. Journal of Energy and Power Engineering, 2014, roč. 9, c. 8, s. 1642-1646. ISSN: 1934-8975.