

## **CERTIFIKOVANÁ METODIKA**

Název metodiky: Metodika pro řešení odezvy stavebních konstrukcí budovy reaktoru bloků VVER 1000 na zatížení parní explozí v šachtě reaktoru

Řešitelé: ÚJV Řež, a. s. (Ing. Jan Malý)  
Červenka Consulting s.r.o. (Ing. Jan Červenka Ph.D.)  
ČVUT Praha, Stavební fakulta (Prof. Ing. Zdeněk Bittnar DrSc)

Vypracováno v rámci programu: TAČR – TH02020843 – Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON  
Podprogram 2 – Energetika a materiály

Revize: 00

Účinnost metodiky: Od 2020

Oponenti: Prof. Ing. Juraj Králik Ph.D. (STU Bratislava)  
Ing. Tomáš Kordina (SÚJB)

**T A**

**Č R**

## Obsah

1	Cíl metodiky .....	4
2	Srovnání novosti postupů .....	4
3	Popis uplatnění certifikované metodiky .....	4
3.1	Analýza problematiky TH .....	5
4	Možnosti řešení zmírnění následků těžké havárie .....	6
4.1	Strategie IVR .....	7
4.2	Strategie ExVC .....	7
5	Získání vstupních dat pro numerické materiálové modely .....	9
6	Vlastní popis metodiky .....	9
6.1	Konstrukce kontejnmentu a základové desky kontejnmentu .....	10
6.1.1	Shromáždění dostupných podkladů .....	11
6.1.2	Stanovení vhodných materiálových modelů .....	11
6.1.3	Volba vhodných výpočetních programů .....	19
6.1.4	Validace numerických modelů .....	20
6.1.5	Modelování konstrukcí .....	20
6.1.6	Zatížení konstrukcí .....	24
6.1.7	Stanovení vhodných výpočetních metod .....	27
6.1.8	Výpočet .....	28
6.1.9	Vyhodnocení výsledků .....	28
6.1.10	Posouzení integrity kontejnmentu .....	31
6.2	Konstrukce vnitřních vestaveb kontejnmentu a šachty reaktoru .....	34
6.2.1	Shromáždění dostupných podkladů .....	34
6.2.2	Stanovení vhodných materiálových modelů .....	34
6.2.3	Volba vhodných výpočetních programů .....	40
6.2.4	Validace numerických modelů .....	40
6.2.5	Modelování konstrukcí .....	40
6.2.6	Zatížení konstrukcí .....	43
6.2.7	Stanovení vhodných výpočetních metod .....	45
6.2.8	Výpočet .....	46

**T A**

**Č R**

6.2.9	Vyhodnocení výsledků.....	46
6.2.10	Stanovení, zda může dojít k porušení integrity vestaveb kontejnmentu a šachty reaktoru	47
6.3	Konstrukce ocelových hermetizačních dveří.....	48
6.3.1	Shromáždění dostupných podkladů.....	48
6.3.2	Stanovení vhodných materiálových modelů.....	49
6.3.3	Volba vhodných výpočetních programů.....	50
6.3.4	Ověření modelů na jednoduchých výpočtech.....	50
6.3.5	Modelování konstrukcí a procesů.....	50
6.3.6	Zatížení konstrukcí.....	52
6.3.7	Stanovení vhodných výpočetních metod.....	53
6.3.8	Vyhodnocení výsledků.....	54
6.3.9	Stanovení, zda může dojít k porušení integrity ochranné obálky.....	59
7	Vyhodnocení nejistot vstupů.....	61
8	Závěr.....	61
9	Seznam použité literatury.....	62
10	Seznam publikací předcházejících této metodice.....	63
11	Seznam obrázků.....	64
12	Seznam tabulek.....	65
13	Seznam zkratk.....	66
14	Seznam příloh.....	67

T A

Č R

## 1 Cíl metodiky

Cílem metodiky je určit postup výpočtu pro stanovení odezvy železobetonových a předpjatých konstrukcí bloků VVER 1000 na extrémní dynamická zatížení vznikající při parní explozi uvnitř šachty reaktoru (ŠR). Příprava technických opatření pro zvládnutí těžkých havárií (TH) spojených s tavením aktivní zóny (AZ) reaktoru u existujících jaderných bloků je mimořádně náročný úkol. Cílem je vybrat vhodné modely pro výpočetní simulace chování extrémně zatížených betonových konstrukcí uvnitř kontejnmentu i konstrukce kontejnmentu a provedení referenčních výpočtů odezvy na dané účinky. Výsledky projektu budou sloužit pro provedení detailních analýz konstrukcí a výběr optimálního technického řešení pro zvládnutí TH.

## 2 Srovnání novosti postupů

Z hlediska stavebních konstrukcí jde o inovativní přístup posouzení DEC (Design Extension Conditions). Chování stavebních konstrukcí již nelze popsat pomocí lineárních mechanických modelů. Metodika vychází z nejnovějších poznatků o nelineárním chování stavebních materiálů pod účinkem extrémních zatížení. Metodika popisuje postup pro tři oblasti:

- Globální chování obálky kontejnmentu, jakožto poslední ochranné bariéry.
- Chování konstrukcí vnitřních vestaveb kontejnmentu a ŠR.
- Únosnost konstrukce ocelových hermetizačních dveří a posouzení účinku jejich porušení.

Zatížení tlakovou vlnou v oblasti ŠR vychází z dostupných fyzikálních experimentů. Tato zatížení jsou aplikována na konstrukce vestaveb, ŠR a hermetizačních dveří. Při poruše uchycení hermetizačních dveří dojde k jejich pohybu. Metodika uvádí postup stanovení energie, kterou musí přenést železobetonová stěna. Současně je uveden postup, jak stanovit zbylou pohybovou energii pro případ, že by odolnost železobetonové stěny nebyla dostačující.

Pro skutečné zatížení obálky kontejnmentu nejsou k dispozici fyzikální experimenty, proto metodika dává návod, jak stanovit mezní únosnost obálky kontejnmentu, kdy je vnitřní přetlak postupně zvyšován až do porušení konstrukce.

## 3 Popis uplatnění certifikované metodiky

Vyhlášené cíle v oblasti podpory bezpečnosti jaderných zařízení jsou specifické z hlediska možnosti uplatnění výsledků projektu na trhu. Tvůrcem cílů je SÚJB a jediným provozovatelem jaderných zařízení typu VVER 1000 v ČR je ČEZ, a.s. Jedná se o naplnění národního akčního plánu SÚJB na posílení jaderné bezpečnosti jaderných zařízení v České republice. Řízení TH nebylo dosud v plném rozsahu řešeno v oblasti odezvy stavebních konstrukcí na extrémní

dynamická zatížení, ČEZ, a.s. vyjádřil předběžný zájem o výsledky tohoto projektu. Uplatnění se předpokládá přímo v konzultační a projektové činnosti hlavního řešitele ÚJV Řež. V případě průmyslových partnerů dojde k významnému navýšení znalostí v oblasti modelování účinků TH na železobetonové konstrukce, které budou využity při budoucí konzultační činnosti v České republice i v zahraničí.

### 3.1 Analýza problematiky TH

V reakci na havárii jaderné elektrárny (JE) Fukushima a po následných evropských Stress Testech vznikl tzv. Národní akční plán na zvýšení jaderné bezpečnosti v ČR. Tento plán předpokládá realizaci řady opatření pro zvládnutí TH na elektrárnách Dukovany a Temelín. TH je definována jako havárie, která může vést k tavení AZ reaktoru.

Přestože je velmi vysoká a intenzivní pozornost věnována prevenci rozvoje havarijních událostí do TH, nelze její vznik úplně vyloučit, a proto v souladu se zdokonaleným principem ochrany do hloubky je nutno alespoň prakticky vyloučit velké časné úniky a následky pozdních úniků snížit na minimální dosažitelnou hodnotu, což je plně v souladu s požadavky ochrany obyvatelstva a okolí JE. Mluvíme-li o termínech „velké časné úniky“ resp. „pozdní úniky“ je nutné tyto termíny definovat, tj. popsat za jakých podmínek k těmto únikům může dojít, resp. čím mohou být způsobeny a jakými prostředky je možné tyto procesy eliminovat.

#### Velké časné úniky

- Protavení dna kontejnmentu přes kanály ionizační komory
- Selhání hermetických průchodek nebo transportního uzávěru ve dně kontejnmentu průnikem taveniny
- Detonace vodíku

#### Pozdní úniky

- Protavení dna kontejnmentu.

Rozvoj havarijní události do oblasti TH nelze absolutně vyloučit, a proto je nutné se řešením TH zabývat pro jednotlivé JE na základě jejich specifických podmínek daných jedinečností jejich projektového řešení. Protože v případě existujících bloků rozvoj do TH nebyl součástí projektových východisek, je nutné při hledání řešení vycházet z omezení daných existujícím designem a možnostmi jeho úprav.

Obecně TH může vzniknout jak v AZ reaktoru (s rozvojem vedoucím k formování taveniny v AZ, relokací do dna tlakové nádoby reaktoru (TNR), porušením dna vedoucím k vypuzení taveniny do ŠR a zde začínající interakcí taveniny s betonem vedoucí až k protavení základové desky – to vše v případě neovlivněného rozvoje TH), tak v bazénu s vyhořelým palivem (BSVP) (s rozvojem vedoucím k degradaci paliva, formování taveniny s napadením dna BSVP, jeho

protavením vypadnutím taveniny na základovou desku kontejnmentu a napadení této základové desky a jejímu protavení – opět v případě neovlivněného rozvoje TH). V případě JE Temelín je vzhledem k umístění BSVP vhodné (a dá se říci i nutné) se problematikou stabilizace taveniny zabývat ve vzájemných souvislostech s rozvojem TH v AZ, a to nikoliv z pohledu řešení současné iniciace a rozvoje havárie v AZ i v BSVP, ale hledáním řešení společného pro oba případy. Jedním z klíčových ukazatelů je časový faktor jednotlivých variant.

#### TH v AZ reaktoru

- K selhání TNR a přemístění taveniny na dno ŠR může dojít v závislosti na typu havarijní sekvence v nejnepríznivějším případě již za cca 3 hod od vzniku iniciační události (IU).

#### TH v BSVP

- Při TH v BSVP způsobené náhlou ztrátou chladiva z BSVP může v nejnepríznivějším případě (vyvezení celé AZ 4 dny po odstavení reaktoru) dojít k zahájení porušování dna BSVP za cca 2,5 hod a k protavení dna BSVP (do kontejnmentu) za 15 hod.

Výše uvedené časy, ve kterých může být tavenina z AZ nebo z BSVP na dně kontejnmentu, a s uvážením možnosti následného selhání hermetických průchodek nebo transportního uzávěru ve dně kontejnmentu v důsledku působení taveniny by TH iniciovaná jak v AZ, tak v BSVP, mohly způsobit velké časné úniky.

## **4 Možnosti řešení zmírnění následků těžké havárie**

Zásadní otázkou pro zvládnutí TH, kdy dochází k tavení AZ je, jakým způsobem zajistit přerušení rozvoje TH a stabilizovat taveninu. Pro tuto oblast existují dva základní přístupy, které jsou již aplikovány nebo se k aplikaci chystají na řadě JE.

Bude-li přistoupeno pojmenování chronologicky podle časování rozvoje havarijní nehody, pak prvním způsobem je zadržení taveniny ještě uvnitř TNR – tato strategie je nazývána zkratkou IVR z anglického In-Vessel Retention (což je zkratka z delšího názvu In-Vessel Retention with External Reactor Vessel Cooling). Tato strategie je založena na zajištění odvodu tepla z TNR jejím chlazením vodou v zaplavené ŠR. Úspěšnost realizace této strategie závisí na správném načasování nutných kroků, kterými jsou odtlačování primárního okruhu (IO) a včasné zaplavení TNR v ŠR.

Druhá strategie je založena na chlazení taveniny až po porušení dna TNR, kdy pro nové bloky jsou navrhovány tzv. lapače taveniny (Core Catcher). Tavenina se nechá řízeně vytéct na co možná největší předem vymezenou plochu, k chlazení pak dochází zaplavením taveniny vodou. Tato druhá strategie bývá souhrnně označována zkratkou ExVC z anglického termínu Ex-Vessel Coolability.

## 4.1 Strategie IVR

Strategie IVR je jednou z možností zvládnutí TH tlakovodních reaktorů, kdy dochází k tavení AZ. Tato strategie je založena na zajištění odvodu tepla z TNR chlazením v zaplavené ŠR. Úspěšnost realizace této strategie závisí na správném načasování nutných kroků, kterými jsou:

- Odtlakování IO
- Včasné zaplavení TNR v ŠR

Návrh zajištění dodávky vody do ŠR pro strategii IVR pro JE Temelín vychází z předpokladu dvou způsobů – pasivního rychlého zaplavení ŠR a dlouhodobé dodávky pomocí aktivního systému.

## 4.2 Strategie ExVC

Šíření (roztékání) taveniny je z hlediska své fyzikální a fyzikálně-chemické podstaty velmi složitý a komplexní proces, který v sobě zahrnuje řadu parciálních jevů a událostí:

Jedná se o proudění vícefázové směsi kapalin, plynů a tuhých látek. V tavenině se vyskytují těžké kysličníky jako je  $UO_2$ , kysličníky kovů jako jsou  $ZrO_2$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $Cr_2O_3$ , dále lehké kysličníky jako jsou například  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ , které jsou produktem rozkladu betonu, kovy ( $Fe$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ ) a plyny produkované při rozkladu betonu. V roztékající se tavenině se vyskytují tuhé částice a plynové bubliny. V průběhu roztékání se chemické složení taveniny mění jednak interakcí s podložkou jednak chemickými reakcemi přímo v tavenině. Proudění je obecně řízené silami gravitace, setrvačnosti a viskozitou. Dochází k interakci taveniny s podložkou, což vede k již zmíněným změnám chemického složení taveniny a k tepelným ztrátám do podložky. Rovněž dochází k produkci plynů ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ) probublávajících taveninou. To způsobuje promíchávání směsi a zvyšuje přenos tepla z taveniny do betonu případně do chladicí vody.

V roztékající se tavenině dochází k řadě chemických reakcí například k oxidačním reakcím kovů v tavenině, rozkladu vody atd. Chemické reakce většinou produkují teplo, což ovlivní tepelnou bilanci a teplotu taveniny. Může dojít ke stratifikaci ve vrstvě taveniny, fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti taveniny se v průběhu jejího roztékání mění vlivem změny složení a teploty. Pokud je roztékající se tavenina chlazená vodou, část tepla je předávána do vody. Při roztékání taveniny pod vrstvou vody je délka rozlivu výrazně kratší. V průběhu šíření taveniny dochází k zamrznání čelní fronty šíření taveniny a následnému šíření taveniny přes zamrzlou vrstvu. Na tavenině i na podložce se může tvořit krusta. Konečné zastavení rozlivu taveniny může být způsobeno povrchovým napětím, pokud má tavenina dostatečně vysokou teplotu. Ve většině případů však dojde k zastavení rozlivu vychlazením a zamrznutím taveniny.

Roztékání (šíření) taveniny je proces řízený hydrodynamickým chováním proudu roztaveného materiálu, které je funkcí zejména rychlosti lití (vylévání) taveniny na podložku, povrchovým napětím a viskozitou taveniny a procesem jejího tuhnutí. Povrchové napětí a viskozita taveniny jsou obecně závislé na složení a termodynamickém stavu (teplota, tlak) taveniny. Proces solidifikace je řízen tepelnými ztrátami z taveniny do okolí. Ztráty do okolí jsou dány jednak radiací z horního povrchu (v případě, že tavenina není chlazená vodou) jednak konvekcí, vedením a ablací podložky na spodním povrchu.

T A

Č R

Pokud tavenina vtéká do silné vrstvy vody, je účelné rozlišovat dva případy: vtok taveniny do vrstvy vody ze strany či vtok (pád) roztaveného materiálu do vody z výšky. Rozlišení těchto dvou případů je zásadní z hlediska způsobu interakce roztaveného materiálu s vodou, tj. z hlediska možného parního výbuchu.

V prvním případě, kdy tavenina vtéká do vodní vrstvy ze strany, může sice dojít k intenzivní interakci taveniny s vodou a významné produkci páry, ale pravděpodobnost parního výbuchu je vcelku malá. Příčinou je ta skutečnost, že v tomto případě nedochází k rozptýlu částic taveniny ve vodě a vytvoření rozsáhlé zóny „premixingu“, což je první fáze parního výbuchu. Vzhledem k tomu, že těžší tekutina-tavenina je pod vrstvou vody, dochází k pronikání vody do taveniny a taveniny do vody pouze v omezené vrstvě na rozhraní obou tekutin, takže vytvoření rozsáhlé oblasti „premixingu“ je málo pravděpodobné. S tímto v současné době převládajícím názorem nesouhlasí výsledky některých experimentů řady PULiMS, kde byly pozorovány parní výbuchy i při stratifikovaném uspořádání vrstev taveniny a vody.

Naopak v druhém případě dochází při vtoku či pádu taveniny shora do vrstvy vody k fragmentaci proudu roztaveného materiálu do velkého množství makročástic taveniny o velikosti přibližně 1 cm, které se rozptýlí do většího objemu vody. Tím dojde k vytvoření relativně rozsáhlé oblasti „premixingu“. Pokud dojde ke spuštění intenzivní interakce tavenina-voda (triggering) nějakým tlakovým impulsem (otřes, náraz, lokální intenzivní interakce taveniny s vodou), u některých makročástic taveniny dojde ke ztrátě parního filmu na povrchu částice taveniny a částice se rozpadne na řadu menších částic o rozměru řádově 1 mm a menších. Tyto mikročástice nejsou obaleny ochrannou parní blánou, a proto dochází k jejich prudké interakci s vodou. Plocha přímého kontaktu mikročástic taveniny s vodou je nejméně o dva řády vyšší než u makročástic, a proto je produkce páry velmi intenzivní. Tento proces se v zóně „premixingu“ velmi rychle šíří všemi směry, což odpovídá třetí fázi parního výbuchu-expansi. Tím vznikla oblast vysokého tlaku, která svými mechanickými účinky může poškodit struktury a zařízení kontejnmentu. Celý tento proces se vyvíjí velmi rychle v časovém měřítku tisícín vteřiny. Jaká část tepelné energie taveniny se přemění na mechanickou práci, která může způsobit destrukci kontejnmentu a dalších zařízení, závisí na konkrétních podmínkách, v uskutečněných experimentech byl podíl tepelné energie přeměněné na mechanickou práci v rozsahu setin procenta až několika procent.

V případě reálné TH na reaktoru VVER-1000 instalovaného na JE Temelín má rozliv taveniny obě dvě shora popsané formy (fáze). V první fázi po poškození dna reaktorové nádoby se trosky AZ převážně ve formě roztaveného materiálu přemísťují (vytékají) do ŠR. Pokud je v šachtě silná vrstva vody, parní exploze je reálná. Více než 180 tun taveniny shora vniká do několika desítek kubických metrů vody, tudíž je reálný vznik rozsáhlé zóny (oblasti) „premixingu“. Z této oblasti se mohou vyvinout další fáze parního výbuchu. Pokud nedojde k parnímu výbuchu, tavenina se ze ŠR roztéká do dalších prostor pod vodní hladinou. Je zřejmé, že maximální délka rozlivu roztaveného materiálu bude v této situaci výrazně kratší než v případě „suché“ varianty, kdy v záhytovém prostoru pro taveninu není voda nebo jenom menší množství. Potom je reálné, že postup taveniny se zastaví ještě před tím, než je zaplněn celý záhytný prostor. Z výše uvedeného vyplývá, že zaplavení záhytového prostoru (případně celé dolní části kontejnmentu) vodou ještě před porušením nádoby reaktoru nemusí být nejlepším řešením pro dlouhodobou lokalizaci a chlazení roztavené AZ mimo nádobu reaktoru. Na základě



současných znalostí se jeví jako optimální řešení zalití taveniny vodou okamžitě po jejím roztečení do celého záchytového prostoru.

## 5 Získání vstupních dat pro numerické materiálové modely

Jako vstupní data pro použité materiálové modely mohou sloužit podklady získané z rešerší dostupných podkladů, výsledky provedených zkoušek použitých materiálů, případně výsledky nedestruktivních zkoušek provedených přímo na konstrukci. Destruktivní zkoušky mohou být provedeny na vzorcích přímo odebraných z konstrukcí, případně na vzorcích uschovaných z výstavby.

Rozsah a zaměření zkoušek je určen požadovanými vstupními parametry použitých materiálových numerických modelů. Všechny zkoušky je třeba provádět ve shodě s platnými normami a předpisy, především:

- ČSN EN 12390 - Zkoušení ztvrdlého betonu, část 1 až 14,
- ČSN EN 12504 - Zkoušení betonu v konstrukcích, část 1 až 4,
- ČSN EN 13791 - Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích,
- ČSN EN ISO 15630 - Ocel pro výztuž a předpínání do betonu - Zkušební metody, část 1 až 4,
- ČSN EN ISO 377 - Ocel a ocelové výrobky - Umístění a příprava zkušebních vzorků a zkušebních těles pro mechanické zkoušení

Případná bližší specifikace předpisů se řídí dle požadavků zadavatele. Zkoušky mohou provádět pouze akreditované zkušebny a laboratoře.

## 6 Vlastní popis metodiky

Vzhledem k povaze celé úlohy, se jako nejvhodnější jeví postup rozdělení výpočtu na tři části, jsou to:

- Konstrukce kontejnmentu a základové desky kontejnmentu
- Konstrukce vnitřních vestaveb kontejnmentu a ŠR
- Konstrukce ocelových hermetizačních dveří

Jako první je řešena konstrukce kontejnmentu a jeho základové desky při TH. U této konstrukce je třeba posoudit odolnost, na v průběhu TH, zvyšující se teplotu a tlak uvnitř budovy kontejnmentu. Dále je řešena konstrukce ŠR a na ní navazující vestavby uvnitř kontejnmentu. Tyto konstrukce jsou zatíženy zvyšující se teplotou a následným výbuchem páry, který vyvolá tlakovou vlnu. Jako poslední je řešena konstrukce hermetizačních dveří. Tato konstrukce je zatížena tlakovou vlnou vznikající při výbuchu páry v ŠR a je třeba posoudit, zda dveře odolají

nárazu tlakové vlny, nebo dojde k jejich uvolnění a pohybu, případně nárazu do některé z okolních konstrukcí.

Tyto části jsou dále v metodice řešeny nezávisle na sobě, jako samostatné úlohy. Tento postup byl zvolen z důvodu rozdílnosti jednotlivých úloh (u kontejnmentu je řešena odolnost vůči narůstající teplotě/tlaku, u ŠR odolnost vůči tlakové vlně a u hermetizačních dveří odolnost vůči tlakové vlně/pohyb dveří, případně jejich náraz na překážku) a tedy možnosti volby optimálního způsobu výpočtu pro každou z řešených částí.

Vhodný postup modelování, zatížení a posouzení každé dílčí části konstrukce je popsán v samostatné kapitole, tak aby bylo co nejpřesněji vystiženo chování konstrukce při zatížení parní explozí. V přílohách metodiky jsou zdokumentovány referenční analýzy provedené pro každou dílčí část konstrukce, jsou jimi:

- Příloha č. 1 - Analýza odezvy kontejnmentu na extrémní zatížení v programu ATENA.
- Příloha č. 2 - Dynamická analýza na zatížení parní explozí uvnitř ŠR.
- Příloha č. 3 - Účinek parní exploze v ŠR na hermetické dveře.

## 6.1 Konstrukce kontejnmentu a základové desky kontejnmentu

V této kapitole je podrobně popsána metodika posouzení konstrukce kontejnmentu při TH. Tento typ havárie je podrobně popsán v kapitole 3. Kontejnment ruského typu VVER 1000 je tvořen skořepinou z předpjatého betonu, která je na vnitřní straně vybavena ocelovou vystýlkou, která zajišťuje těsnost kontejnmentu proti úniku radioaktivního materiálu. Konstrukce kontejnmentu je válcovitého tvaru se zastřešující kopulí. Vnitřní průměr obálky je 45 m, výška 38 m a tloušťka stěn 1,2 m. V této hermetické zóně se nachází IO JE. Hlavní technologické místnosti jsou ŠR, boxy parogenerátorů a bazény pro výměny vyhořelého paliva. Pod kopulí je osazen polární jeřáb o nosnosti 400 tun.

Hermetická zóna je na své spodní části ukončena hermetickým stropem na úrovni +13,20 m. Základovou část konstrukce tvoří základová deska a tři samostatné podlaží do kóty +10,80 m. Tato část je rozdělena na volnou a kontrolovanou zónu.

Ochranná obálka má dva hlavní otvory, které jsou zajištěny pomocí hermetických uzávěrů. Jedná se o hlavní a havarijní vstup. Při posuzování kontejnmentu musí být zohledněn vliv těchto otvorů na celkové chování kontejnmentu. Stěnou kontejnmentu také prochází řada prostupů pro potrubí, které jsou nezbytné pro spolehlivé fungování celé JE. Tyto prostupy jsou malých rozměrů a mají zanedbatelný vliv na chování konstrukce, proto je není nutno zohlednit při výpočtu celkového chování konstrukce.

Při posouzení je nutno rozlišit, pokud se jedná o stávající konstrukci či novou konstrukci. Při posouzení stávající konstrukce má být obecně vycházeno z norem platných v době uvedení konstrukce do provozu. V případě nové konstrukce musí být zohledněny v současnosti platné evropské normy včetně českých národních dodatků. V této metodice jsou zejména podrobně specifikovány postupy posouzení, které jsou nad rámec požadavků stanovených normami.

Pro názornost kapitola popisuje metodiku globálního posouzení konstrukce kontejnmentu s využitím pokročilých nelineárních výpočtů v simulačním softwaru ATENA [8]. Uvedenou

metodikou posouzení konstrukce nelineárním výpočtem je možné využít i pro jiné výpočtové programy, které využívají metody a modely založené na stejných nebo obdobných principech nelineární výpočtové mechaniky, metody konečných prvků (MKP) a lomové mechaniky. Tato kapitola popisuje metodiku vytvoření numerického modelu, ověření validity modelu, definici materiálových parametrů, volbu vhodné numerické metody, definice historie zatěžování pro posouzení globální odezvy konstrukce, zpracování a vyhodnocení odezvy konstrukce a posouzení integrity kontejnmentu. Uvedená doporučení pro modelování vychází z provedených referenčních analýz konstrukce kontejnmentu JE Temelín. Tyto analýzy jsou podrobně popsány v příloze č. 1 - Analýza odezvy kontejnmentu na extrémní zatížení v programu ATENA.

### 6.1.1 Shromáždění dostupných podkladů

Pro vytvoření vhodného numerického modelu pro posouzení konstrukce kontejnmentu jsou potřebné následující podklady:

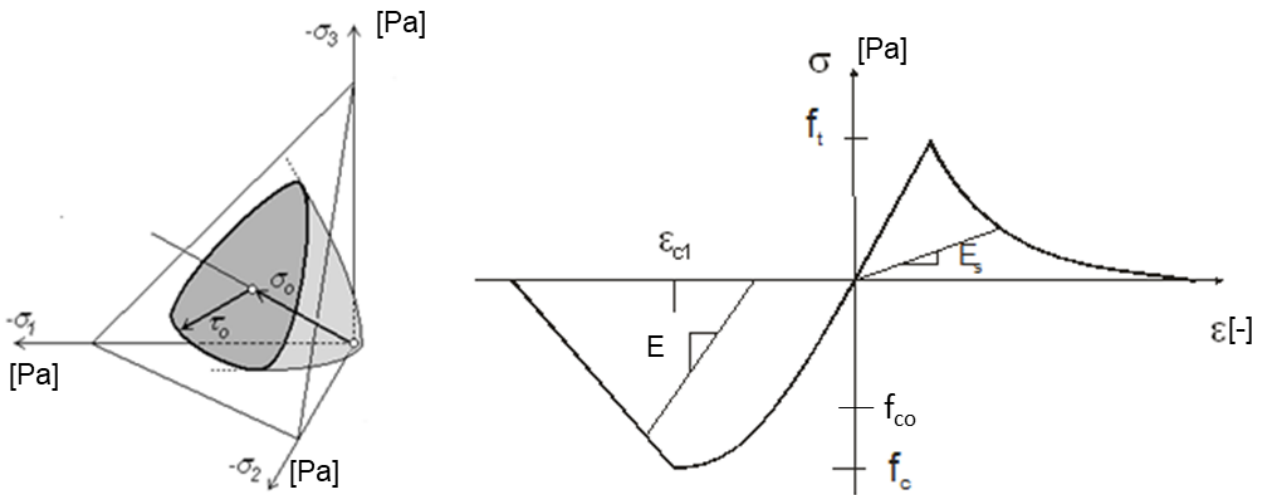
- Výkresová dokumentace – půdorys suterénu, řezy, rozmístění předpínacích kanálků, výkresy výztuže,
- Údaje o předpínací síle
- Výsledky laboratorních zkoušek materiálu případně jejich návrhové vlastnosti a klasifikace
- Zatížení, havarijní zatížení – návrhový tlak a teplota při TH
- Normy:
  - Eurokódy
    - ČSN EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí
    - ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí
    - ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí
    - ČSN EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí
  - fib model code 2010
  - ČSN 73 1201, ČSN 73 1401
  - ASME Sekce III, Div. 2, Div. 2

### 6.1.2 Stanovení vhodných materiálových modelů

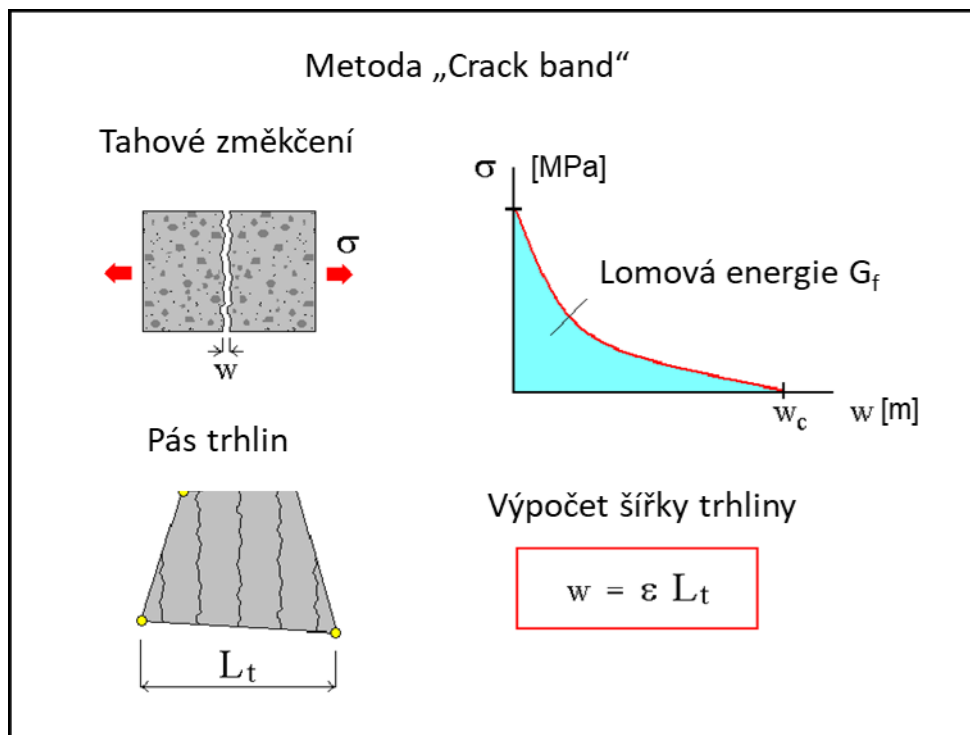
Při výpočtu realistické odezvy železobetonových konstrukcí při extrémních zatěžovacích stavech je doporučeno zohlednit nelineární chování výztužných prvků a betonu. Beton je kvazi-křehký materiál, kdy tlakové porušení lze popsat teorií plasticity a vznik a vývoj trhlin by měl být založen na teorii lomové mechaniky. V případě programu ATENA je vhodné pro posouzení betonových stěn kontejnmentu použít materiálový model „Cementitious 2“ [9], který kombinuje konstitutivní modely pro chování materiálu v tahu (lomové) a v tlaku (plastické). Model byl vyvinut autory programu ATENA a je označován jako „Fracture-plastic constitutive model“ [9].

Obrázek 1 zobrazuje kritérium pro tlakové porušení betonu a výsledný jednoosý pracovní diagram. Chování betonu v tlaku je v případě materiálového modelu „Cementitous 2“ modelováno s využitím speciální teorie plasticity s neasociovaným zákonem tečení. Základním materiálovým parametrem pro modelování tlakového poškození je jednoosá pevnost v tlaku (krychelná či válcová). Celková odezva konstrukce (např. zatěžovací diagram) je rovněž ovlivněna počáteční hodnotou modulu pružnosti, případně dalšími parametry nelineárního modelu materiálu.

Tahové chování betonu je v modelu „Cementitous 2“ modelováno prostřednictvím nelineární lomové mechaniky v kombinaci s metodou šířky pásu trhlin [2] a modelem rozetřených trhlin (Obrázek 2). Skutečná diskretní trhlinka je simulována oblastí (pásem) lokalizovaných poměrných přetvoření. Poměrné přetvoření reprezentující trhlinku je přitom úměrné velikosti konečného prvku. Funkce změkčení se tedy v této formulaci vypočte samostatně pro každý prvek, přičemž základní vztah pro otevření trhliny (CMOD) zůstane zachován. Tento přístup je vzhledem ke své energetické formulaci objektivní, a vliv sítě konečných prvků na porušení materiálu i konstrukce je zanedbatelný. Hlavními parametry pro správné modelování tahového porušování, vznik a rozvoj trhlin, a tahové změkčení materiálu porušeného trhlinami jsou pevnost v tahu a lomová energie. Základní tvar funkce (křivky) pro otevírání trhliny a současný pokles napětí je dán exponenciálním zákonem podle [13], viz Obrázek 2.



**Obrázek 1: Kritérium pro tlakové porušení betonu v trojosé napjatosti a jednoosý pracovní diagram,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  značí hlavní napětí,  $\sigma_0, \tau_0$  označují hydrostatické a oktaedrické smykové napětí,  $E_s$  je sečnový modul pružnosti, ostatní veličiny viz Tabulka 1**



**Obrázek 2: Model rozetřených trhlin pro tahové chování betonu**

Pro plné nastavení materiálového modelu „Cementitious 2“ je možné definovat celkem 19 vstupních parametrů. V programu ATENA však pro základní nastavení postačuje pouze tlaková pevnost a ostatní parametry jsou dle vztahů v Tabulka 1 automaticky vygenerovány. Tyto vztahy vychází z fib Model code 2010 [12] a jsou platné pouze pokud je tlaková pevnost větší než 12 MPa.

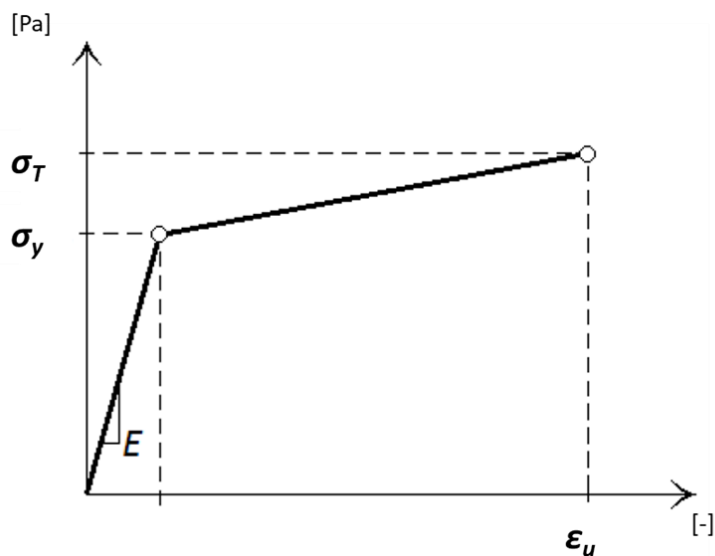
**Tabulka 1: Parametry materiálového modelu pro beton (Cementitious 2)**

Parametr	Popis	Hodnoty parametrů pro VVER 1000
<b>Obecné vlastnosti</b>		
$f_c$ [MPa]	Pevnost v tlaku Hodnotu je možné generovat ze vztahů: Krychelná pevnost → zadaná hodnota * 0,85 Válcová pevnost → zadaná hodnota	-30
$E$ [MPa]	Modul pružnosti	33550

	Hodnotu je možné určit ze vztahu: $21500 \cdot 1 \cdot ((f_c + 8)/10)^{1/3}$	
$\nu$ [-]	Poissonova číslo Doporučená hodnota pro běžný beton: 0,2	0,2
$f_t$ [MPa]	Pevnost v tahu Hodnotu je možné určit dle [12] výrazu: $F_c < 50 \text{ MPa} \rightarrow 0,3 \cdot F_{ck}^{2/3}$ $F_c > 50 \text{ MPa} \rightarrow 2,12 \cdot \ln(1+0,1(F_{ck}+8))$	2,03
$\rho$ [MN/m <sup>3</sup> ]	Objemová tíha materiálu Typická hodnota pro železobeton: 0,025	0,025
$\alpha$ [1/°C]	Koeficient teplotní roztažnosti Typická hodnota pro beton: 0,000012	0,000012
<b>Vlastnosti v tahu</b>		
$G_f$ [MN/m]	Specifická lomová energie Hodnotu možno generovat dle ze vztahu*: $0,000025 \cdot F_t$ *tento vztah je určen podle VOS 1983 [27]	0,00005
$c_f$ [-]	Rotování trhlin Tento parametr umožňuje volit plynulý přechod mezi modelem „fixovaných“ a „rotovaných“ trhlin. 1 – „fixed crack model“, 0 – „rotated crack model“. Doporučená hodnota: 1	1
$c_s$ [m]	Maximální vzdálenost trhlin Nulová hodnota předpokládá, že šířka trhlinového pásu „crack band“ odpovídá velikosti konečného prvku ve směru kolmo na trhlinu (viz. [9]). Pro kontejnment VVER se doporučuje definovat jako typickou vzdálenost výztužných prutů	0,2
<b>Vlastnosti v tlaku</b>		
$\varepsilon_{cp}$ [-]	Plastické přetvoření při dosažení jedno-osé tlakové pevnosti Defaultní hodnota je generována ze vztahu: $-\frac{f_c}{E}$	-0,0012244
$w_d$ [m]	Kritická tlaková deformace při tlakovém změkčení Defaultní hodnota: -0,0005	-0,0005
$f_{c0}$ [MPa]	Hodnota tlakového napětí, kdy lineární odezva materiálu přechází v nelineární model zpevnění. Hodnotu lze generovat vztahem: $-2,1 \cdot f_t$	-4,2

$f_{c,red}$ [-]	Mez redukce tlakové pevnosti vlivem trhlin. Mezní redukce tlakové pevnosti při rozvoji trhlin	0,8
<b>Ostatní parametry</b>		
$\beta$ [-]	Určuje směr plastického toku – popisuje změny objemu materiálu v průběhu drcení ( $\beta > 0$ materiál se rozpíná, $\beta < 0$ materiál se stlačuje, $\beta = 0$ objem materiálu se nemění)	0
$e$ [-]	Excentricita definující tvar plochy porušení Doporučená hodnota pro běžný beton: 0,52	0,52
$s_F$ [-]	Smykový faktor – poměr mezi smykovou tuhostí a normálovou tuhostí při rozvoji trhlin. Doporučená hodnota: 20	20
$a_g$ [m]	Maximální velikost kameniva v beton	0,02
$u_f$ [-]	Faktor residuálního otevření trhliny: 0 – představuje odlehčení do počátku, tj. nulová hodnota residuálního otevření trhliny; 1 – residuální otevření trhliny představuje 100 % maximálního dosaženého otevření	0

Pro popis chování **ocelové a předpínací výztuže** se doporučuje použít multi-lineární pracovní diagram (Obrázek 3). Vlastnosti výztužných prvků jsou v modelu definované podle Tabulka 2 a Tabulka 3. U předpínací výztuže lze definovat soudržnost výztuže a tím program umožňuje postihnout možný pokluz mezi výztuží a betonem.



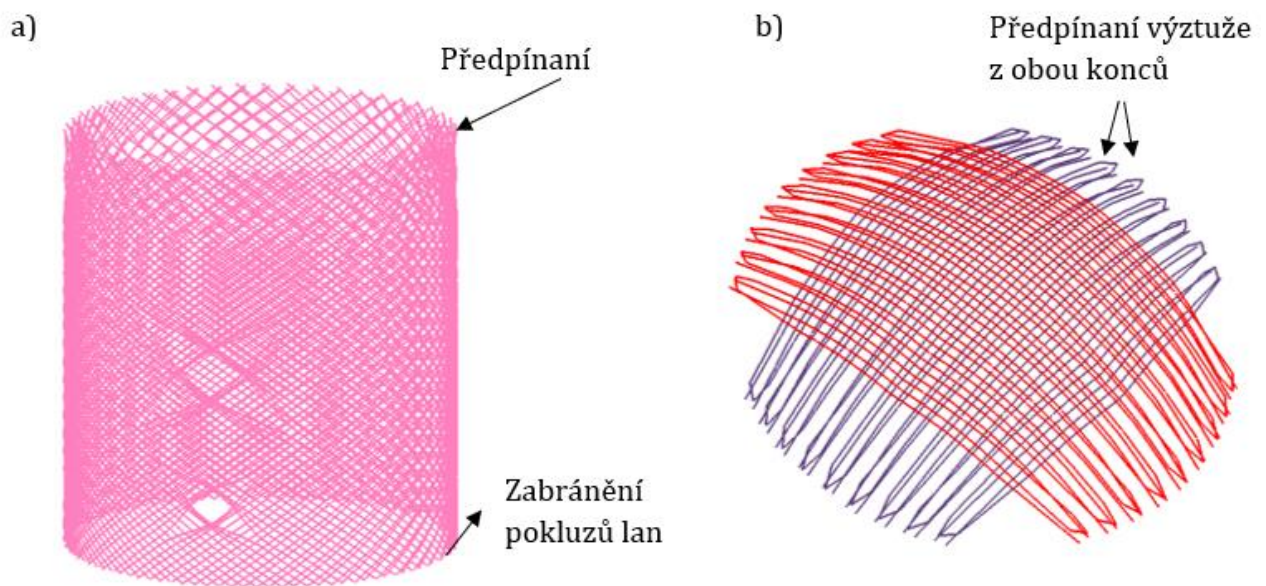
**Obrázek 3: Multi-lineární pracovní diagram výztuže**

**Tabulka 2: Materiálové parametry předpínací výztuže**

Parametr	Popis	Hodnoty parametrů pro VVER 1000
$E$ [MPa]	Modul pružnosti	200 000
$\nu$ [-]	Poissonovo číslo	0,3
$\sigma_Y$ [MPa]	Mez kluzu	1620
$\varepsilon_u$ [-]	Mezní přetvoření	0,04
$\sigma_T$ [MPa]	Pevnost v tahu	1800
$A_p$ [m <sup>2</sup> ]	Plocha výztuže	0,00883
$\rho$ [MN/m <sup>3</sup> ]	Objemová tíha materiálu	0,0785
$\alpha$ [1/°C]	Koeficient teplotní roztažnosti	0,000012
<b>Model soudržnosti výztuže</b>		
<i>Aktivní kotva</i>	Určuje, na kterém konci předpínacího lana se nachází aktivní kotva, tj. kotva, kde probíhá předpínání.	V případě modelu viz Obrázek 4 se aktivní kotva pro lana ve stěnách kontejnmentu nachází na horním konci a lana v kopuli na obou koncích.
$c$ [MPa]	Koheze, tj. pevnost v soudržnosti. V kontejnmentu typu VVER 1000 nejsou předpínací lana zainjektovány.	0,0
$o_p$ [m]	Obvod výztuže	0,17
$\mu$ [-/m]	Koeficient tření v zakřiveném kabelu, v softwaru ATENA zadán na jednotku obvodu	0,05
$k$ [-/m]	Koeficient tření vlivem výrobních nepřesností v přímém vedení kabelu	0,0001



\*V kontejnmentu typu VVER 1000 jsou všechna předpínací lana kotvena ve věnci (římse) a jsou napínána z obou stran. U předpínacích lan ve stěně kontejnmentu lze v dolní části na konci lan uvažovat ostrý deviátor, který zabraňuje výrazným pokluzům. Pro toto nastavení musí být při modelování lan správně definovaná orientace tyčových prvků. Pokud je orientace všech lan nastavena s počátkem v horním věnci kontejnmentu, lze v nastavení použít fixed END (viz Obrázek 4 a Tabulka 2). Lana ve střešní kopuli mohou být modelována pomocí celé smyčky a předpínání je uvažováno z obou konců lan.

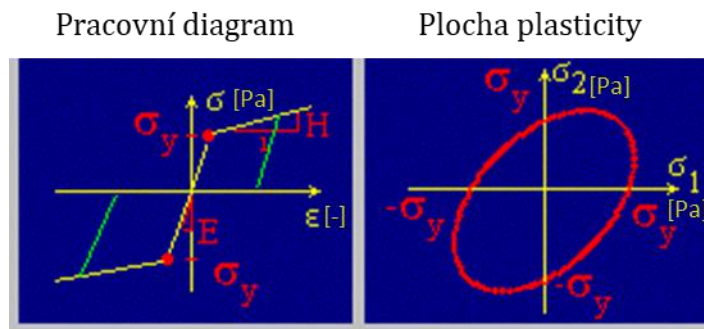


**Obrázek 4: Modelování předpínacích lan, a) předpínací lana ve stěně, b) předpínací lana ve střeše**

Tabulka 3: Materiálové parametry betonářské výztuže

Parametr	Popis	Hodnoty parametrů pro VVER 1000
$E$ [MPa]	Modul pružnosti	210 000
$\nu$ [-]	Poissonovo číslo	0,3
$\sigma_Y$ [MPa]	Mez kluzu	445
$\varepsilon_u$ [-]	Mezní přetvoření	0,05
$\sigma_T$ [MPa]	Pevnost v tahu	490
$A_s$ [m <sup>2</sup> ]	Plocha výztuže	dle výkresové dokumentace
$\rho$ [MN/m <sup>3</sup> ]	Objemová tíha materiálu	0,0785
$\alpha$ [1/°C]	Koeficient teplotní roztažnosti	0,000012

V případě **ocelové vystýlky** je doporučeno použít elasto-plastický model s Von Mises podmínkou plasticity [16]. Vlastnosti ocelové vystýlky jsou v modelu definované pomocí parametrů uvedených v Tabulka 4.



Obrázek 5: Pracovní diagram a plocha plasticity dle Von Mises [16]

Tabulka 4: Materiálové parametry ocelové vystýlky

Parametr	Popis	Hodnoty parametrů pro VVER 1000
$E$ [MPa]	Modul pružnosti	200 000
$\nu$ [-]	Poissonovo číslo	0,3
$\sigma_Y$ [MPa]	Mez kluzu	360
$H$ [MPa]	Modul zpevnění	747
$\rho$ [MN/m <sup>3</sup> ]	Objemová tíha materiálu	0,0785
$\alpha$ [1/K]	Koeficient teplotní roztažnosti	0,000012

Základová deska či suterénní budova, která podpírá konstrukci kontejnmentu lze modelovat pomocí pružného materiálu s modulem pružnosti odpovídající dané třídě betonu (Obrázek 6).

Pro teplotní analýzu je vhodné použít materiálový model, který umožňuje zadat naměřené teplotní parametry materiálu a je vhodný pro kombinovanou (coupled) teplotní analýzu. Program ATENA [8] nabízí model CCTransportMaterial, který má integrovanou základní knihovnu teplotních vlastností materiálů pro beton, ocel a zdivo.

### 6.1.3 Volba vhodných výpočetních programů

Pro výpočet odezvy kontejnmentu až do fáze celkového kolapsu konstrukce je nutné uvážit nelineární chování materiálu i možnost vývoje velkých posunů a deformací. Vhodný výpočetní program proto musí využívat pokročilé materiálové modely pro beton a ocel, které umožňují simulovat realistické chování, odezvu a poškození modelované konstrukce. Program by také měl nabízet kombinovanou analýzu, které umožní sdružení teplotní a statické analýzy. Při teplotní analýze bude určeno proudění tepla v konstrukci v závislosti na čase a tím bude stanoveno nucené přetvoření konstrukce, které bude následně uvažováno ve statické analýze. Pro řešení teplotní analýzy program musí nabízet řešení pomocí nestacionárního vedení tepla.

Jedním vhodným programem je program ATENA. Program ATENA byl vytvořen společností Červenka Consulting na základě dlouhodobých zkušeností autorů z modelování kvazi-křehkých materiálů. Tento program se specializuje na analýzu především betonových a železobetonových konstrukcí. Pomocí programu je možné simulovat reálné chování konstrukcí včetně jejich porušování a následného kolapsu. Program mimo jiné také nabízí výpočet dotvarování a smršťování, teplotní analýzu a proudění vlhkosti.

Pro posouzení mohou být použity i další obdobné programy např. DIANA FEA, ABAQUS, ANSYS využívající obdobné materiálové modely založené na teorii lomové mechaniky, mechaniky poškození a plasticity.

#### 6.1.4 Validace numerických modelů

Při nelineární simulaci je zásadní důkladná validace a ověření numerických modelů. Validaci numerických modelů pro popis chování materiálů (beton, výztuž, ocel) je nutné provést na několika úrovních porovnáním s experimentálními výsledky:

- Ověření chování numerického modelu materiálu při základních materiálových zkouškách v jednoosém tlaku a tahu a při víceosém tlakovém chování. Příklady doporučených testů jsou uvedeny např. v publikaci [9].
- Ověření chování numerických materiálových modelů na zkouškách jednoduchých konstrukčních prvků: nosník v ohybu, nosník ve smyku, smyková stěna. Příklady doporučených testů jsou např. uvedeny v publikacích [3],[4],[5],[9],[10],[11].
- Další vhodný způsob ověření lze provést s využitím existujících zkoušek zmenšených modelů kontejnmentů nebo částí konstrukcí jaderných zařízení, které byly v minulosti provedeny viz. např. [3] a [14].

Po vytvoření numerického modelu vlastní konstrukce kontejnmentu je důležité vždy provést studii senzitivity, ve které je ověřen vliv vstupních parametrů modelu. Vhodné je ověřit především následující vlivy:

- Velikost sítě konečných prvků a typu použitého konečného prvku, např. lineární nebo kvadratické prvky, skořepinové prvky pro stěny kontejnmentu a ocelové vystýlky.
- Okrajových podmínek
- Počet vrstev ve skořepinovém prvku

#### 6.1.5 Modelování konstrukcí

Model kontejnmentu je výhodné tvořit kombinací různých typů prvků, jak je znázorněno viz Obrázek 6. Tento obrázek ukazuje jednotlivé části numerického modelu, který byl použit pro analýzu JE Temelín (viz příloha č. 1). Doporučený postup pro vytvoření modelu kontejnmentu je následující:

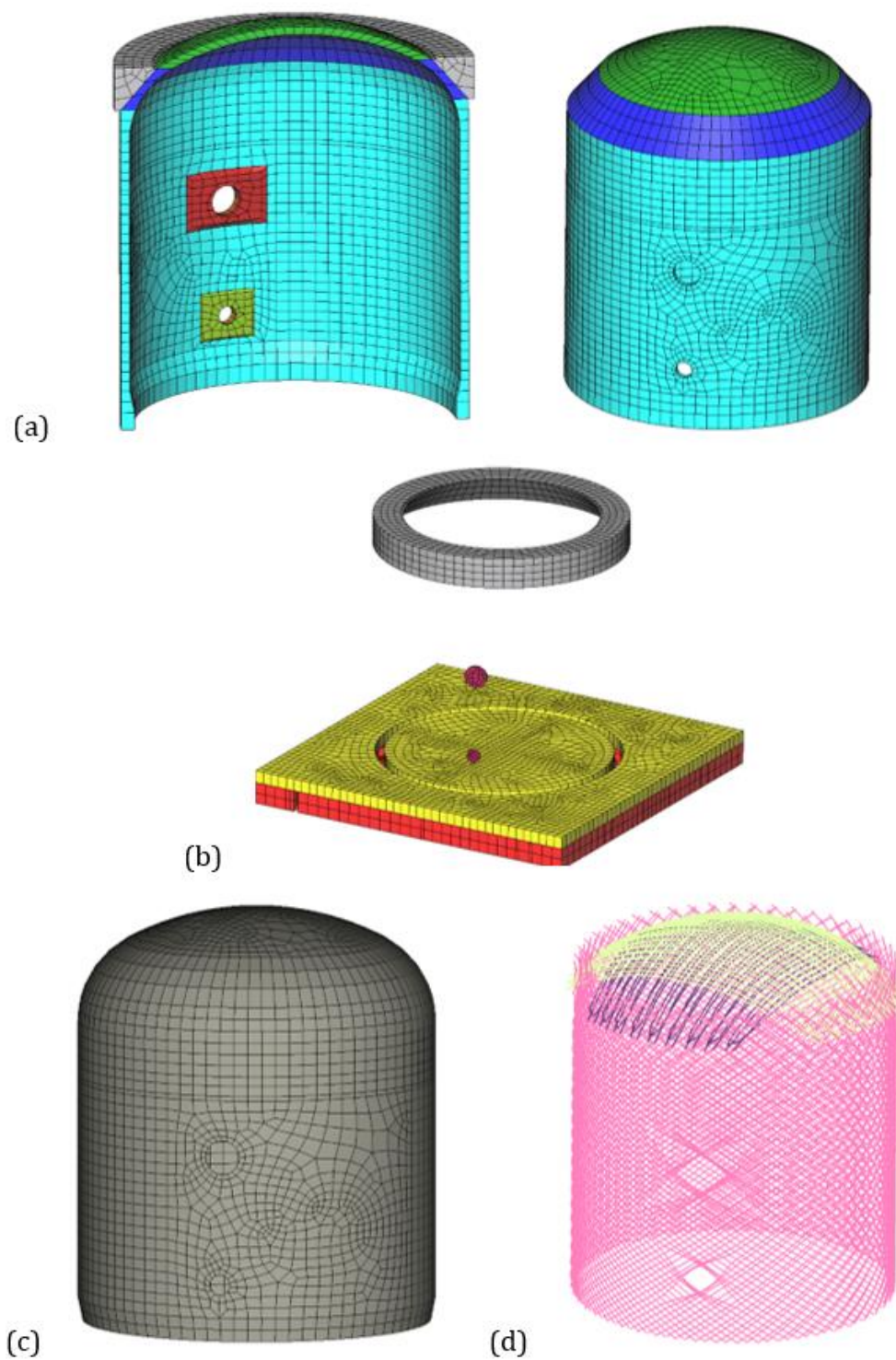
- Konstrukce stěny a střešní kopule kontejnmentu je vhodné modelovat skořepinovými prvky typu hexahedron s kvadratickou aproximací.
- Zesílení okolo otvorů modelovat skořepinovými prvky typu hexahedron s kvadratickou aproximací.
- Věnci modelovat pomocí objemových prvků typu hexahedron s kvadratickou aproximací.
- Předpínací výztuž je vhodné modelovat diskretním modelem výztuže pomocí jednorozměrných tyčových prvků.
- Normální „betonářskou“ výztuž je vhodné modelovat jako rozptýlenou v jednotlivých vrstvách skořepinového prvku nebo jako kompozitní materiál v případě objemových prvků.
- Ocelovou vystýlku je doporučeno modelovat jako dvourozměrnou plochu kopírující kontejnment na vnitřní straně. Z důvodu zajištění kompatibility je doporučeno,

**T A**

**Č R**

aby model ocelové vystýlky tvořily konečné prvky se stejnou úrovní aproximace posunutí jako prvky použité na stěnu kontejnmentu.

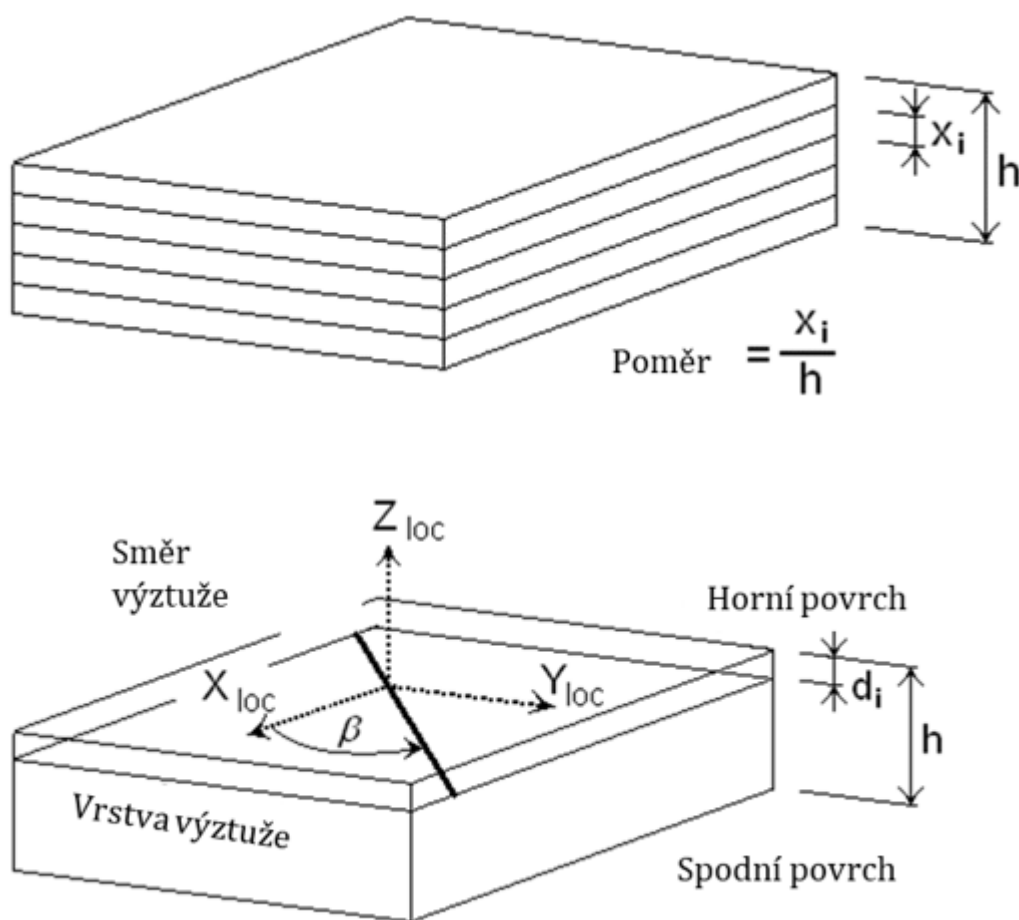
- Základovou část lze modelovat pomocí objemových prvků s kvadratickou aproximací, což umožní správně postihnout tuhost základové konstrukce s využitím menšího počtu konečných prvků.



**Obrázek 6: Numerický model kontejnmentu tvoří: a) skořepinové prvky pro stěnu, střešní kopuli a zesílení okolo otvorů, b) 3D objemové prvky pro suterén, věnec a výplně otvorů, c) 2D membránové prvky pro ocelovou vystýlku d) model předpínacích kabelů z tyčových prvků**

# T A Č R

Skořepinový prvek je interně rozdělen do několika vrstev, aby bylo možné simulovat jakýkoliv nelineární děj po tloušťce skořepinového prvku, viz Obrázek 7. Pro model kontejnmentu je doporučeno použít u skořepinového prvku nejméně 4 vrstvy. Prvky tohoto typu umožňují definovat speciální vrstvy pro modelování měkké výztuže. Je možné zadat libovolné množství výztužných vrstev s různými orientacemi výztuží. Skořepinové prvky umožňují definovat lokální souřadný systém, který je vhodné zvolit tak, aby jeden lokální směr vyjadřoval obvodové napětí a deformaci a druhý směr vertikální napětí a deformaci.

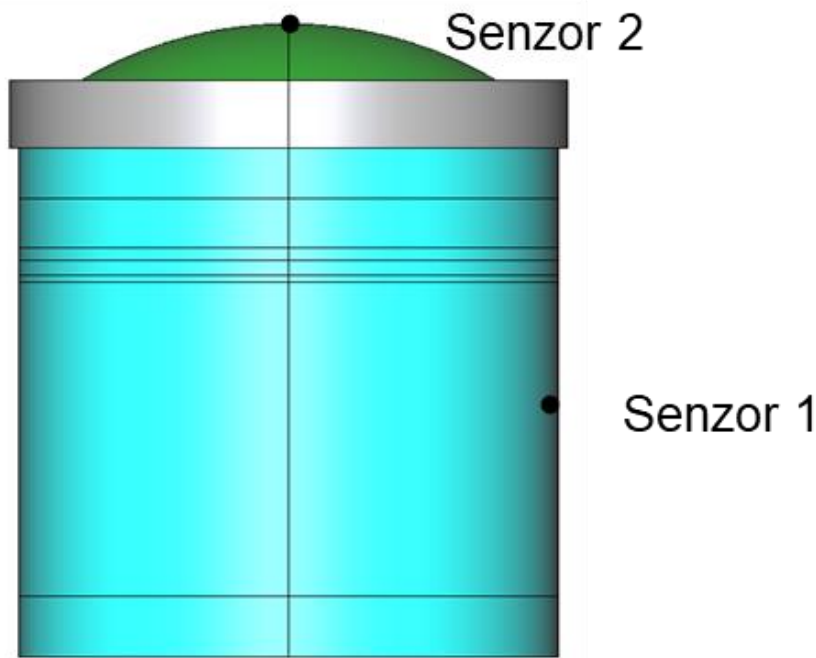


**Obrázek 7: Zobrazení vrstev skořepinového prvku a vrstvy výztuže**

Předpínací výztuž je doporučeno modelovat prutovými prvky s jednoosou napjatostí. Kompatibilita deformací je zajištěna metodou „embedded bars“, kdy uzlová posunutí výztuže jsou vyjádřena lineární kombinací uzlových posunutí 3D prvků, které ji obsahují. Pro modelování ztrát předpětí je doporučeno využít modely soudržnosti, které modelují pokluz v uzlech výztuže (např. [15]).

V numerickém modelu je také důležité nastavit vhodné sledovací monitory (senzory), které umožní sledovat odezvu konstrukce na průběh zatěžování. Monitory by měly reflektovat

místa s největší deformací či přetvořením materiálu. V modelu kontejnmentu jsou to zejména vodorovné posuny v radiálním směru ve stěně kontejnmentu a vertikální posuny ve vrcholu střešní kopule, viz Obrázek 8.



**Obrázek 8: Doporučené umístění senzorů**

### 6.1.6 Zatížení konstrukcí

Pro posouzení konstrukce kontejnmentu na účinky TH se uváží následující zatěžovací stavy:

#### 1) **Stálé zatížení**

V numerickém modelu je potřeba definovat zatížení od vlastní tíhy konstrukce, která se zadá dle objemové hmotnosti materiálu. Pokud jsou známy hodnoty pro ostatní stálé zatížení (např. jeřábová dráha a jiné technologie, které zatěžují přímo konstrukci kontejnmentu) je vhodné v numerickém modelu zohlednit i tato zatížení.

#### 2) **Předpětí**

Předpětí v předpínací výztuži se v numerickém modelu aktivuje pomocí předpínacího napětí.

Ztráty předpětí budou v modelu zohledněny pomocí nastavení z kap. 6.1.2. Pokud je zadána pouze počáteční hodnota předpínací síly a hodnota současné úrovně předpětí je neznámá, je vhodné navíc provést výpočet s dotvarováním betonu.



### 3) **Zatížení teplotou**

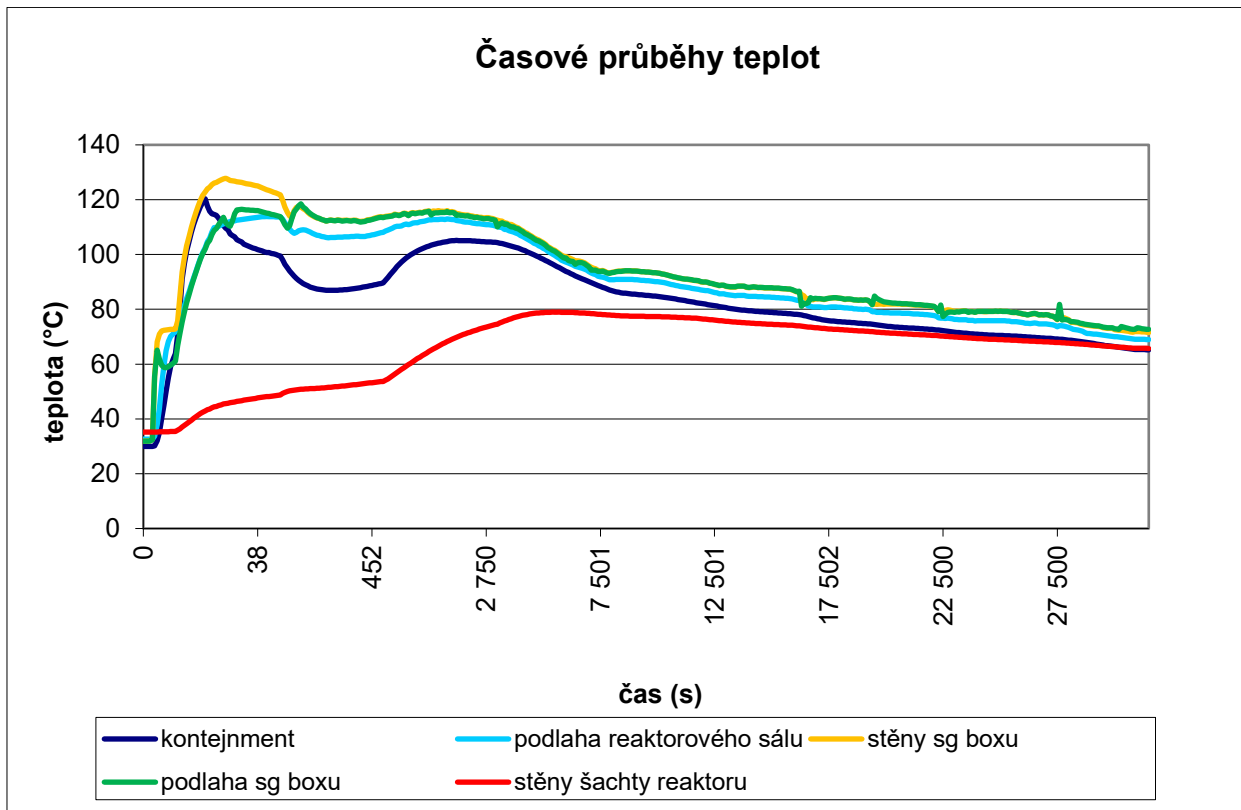
Zatížení teplotou může být v numerickém modelu zadána dvěma způsoby:

#### a) Sdruženou analýzou

Pro přesné stanovení teplotního pole v konstrukci v závislosti na čase je vhodné provést analýzu transportu tepla. Následně se získané teplotní přetvoření konstrukce z teplotní analýzy převede do statického výpočtu. Pro teplotní analýzu musí být stanoven časový průběh teplot na vnitřním povrchu kontejnmentu při TH (viz ukázka Obrázek 9). Průběh teplot uvnitř kontejnmentu se liší podle scénářů, které vedou k rozvoji TH. Pro účely referenčních analýz byl předpokládán průběh a vývoj teplot podobný průběhu při havárii typu LOCA (viz příloha č. 1).

Teplotní analýza se provede na částech konstrukce kontejnmentu (viz Obrázek 9), na kterých hrozí zvýšení teploty při porušení IO – tzn. na stěně a střeše kontejnmentu. V teplotní analýze musí být definovány následující podmínky:

- Na vnitřní straně kontejnmentu přiřazena Dirichletova okrajová podmínka s přírůstkem teploty. Nejprve by mělo být stanoveno rozložení teploty v konstrukci kontejnmentu při normálním provozu, poté při TH a po TH. V režimu normálního provozu se teplota v místnostech přímo sousedících s konstrukcí kontejnmentu pohybuje mezi 30 °C až 60 °C. Zvýšená teplota povrchu konstrukce při TH se zadá pomocí stanovené křivky časového průběhu teploty na vnitřním povrchu konstrukce pro daný scénář TH (viz Obrázek 9).
- Na vnější straně se doporučuje definovat okrajovou podmínku pro přestup teploty, kdy je zadána typická venkovní teplota a přestupní koeficient. Při definici typické venkovní teploty je vhodné uvážit souběh extrémních nízkých teplot a TH (např. pro JE Temelín -22,3 °C – nejnižší naměřená hodnota na meteostanici Temelín).
- Je nutné definovat počáteční teplotu materiálu. Výše uvedené okrajové podmínky se poté aplikují vzhledem k této předpokládané počáteční teplotě. Ve výpočtu referenční analýzy kontejnmentu JE Temelín (viz. příloha č. 1) je předpokládaná počáteční teplota +10°C.



Obrázek 9: Vývoj teplot při průběhu havárie LOCA. Převzato z [26].

b) Zjednodušeně

Zjednodušenou metodou lze v modelu zatížit vnitřní stěnu kontejnmentu, resp. ocelovou vystýlku pouze teplotním gradientem s max. předpokládanou teplotou při TH. Při TH se neočekávají vysoké teploty (vyšší než 200 °C), které by vedly k degradaci betonu i oceli. Proto lze pro návrh použít i tuto zjednodušenou metodu, která je na bezpečné straně.

4) **Vnitřní přetlak  $P_d$**

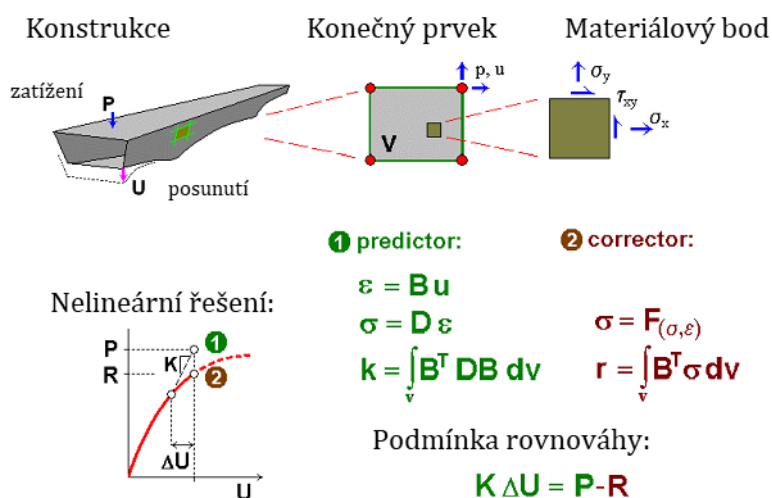
V případě TH se předpokládá nárůst tlaku uvnitř kontejnmentu. Tak jako v případě teploty, i hodnota tlaku se liší podle scénáře. Pro účely referenčních analýz je možné jako výchozí hodnotu použít návrhovou hodnotu tlaku při LOCA havárii, tj. 0,49 MPa.

Provozní a užitná zatížení nehrají v modelu celého kontejnmentu významnou roli, a proto je není nutné uvažovat při modelování odezvy na extrémní zatížení.

Hodnoty dílčích součinitelů pro zatížení a materiál se předpokládají rovny 1 pro případ extrémní zatěžovací kombinace.

### 6.1.7 Stanovení vhodných výpočetních metod

Algoritmus výpočtu v nelineární analýze je přírůstkový, kde v každém kroku zatížení probíhá iterační řešení až do dosažení rovnováhy při splnění materiálových zákonů. Typické schéma nelineárního výpočtu MKP je shrnuto viz Obrázek 10. V nelineárních programech je obvykle k dispozici iterační metoda Newton-Raphsonova a metoda Arc-length (metoda délky oblouku). V případě metody Newton-Raphson je řešení stanoveno hodnotou přírůstku zatížení, které se stanovuje předepsaným zatížením nebo přetvořením. Tuto metodu je vhodné použít pro určení odezvy pro zadané úrovně zatížení, např. vlastní tíha, předpětí, teplota, atd. Metodu „Arc-Length“ je vhodné využít pro postupné přetěžování konstrukce až po mezní zatížení.



Obrázek 10: Schéma nelineárního řešení MKP

Pro urychlení konvergence lze metodu Newton-Raphson i Arc-length použít v kombinaci s metodou line search. Metoda Line search určuje koeficient, kterým je násobena stávající hodnota přírůstku vektoru posunutí tak, aby byla práce residuálních sil minimální.

Zatěžovací stavy uvedené v kap. 6.1.6 se postupně aplikují na numerický model kontejnmentu dle intervalů viz Tabulka 5. V prvních čtyřech intervalech je na model aplikováno stálé a provozní zatížení stanovené projektovou dokumentací. Odezva konstrukce kontejnmentu by tedy měla být do této úrovně v zásadě lineární bez výrazných nelineárních vlivů, vzniku trhlin atd. Proto je v této fázi zatěžování použita Newton-Raphsonova iterační metoda. V posledním zatěžovacím intervalu se model kontejnmentu postupně přetěžuje vnitřním přetlakem až do úrovně celkového kolapsu. Pro hledání odezvy konstrukce v posledním intervalu je vhodné použít metodu Arc-length, protože automaticky umožní snížit zatížení konstrukce ve chvíli dosažení mezní únosnosti.

Tabulka 5: Intervaly zatížení při posouzení kontejnmentu

Intervaly zatížení a výpočetní metody		
Interval	Popis	Metoda řešení
1	Vlastní váha	Newton-Raphson
2	Předpětí	Newton-Raphson
3	Ostatní stálé zatížení	Newton-Raphson
4	Teplota	Newton-Raphson
5	Vnitřní přetlak	Newton-Raphson
6	Přetížení – vnitřní přetlak	Arc-Length

### 6.1.8 Výpočet

Pro řešení numerického výpočtu se použije následující nastavení parametrů výpočtu:

- Výpočtový krok – pro zajištění konvergence výpočtu je žádoucí rozdělit jednotlivé zatěžovací intervaly na několik výpočtových kroků. Standartní hodnota velikosti přírůstku je 25 % z celkového zatížení. Při nekonvergenci či vysoké konvergenční chybě výpočtu lze velikost přírůstků dále zmenšovat, aby byla zajištěna dostatečná přesnost a rychlost výpočtu.
- Maximální počet iterací – u metody Newton-Raphson se zvolí maximálně 50 iterací pro dosažení rovnováhy v jednom kroku. U metody Arc-Length se zvýší počet iterací na 200.
- Kritérium konvergence – tolerance chyby posunutí 0,01, tolerance chyby nevyrovnaných sil 0,01, tolerance maximální nevyrovnané síly 0,01, tolerance chyby energie 0,0001. Např. uvedené tolerance nevyrovnaných sil vyjadřují relativní chybu v rovnováze konstrukce. Hodnota 0,01 odpovídá 1% chybě v rovnováze mezi vnitřními a vnějšími silami působícími na konstrukci.
- Matice tuhosti – u metody Newton-Raphson se nastaví tečná matice tuhosti a oprava matice tuhosti každou iteraci. U metody Arc-length se použije pružná matice tuhosti a oprava na počátku každého výpočtového kroku.
- Řešič – PARDISO – jedná se o velmi spolehlivý a rychlý iterační řešič
- Metoda line search – způsob řešení s iteracemi, limit nevyrovnané energie 0,8, omezení počtu iterací pro line search 3, min. line search limit 0,01, max. line search limit 1

### 6.1.9 Vyhodnocení výsledků

Při vyhodnocení výsledků numerické analýzy se doporučuje ověřit získané výstupy uvedené viz Tabulka 6. Nejdůležitější je ověřit chování konstrukce při zatížení předpokládaným tlakem  $P_d$  při TH, který bude zvyšován až do dosažení maximální únosnosti. Maximální dosaženou únosnost je možné vyjádřit vztahem  $kP_d$ , kde součinitel  $k$  vyjadřuje násobek předpokládaného

T A

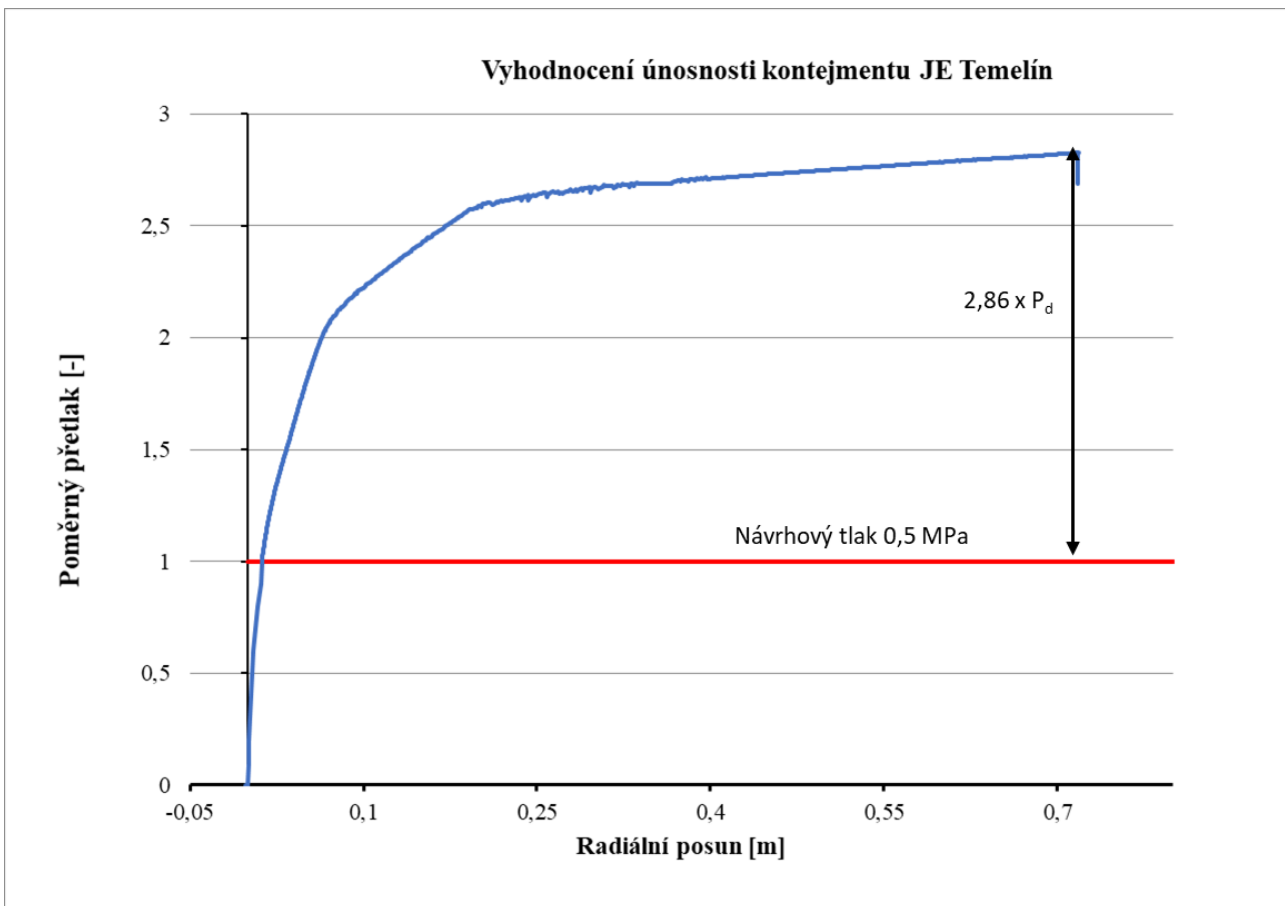
Č R

tlaku, kdy je dosaženo maximální únosnosti konstrukce. Na úrovni předpokládaného tlaku  $P_d$  musí konstrukce kontejnmentu zachovat svoji vzduchotěsnost a v žádném případě nesmí být ohrožena bezpečnost JE. Výsledky při zatížení předpokládaným tlakem, proto musí splňovat požadavky pro zachování integrity kontejnmentu. Jednotlivé požadavky pro vyhodnocení integrity kontejnmentu jsou uvedeny v kap. 6.1.10. Z výsledků na vrcholu únosnosti lze predikovat možný způsob selhání konstrukce – drcením betonu nebo tečením či přetržením předpínacích kabelů a výztuže.

**Tabulka 6: Doporučený seznam posuzovaných veličin v numerické analýze**

<b>Veličina</b>	<b>Doporučené úrovně zatížení pro vyhodnocení výsledků</b>
Svislá deformace ve vrcholu střešní kopule	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Vodorovná deformace válcové stěny	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Hlavní tlakové napětí v betonu	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Hlavní tahové napětí v betonu	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Napětí v předpínací výztuži	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Přetvoření předpínací výztuže	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Tahové napětí v betonářské výztuži	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Tlakové napětí v betonářské výztuži	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Tahové přetvoření ocelové vystýlky	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Tlakové přetvoření ocelové vystýlky	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$
Max. šířka trhlin	Předpokládaný tlak $P_d$ Max. únosnost $k \cdot P_d$

Pomocí výsledků nelineární numerické analýzy se také určí globální odezva konstrukce a součinitel bezpečnosti konstrukce kontejnmentu. Globální součinitel bezpečnosti se stanoví pomocí zatěžovacího digramu, který znázorňuje deformace kontejnmentu vlivem narůstajícího vnitřního přetlaku. Mezní únosnost konstrukce je stanovena v grafu jako největší hodnota vnitřního přetlaku, kterou je model konstrukce schopen přenést. Obrázek 11 zobrazuje typický výpočtový zatěžovací diagram, který byl vypočten při analýze JE Temelín. Graf znázorňuje radiální deformace kontejnmentu vlivem narůstajícího vnitřního přetlaku. Globální součinitel bezpečnosti vychází cca 2,86 vzhledem k předpokládanému tlaku 0,49 MPa (viz příloha č. 1).



Obrázek 11: Vypočtený zatěžovací diagram konstrukce JE Temelín (viz příloha č. 1)

Při vyhodnocení globálního součinitele bezpečnosti se použije následující vztah:

$$\frac{R_k}{P_d} \geq \gamma_M$$

$R_k$  – Hodnota maximálního přetlaku určená na základě charakteristických materiálových hodnot.

$P_d$  – Hodnota předpokládaného tlaku při TH

$\gamma_M$  – V případě nových konstrukcí se vychází podle eurokódu 2 a uvažuje se s hodnotou 1,5. V případě stávajících konstrukcí se vychází podle normy ČSN 73 1201. Bezpečnostní součinitel se stanoví jako poměr mezi normovou a výpočtovou pevností v tlaku, která je v dané normě specifikována pro jednotlivé třídy betonu.

Hodnota  $\gamma_M$  představuje hodnotu dílčího součinitele pro rozhodující materiál dle uvedené normy. Z hlediska vyšší bezpečnosti je doporučeno zvolit součinitel bezpečnosti pro beton.

#### 6.1.10 Posouzení integrity kontejnmentu

Nárůst tlaku uvnitř kontejnmentu je jedním z dominantních způsobů porušení integrity kontejnmentu. Kritéria pro vyhodnocení integrity kontejnmentu jsou specifikována viz Tabulka 7. Pokud kritéria nejsou v numerickém modelu splněna lze očekávat porušení těsnosti kontejnmentu a integrity kontejnmentu není zajištěna.

Tabulka 7: Kritéria pro splnění integrity kontejnmentu

Veličina	Kritérium pro splnění integrity kontejnmentu
Šířka trhlin	<p>Neexistence trhlin s tloušťkou větší 0,05 mm, které probíhají napříč stěnou kontejnmentu a spojují vnitřní a vnější povrch kontejnmentu.</p> <p>V případě vybavení kontejnmentu ocelovou vystýlkou toto kritérium pro šířku trhlin nemusí být splněno. Vzduchotěsnost by měla být zajištěna těsností ocelové vystýlky.</p>
Napětí v ocelové vystýlce	$\sigma_{eq} \leq f_{yk}$ <p><math>\sigma_{eq}</math> – ekvivalentní tahové napětí ocelové vystýlky při návrhovém tlaku TH</p> <p><math>f_{yk}</math> – charakteristická mez kluzu oceli</p>
Napětí v betonu	$ \sigma_c  \leq f_{ck} *$ <p><math>\sigma_c</math> – napětí betonu v tlaku při charakteristické kombinaci extrémního zatížení</p> <p><math>f_{ck}</math> – charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku</p> <p>Při kontrole musí být ověřeno i tahové napětí v betonu při dosažení předpokládaného tlaku při TH. Namáhání betonu v tahu se reálně v konstrukci vyskytovat nemá. Avšak malé oblasti s koncentrací tahového napětí lze v modelu očekávat a je nutné ověřit jejich velikost a rozsah.</p> <p>* Tato podmínka musí být splněna především na běžných částech kontejnmentu. Jelikož podmínka nezohledňuje trojosou napjatost betonu, mohou se v modelu objevit oblasti s koncentrací s vyšším tlakovým napětím. Rozhodující pro posouzení betonu je spíše vypočtené přetvoření v betonu.</p>
Ekvivalentní přetvoření betonu	$\varepsilon_{eq} \leq \varepsilon_{cp}$ <p><math>\varepsilon_{eq}</math> – ekvivalentní přetvoření betonu při vyšetřované úrovni zatížení</p> <p><math>\varepsilon_{cp}</math> – charakteristická mezní hodnota poměrného přetvoření betonu v tlaku typicky 0,0035.</p>



Napětí ve výztuži	$\sigma_s \leq f_{yk}$ $\sigma_s$ – tahové napětí ve výztuži při vyšetřované úrovni zatížení $f_{yk}$ – charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže
Přetvoření betonářské výztuže	$\varepsilon_s \leq \varepsilon_1$ $\varepsilon_s$ – přetvoření výztuže při vyšetřované úrovni zatížení $\varepsilon_1$ - charakteristická hodnota mezního přetvoření výztuže na mezi kluzu
Napětí v předpínací výztuži	$\sigma_{sp} \leq f_{yk}$ $\sigma_{sp}$ – tahové napětí v předpínací výztuži při vyšetřované úrovni zatížení $f_{yk}$ – charakteristická hodnota meze kluzu předpínací výztuže
Přetvoření předpínací výztuže	$\varepsilon_s \leq \varepsilon_1$ $\varepsilon_s$ – přetvoření předpínací výztuže při vyšetřované úrovni zatížení $\varepsilon_1$ - charakteristická hodnota mezního přetvoření předpínací výztuže na mezi kluzu

Ocelová vystýlka představuje nejdůležitější prvek konstrukce pro splnění vzduchotěsnosti kontejnmentu. V normách platných na našem území není uveden žádný speciální požadavek pro ocelové vystýlky kontejnmentů. Princip chování vystýlky kontejnmentu je však jiný než u ostatních ocelových konstrukcí, a proto na jejich posouzení nelze aplikovat normy pro běžné ocelové konstrukce. Na základě této metodiky lze doporučit postupovat při posouzení ocelové vystýlky podle mezinárodního standardu ASME [1], ve které je problematika ocelové vystýlky přímo řešena. Kritérium předepsané pro ocelovou vystýlky v normě ASME je uvedeno viz Tabulka 8.

**Tabulka 8: Kritérium pro splnění integrity kontejnmentu dle ASME [1]**

Veličina	Kritérium pro splnění integrity kontejnmentu
Přetvoření v ocelové vystýlce	$\varepsilon_s \leq 0,004$ $\varepsilon_s$ - přetvoření ocelové vystýlky při vyšetřované úrovni zatížení

## 6.2 Konstrukce vnitřních vestaveb kontejnmentu a šachty reaktoru

V této kapitole je popsán postup posouzení reaktorové šachty bloku VVER 1000 a okolních vestaveb na účinky TH. Stavební konstrukce uvnitř ochranné obálky jsou tvořeny prostorovými monolitickými železobetonovými konstrukcemi a ocelovými plošinami. Železobetonové konstrukce jsou provedeny z prefabrikovaných ocelových armo-bloků zmonolitněných dobetonávkou. Ocelový plech armo-bloků, který plní buď zcela, nebo částečně úlohu statické výztuže, je převážně využit jako bednění při betonáži. Ocelový plech má z vnější strany antikoroziční nátěr, jehož druh se navrhuje podle provozních podmínek místnosti.

Konstrukce uvnitř ochranné obálky jsou založeny na stropní desce, tento strop tvoří společný základ pro konstrukce obestavby, ochranné obálky a konstrukce uvnitř ochranné obálky. Po výšce jsou konstrukce uvnitř ochranné obálky oddilátovány a působí nezávisle na konstrukci ochranné obálky. Jako hranice konstrukce vestaveb je uvažována hermetická vystýlka na stropní desce, na ní položený podlahový beton a ochranná vystýlka jsou součástí vestaveb.

ŠR je válcovitého tvaru, mohutné stěny jsou tvořeny monolitickým betonem a ocelovou výztuží. Součástí vestaveb jsou i BSVP. Další části vestavby jsou tvořeny jednotlivými prefabrikovanými celky, které jsou navzájem zmonolitněny.

### 6.2.1 Shromáždění dostupných podkladů

Pro sestavení vhodného modelu a provedení následné analýzy je třeba nashromáždit především tyto podklady:

- Výkresová dokumentace – půdorysy v jednotlivých podlažích, řezy, výkresy výztuže
- Materiálové charakteristiky použitého betonu a oceli (nejlépe výsledky laboratorních zkoušek použitých materiálů, viz kapitola 5).
- Zatížení, havarijní zatížení – tlaková a teplotní křivka, zatížení BSVP
- Normy:
  - Eurokódy
    - ČSN EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí
    - ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí
    - ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí
    - ČSN EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí

### 6.2.2 Stanovení vhodných materiálových modelů

Numerický materiálový model železobetonu, ze kterého jsou vytvořeny hlavní nosné konstrukce reaktoru, by měl co nejdříve vystihovat kvazikřehké chování skutečného materiálu. Je zde nutno uvažovat jak s tahovým porušením (při vzniku trhlin), tak tlakové porušení (při drcení betonu). Příklad pracovního diagramu vhodného materiálového modelu

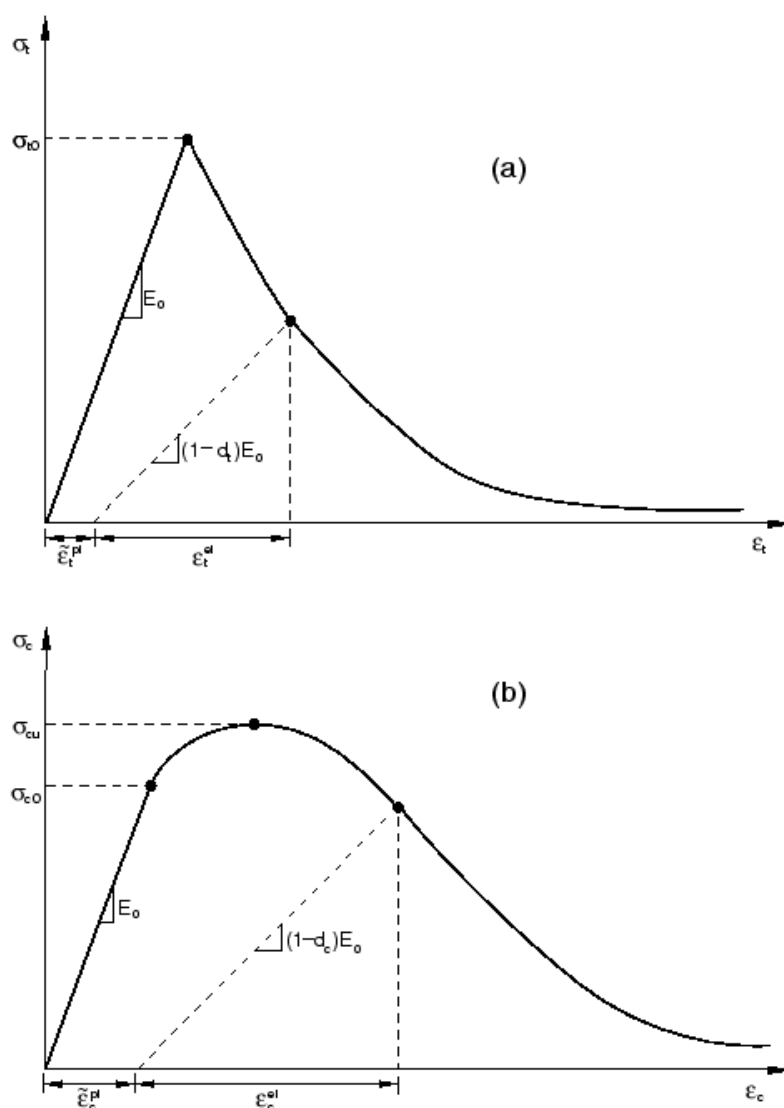
je zobrazen na Obrázek 12. Jedná se o numerický materiálový model Concrete Damaged plasticity, používaný ve výpočetním nástroji ABAQUS.

U konstrukcí okolních vestaveb, je s ohledem na rychlost výpočtu možno použít i lineárně elastický materiálový model.

Jako výchozí stav materiálu je beton uvažován jako izotropní a homogenní materiál. Pokud však v některém kroku výpočtu dojde k překročení tahového napětí, je matice tuhosti daného prvku upravena a tento proces se opakuje. Obdobně je zacházeno při tlakovém porušení materiálu.

Je tedy vhodné volit takový materiálový model, který umožňuje vystižení plastického chování betonu. Jako příklad je možno použít výše uvedený materiálový model Concrete Damaged plasticity, využívající model kohezivní trhliny, dále Drucker-Prager, případně Mohr-Coulumb (modely Drucker-Prager a Mohr-Coulumb se liší tvarem přípustné oblasti, u obou je pevnost v jednoosém tlaku větší než v jednoosém tahu, zohledňují hydrostatickou část napětí a jsou vhodné pro materiály s vnitřním třením).

Pro posouzení ŠR bloku VVER 1000 JE Temelín byl využit model Concrete Damaged plasticity. Konkrétní zvolené vstupní parametry jsou uvedeny v příloze č. 2 - Dynamická analýza na zatížení parní explozí uvnitř ŠR. Tento numerický materiálový model je založen na předpokladu skalárního (izotropního) poškození a je určen pro aplikace, ve kterých je beton vystaven libovolným podmínkám zatížení, včetně cyklického zatížení. Model bere v úvahu degradaci elastické tuhosti vyvolané plastickým napětím jak v tahu, tak v tlaku. To také odpovídá za účinky zotavení tuhosti při cyklickém zatížení.



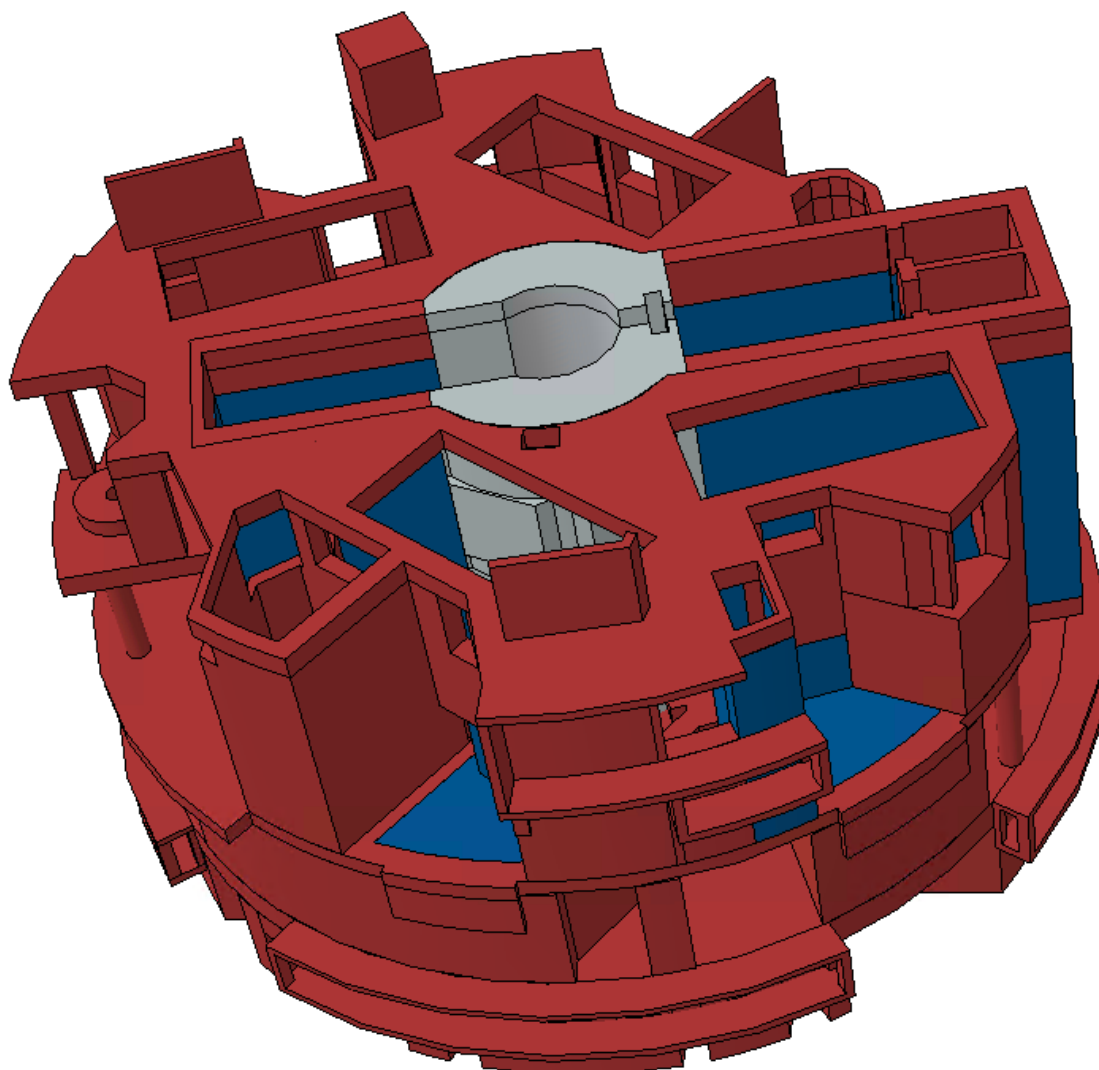
Obrázek 12: Pracovní diagram betonu při jednoosém zatížení v tahu (a) a tlaku (b) pro numerický materiálový model Concrete Damaged plasticity [24]

Tabulka 9: Seznam použitých veličin pro Obrázek 12

Parametr	Popis
$E_0$ [MPa]	Iničiační modul pružnosti
$\sigma$ [MPa]	Napětí
$\sigma_0$ [MPa]	Pevnost materiálu

# T A Č R

$\varepsilon$ [-]	Přetvoření
$\varepsilon^{pl}$ [-]	Ekvivalentní plastické přetvoření
$\varepsilon^{el}$ [-]	Elastické přetvoření
$d_t$ [-]	Míra poškození
Pozn: dolní indexy $t$ a $c$ značí tahové, resp. tlakové napětí/přetvoření.	



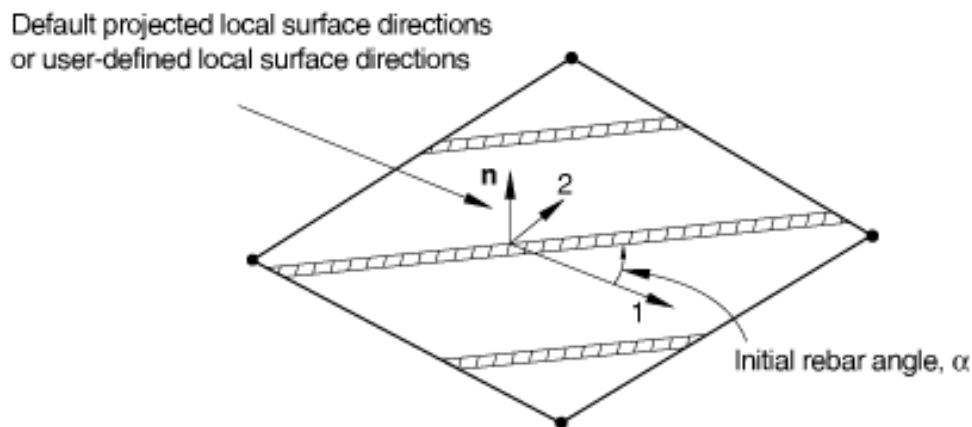
**Obrázek 13: Rozdílné materiálové modely (barevně odlišeny) na ŠR a okolních vestavbách v JE Temelín**

Při tvorbě numerického modelu konstrukce je třeba zohlednit použití betonů s různými vlastnostmi. Příklad rozdělení numerického modelu podle použitých vstupních parametrů materiálového modelu je znázorněn na Obrázek 13. Šedou barvou je zde znázorněna ŠR

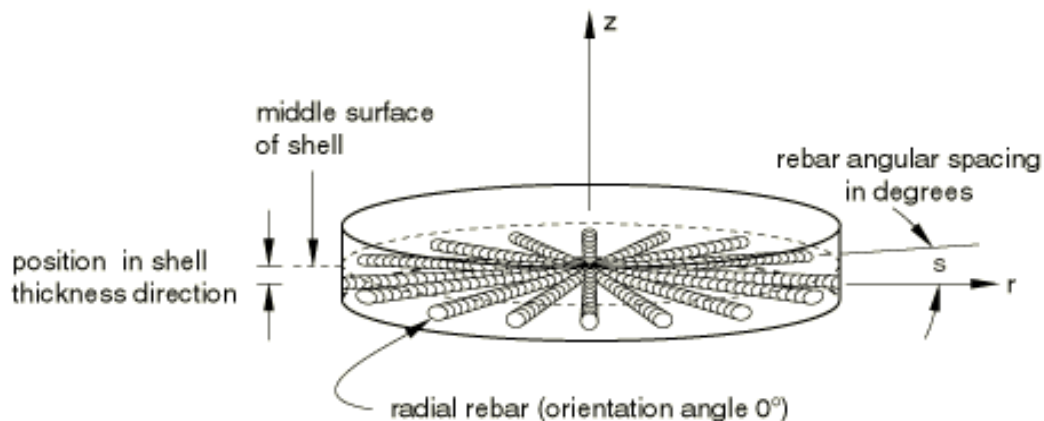
s použitým materiálovým modelem Concrete Damaged plasticity, červenou a modrou barvou je znázorněn lineárně elastický materiálový model pro beton, barevně jsou zde odlišeny oblasti s různými objemovými hmotnostmi betonu. Konkrétní zvolené vstupní parametry pro blok VVER 1000, JE Temelín jsou uvedeny v příloze č. 2 - Dynamická analýza na zatížení parní explozí uvnitř ŠR.

Prostorovou výztuž železobetonových konstrukcí je možné modelovat buď jako jednotlivé pruty pomocí prvků LINK nebo pomocí skořepinových prvků (SHELL) s přiřazenou vlastností „rebar layers“. Tato volba je vhodná k definování jedné nebo více vrstev výztuží v prvcích membrány, skořepiny a povrchu. Musí být používána ve spojení se sekci *membrane section*, *shell section* nebo *surface section*. Touto skladbou je možno dostatečně výstižně modelovat plošné konstrukce vyztužené vrstvami výztuže rovnoběžné se střednicovou rovinou stěny (viz Obrázek 16).

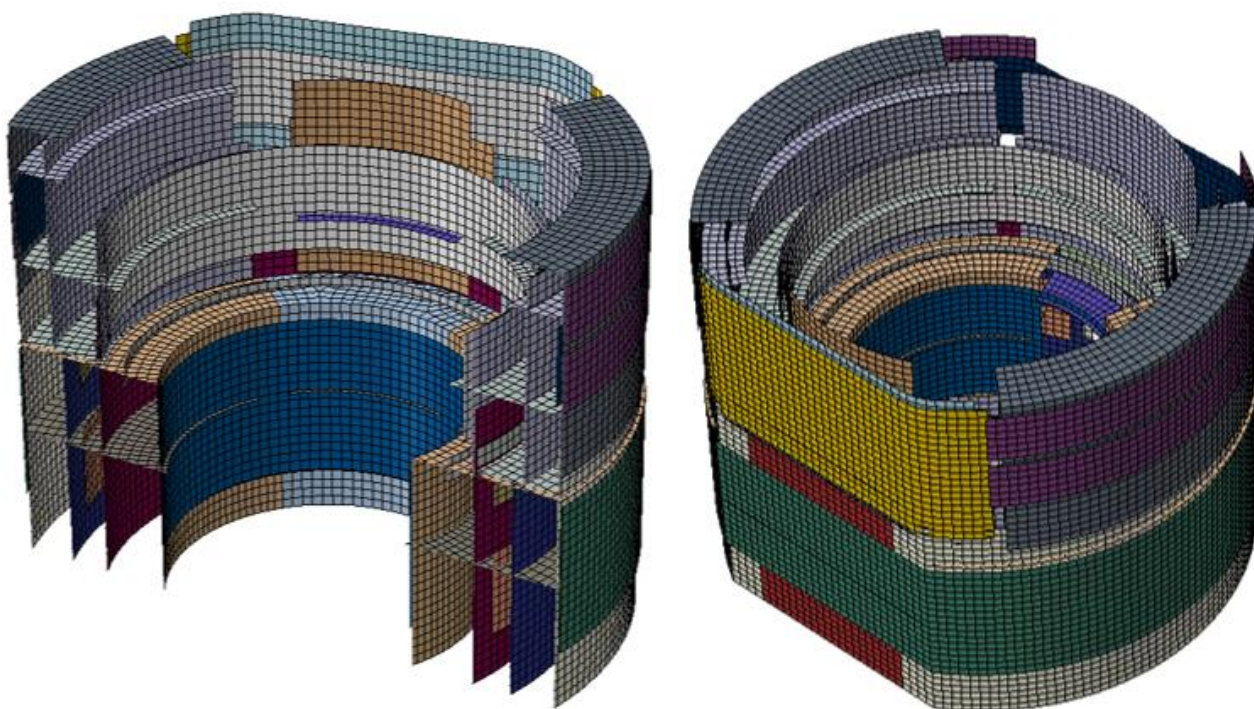
Přiřazená vlastnost „rebar layers“ také umožňuje přesné nadefinování polohy výztuže dle výkresové dokumentace. Zprvu je třeba nadefinovat lokální souřadný systém skořepinového prvku pro zadání polohy výztuže, který může být zadán jako konstantní a výztuž je následně definovaná dle vzdáleností v jednotkách délky (Obrázek 14) nebo lze zavést radiální souřadný systém a vzdálenosti jednotlivých prutů definovat pomocí úhlu (Obrázek 15).



Obrázek 14: Konstantní souřadný systém [24]



Obrázek 15: Radiální souřadný systém [24]



Obrázek 16: Příklad použití skořepinových prvků a nadefinování výztuže pomocí rebar layers u ŠR JE Temelín (viz příloha č. 2)

Pro správnou funkci výztuže v modelu je třeba zajistit vazbu mezi betonářskou výztuží a betonem samotné ŠR. Skořepinové prvky s výztužemi jsou k solidovým prvkům připojeny pomocí tzv. embedded vazby. Jedná se o vazbu, která ve výpočtu spojí uzly skořepinových prvků s uzly solidových prvků a přiřadí jim váhový faktor dle vzájemné vzdálenosti. Spojované uzly prvků jsou hledány v takové vzdálenosti, která je nastavena ve vlastnostech embedded

vazby (Absolute exterior tolerance). Tuto toleranci nastavujeme adekvátně vzhledem k velikosti sítě konečných prvků (vzdálenosti uzlů).

### 6.2.3 Volba vhodných výpočetních programů

Pro výpočet chování kontejnmentu a ŠR na zatížení havárií je vhodné volit program, který je schopen pracovat s rozsáhlým výpočetním modelem. Dále musí výpočetní nástroj umožňovat modelování nelineárního chování materiálu s ohledem na velká přetvoření, probíhající v modelu v krátkém časovém úseku. Je třeba brát zřetel i na teplotní zatížení a volit výpočetní nástroj s ohledem na správný rozvoj teploty v konstrukci. Programy založené na bázi MKP prvků tyto požadavky na dynamický výpočet se zahrnutím nelinearit a s ohledem na teplotní výpočet umožňují.

Vhodný program pro tento typ analýzy je například ABAQUS. Jedná se o celosvětově známý a velmi široce užívaný výpočetní software, používaný ve všech oblastech vědy a techniky, který umí řešit lineární i nelineární dynamické úlohy s krátkým časovým průběhem a je tedy pro tento typ analýzy výhodný. Software řeší výpočty pomocí MPK, což je numerická metoda, jejímž vstupem je model rozdělený na konečný počet prvků, které mají přiřazeny příslušné materiálové vlastnosti a jsou na nich aplikovány zatížení a okrajové podmínky.

Dalšími vhodnými programy jsou např. ATENA, ANSYS, DIANA aj.

### 6.2.4 Validace numerických modelů

Této problematice se podrobně věnovala kapitola 6.1.4. Opět se doporučuje provést citlivostní analýzu pro stanovení vhodné velikosti prvků sítě a délku výpočtového kroku.

### 6.2.5 Modelování konstrukcí

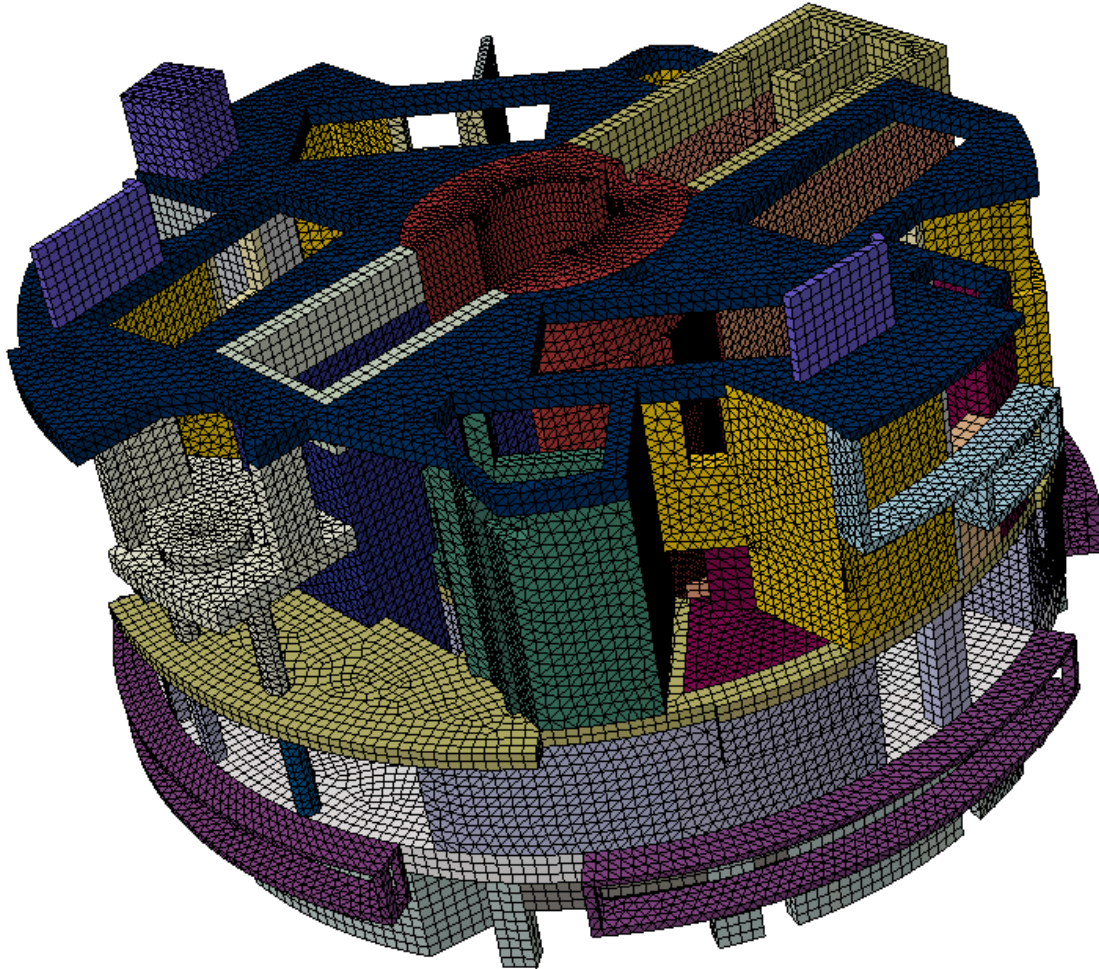
Pro snížení výpočetní náročnosti modelu je vhodné model rozčlenit na menší ucelené části tak, aby byla zachována správná funkce modelu s ohledem na následné vyhodnocení výsledků a jejich zobrazitelnost (toto rozdělení je vhodné zejména při ověřování správné funkce jednotlivých částí modelu, kdy není nutné vždy pracovat s celým modelem, například při zpracování citlivostní analýzy na hustotu MKP sítě). ŠR a vnitřní vestavby kontejnmentu je vhodné v modelu oddělit, aby mohla být analýza provedena pouze na dílčí části, s ohledem na složitost řešení detailů daných konstrukcí. Pro výpočetní model JE Temelín bylo zvoleno rozdělení dle barevného odlišení zobrazeného na Obrázek 17.

Je doporučeno rozdělení minimálně na tyto části:

- ŠR,
- BSVP,
- Vestavby z železobetonu s vyšší objemovou hmotností,



- Vestavby z železobetonu s nižší objemovou hmotností.



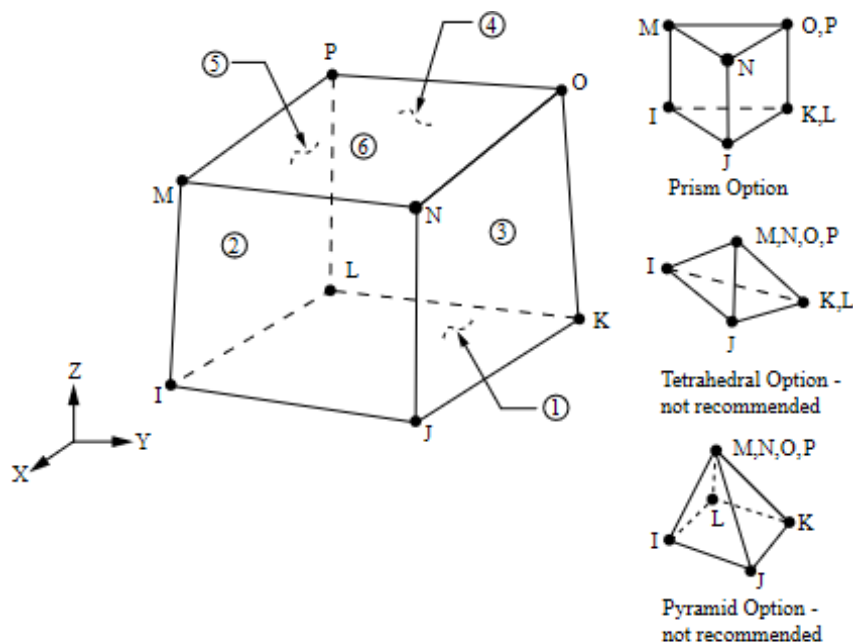
**Obrázek 17: Síť konečných prvků (model ŠR a vestaveb JE Temelín)**

Vzhledem k objemově prostorným konstrukcím, kde není možné zanedbat jakýkoli rozměr je třeba sestavit 3D model složený z prostorových prvků typů *solid*. Dle náročnosti a pravidelnosti tvaru konstrukce se dále volí hexa nebo tetra prvky viz Obrázek 18. Tyto prvky lépe vystihují lokální koncentraci napětí, i při použití hrubé sítě. Pro zvolení správné hrubosti sítě musí být provedena citlivostní analýza, na jejímž základě bude stanovena optimální velikost jednotlivých konečných prvků. V oblastech, kde požadujeme větší přesnost výsledků analýzy je třeba provést zjemnění sítě, jak je zobrazeno na Obrázek 19. Pro správnou diskretizaci modelu na síť konečných prvků, je nutné zvážit a nalézt vhodný kompromis mezi podrobností sítě a náročností výpočtu. To se odvíjí od požadované přesnosti prováděné analýzy. V místě, kde je požadavek na přesnější řešení je možné síť zjemnit a dosáhnout tak přesnějšího výsledku (zpravidla se jedná o místo s výskytem a následným rozvojem trhlin).

Pro výpočetní model kontejnmentu a vnitřních vestaveb je vhodné zvolit kombinaci různých typů prvků. Typ MKP prvků se odvíjí od vytvořeného modelu. Pokud je reaktor a okolní části

konstrukce modelován jako prostorový objekt, je vhodné použít pro nepravidelné tvary prvky tvaru tetrahedron, nebo hexahedron, pro pravidelné tvary bricky. Prostorové prvky zobrazené na Obrázek 18 byly použity na modelování masivních betonových konstrukcí.

- Pro betonové konstrukce, které tvoří stěny a sloupy vestaveb a BSVP, to jsou 3D prvky typu hexaedr.
- Konstrukce stropů vestaveb je vhodné modelovat jako 3D prvky typu tetraedr (s ohledem na kruhový půdorys).
- Konstrukce ŠR je doporučeno modelovat pomocí 3D prvků typu tetraedr (s ohledem na válcovitý tvar).
- Ocelovou výztuž ŠR lze modelovat pomocí skořepinových prvků, kterým se následně ve vlastnostech nadefinuje přesné rozmístění výztuže, jak je zobrazeno na Obrázek 16.



Obrázek 18: Konečné 3D prvky [25]

Konečným prvkům jsou následně přiřazeny odpovídající parametry. V případě teplotní analýzy se volí prvky typu „Coupled Temperature-Displacement“, které umožňují zobrazení šíření tepla v materiálu, zobrazení napětí v materiálu a jejich posunů způsobené teplotní změnou, která výbuch páry doprovází. V případě samotné analýzy výbuchu páry (tedy tlakové vlny), je třeba volit prvky typu „3D Stress“, které zobrazují napětí v materiálu včetně jejich posunů.



Obrázek 19: Příklad zjemnění sítě konečných prvků na ŠR v JE Temelín

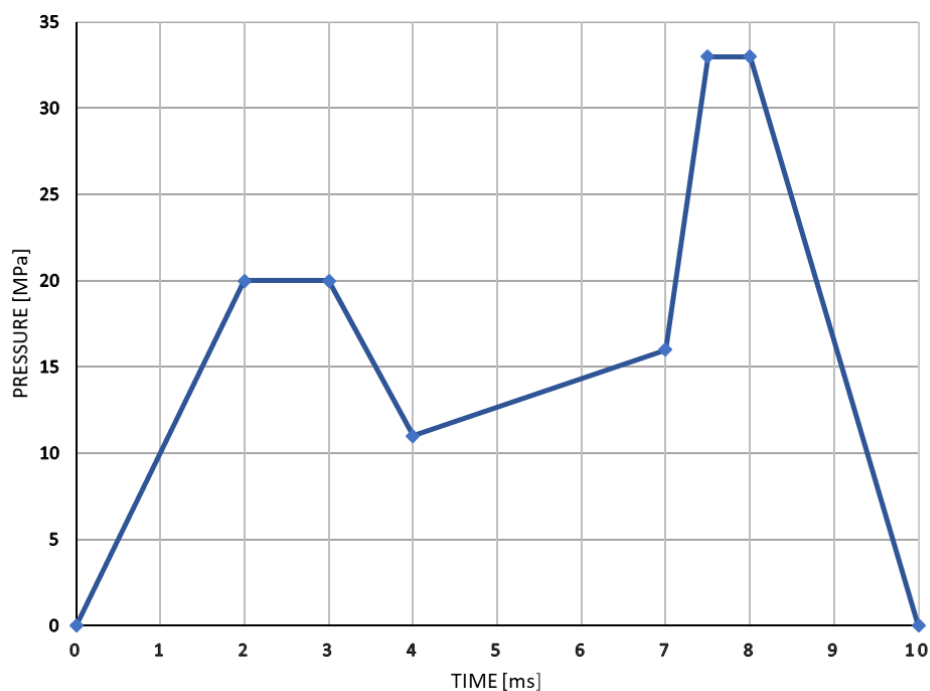
### 6.2.6 Zatížení konstrukcí

- **Stálé zatížení** - vlastní tíha stavebních konstrukcí.
- **Provozní zatížení** - zatížení technologií, vodou v bazénech, teplotou.
- **Užitné zatížení** - dle platných norem, zejména:
  - Eurokódy
    - ČSN EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí
    - ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí (plochy kategorie C)
- **Havarijní zatížení** bude stanoveno v návaznosti na technologickou část projektu. Pro potřeby referenčních analýz je možno použít například výsledky z projektu OECD-SERENA 1 [18], Obrázek 9 a Obrázek 20.

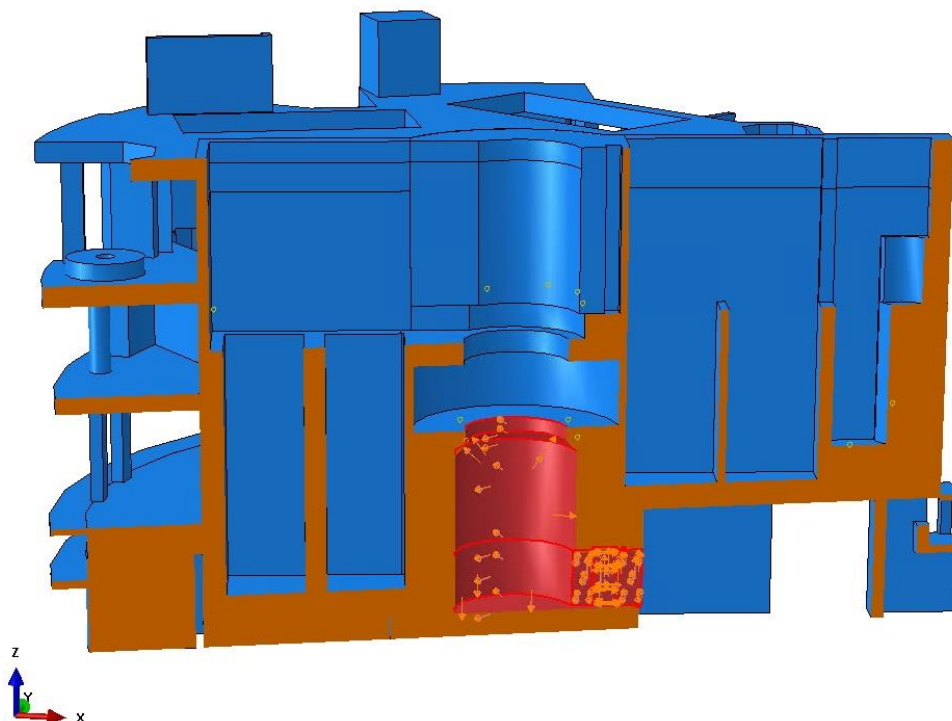
V posudku je třeba zohlednit všechna zatížení na železobetonovou ŠR a vnitřní vestavby kontejnmentu (například zatížení vodou v BSVP, palivovými tyčemi apod.) a jejich kombinace. Jelikož je výbuch páry v ŠR dle ČSN EN 1990 mimořádná návrhová situace, je uvažován součinitel bezpečnosti hodnotou 1,0 (dle vztahu 6.11b).

Zatížení, týkající se výbuchu páry se skládá ze dvou částí. V prvním případě je třeba nasimulovat tepelnou část exploze, kdy se z epicentra teplota šíří do okolních konstrukcí. Cílem předcházejících technických postupů a operací je zabránit výbuchu páry. Tedy dochází k neustálému chlazení ocelové nádoby reaktoru, aby bylo zabráněno protečení koria skrze dno nádoby do chladicí kapaliny nacházející se v ŠR. Lze tedy předpokládat, že před případným vznikem parního výbuchu v případě neúspěšného chlazení nádoby reaktoru bude železobetonová ŠR a přilehlé stěny již ohřátá od vznikající páry. Průběh teplot uvnitř kontejnmentu se liší podle scénářů, které vedou k rozvoji TH. Pro účely referenčních analýz byl zjednodušeně předpokládán průběh a vývoj teplot podobný průběhu při havárii typu LOCA viz Obrázek 9.

V dalším kroku je třeba nasimulovat parní explozi. Tedy tlakovou vlnu, kterou výbuch vyvolá. Tento proces je třeba modelovat jako časově závislý děj (průběh tlaku v čase je možné použít z dostupných podkladů, pro případ bloku VVER 1000 byla zatěžovací křivka převzata z výsledků projektu OECD-SERENA 1 [18] viz Obrázek 20, který pracoval s reaktorem s obdobnou geometrií). V čase 0 ms dochází k protavení koria skrze dno ocelové nádoby a následnému vytečení taveniny do chladicí kapaliny, která se okamžitě mění v páru a nastává parní exploze. V čase 8 ms je dosažena maximální hodnota tlaku na vnitřní stěny. V tomto okamžiku hermetizační dveře již nejsou schopny odolávat vyvíjenému tlaku a povolí. Tlak na stěny rychle poklesne (viz kapitola 6.3). V průběhu parního výbuchu je uvažován stejný tlak na všechny povrchy uvnitř ŠR.



**Obrázek 20: Zatěžovací křivka havárie [18]**



**Obrázek 21: Aplikace zatížení explozí na vnitřní stěny ŠR**

### 6.2.7 Stanovení vhodných výpočetních metod

Geometrická či materiálová nelineární analýza vyžaduje kroky přírůstkového zatížení (nebo deformace). Na konci každého přírůstku se změní geometrie konstrukce, případně se projeví materiálová nelinearita. Každá z těchto geometrických či materiálových změn, se promítne do aktualizace matice tuhosti pro další přírůstkový krok analýzy. Výpočet je možné provést jako dynamický implicitní (Newton-Raphson), případně dynamický explicitní.

Explicitní analýza na konci každého přírůstku aktualizuje matici tuhosti založenou na změnách geometrie a materiálu. Následně se vytvoří nová matice tuhosti a do systému se aplikuje další přírůstek zatížení (nebo posunutí). Tento systém zajišťuje, že pokud jsou přírůstky dostatečně malé, výsledky budou přesné. Nevýhodou je však vysoký počet těchto přírůstků a s tím spojená časová náročnost výpočtu. Není-li počet přírůstků dostatečný, má tendenci se odchýlit od správného řešení. Tato metoda nevytváří rovnováhu vnitřních strukturálních sil s vnějšími zatíženími.

Implicitní analýza je obdobná jako explicitní s tím rozdílem, že po každém přírůstku je provedena analýza rovnováhy vnitřních strukturálních sil s aplikovanými zatíženími a následně dojde k aktualizaci matice tuhosti. Rovnováha je vynucena k určité uživatelské toleranci. Tento výpočet může být časově náročný, ovšem iterace typu Newton-Raphson mají

kvadratickou míru konvergence, která je velmi žádoucí. Tento typ analýzy je pro použití pro výpočet výbuchu páry dostatečně přesný a z časového hlediska výhodnější.

### 6.2.8 Výpočet

Při řešení numerického výpočtu je třeba doplnit nastavení výpočtových parametrů. Pro tento typ modelu jsou doporučeny následující:

- Použití metody Newton-Raphson, kdy se matice tuhosti aktualizuje po každé iteraci.
- Celkový výpočetní čas je třeba prodloužit (oproti zatěžovací křivce výbuchu, která byla v případě analýzy bloku VVER 1000 JE Temelín stanovena na 10 ms), aby byla v analýze zachycena odezva konstrukce, která bude značně opožděná vůči průběhu zatížení. V případě zjišťování dopadu havárie na okolní vestavby je třeba nastavit takovou dobu, aby tlaková vlna prošla skrze všechny vestavby a umožnit tak analýzu odezvy celé konstrukce. Tato doba by měla být alespoň tisícinásobkem délky trvání zatížení od výbuchu (v případě analýzy bloku VVER 1000 JE Temelín byla uvažována doba 10 s).
- Výpočtový krok je třeba stanovit tak, aby byla zajištěna uspokojivá přesnost výpočtu s ohledem k jeho časové náročnosti (doporučuje se použít citlivostní analýzu). Vzhledem k typu zatížení, které je rozděleno do jednotlivých intervalů, je třeba zaznamenat odezvu konstrukce pro každý tento interval a s ohledem na tuto skutečnost nastavit výpočtový krok tak, aby zajistil uspokojivé výsledky analýzy a výpočet řádně konvergoval. V případě chyby konvergence je možné přírůstek zmenšovat. Pro stanovení optimální délky výpočtového kroku je vhodné provést citlivostní analýzu na celkovém modelu, nebo na některé z hlavních částí (ŠR).

### 6.2.9 Vyhodnocení výsledků

Rozhodující vlastnost konstrukce je zachování strukturální integrity a nepropustnosti ŠR a BSVP, aby nedocházelo k prosakování radioaktivní kapaliny do okolních částí. Z tohoto důvodu se zkoumá vznik a rozvoj trhlin v kritických místech konstrukce.

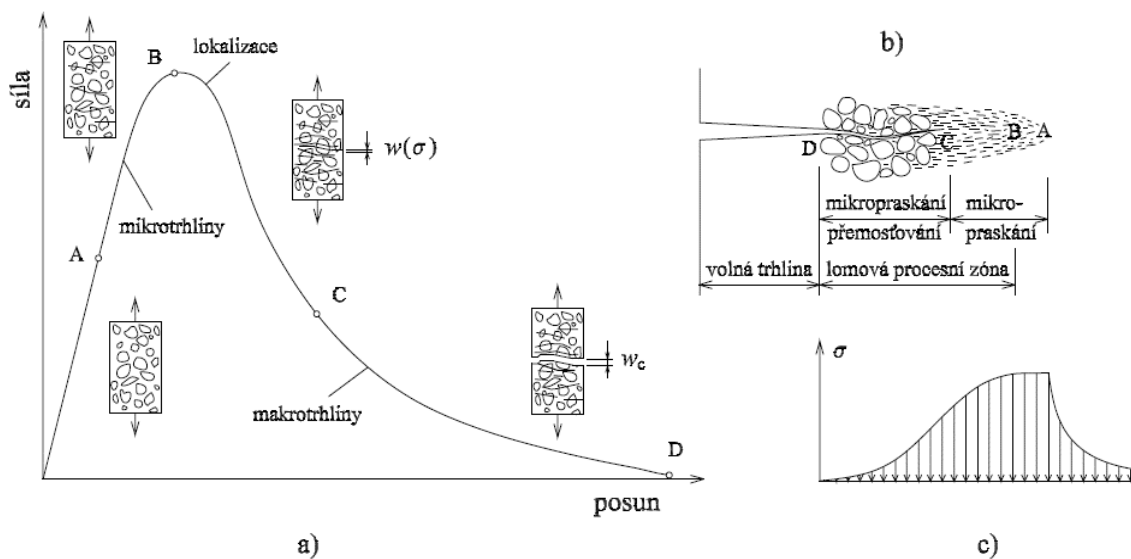
Vznik trhlin v železobetonové konstrukci ŠR je nežádoucí především ze dvou důvodů. První důvod je narušení funkce šachty při zatížení výbuchem páry. Při vzniku a šíření trhlin dochází ke změně tuhosti šachty, která je těmito trhlinami oslabena (může docházet k velkým deformacím, na které nebyla šachta navržena, což může mít negativní vliv na funkci pohyblivých částí). Druhý důvod je ztráta vodonepropustnosti ŠR, ke které může docházet při rozvoji trhlin zejména ve spodní části šachty a s ní spojený průsak radioaktivních kapalin.

Při překročení mezní hodnoty napětí pevnosti betonu v tahu (tlaku), je dosažena mez vzniku trhlin a beton se v tomto místě poruší (viz Obrázek 22). Pro vyhodnocení analýzy je klíčové nalezení místa, kde vznikly nejširší/nejhlubší trhliny.

Následně je třeba pozorovat šíření trhlin po průřezu a vznik nových oblastí trhlin a oblastí, kde dochází k drcení betonu. Jelikož se v případě BSVP a zaplavené šachty (v závislosti na stavu

hermetizačních dveří po výbuchu páry) jedná o nádrže s kapalinou, je třeba tyto oblasti posoudit podle normy ČSN EN 1992-3: Nádrže na kapaliny a zásobníky a stanovit, zda může dojít k průsaku kapalin.

V případě porušení v celé výšce (šířce) průřezu dochází ke ztrátě nepropustnosti konstrukce a může zde docházet k průsakům radioaktivních kapalin.



**Obrázek 22: Formování nelineární zóny v kvazikřehkém materiálu a) zatěžovací diagram taženého vzorku, b) schematické znázornění pochodů v neelastické zóně, c) rozdělení napětí po délce nelineární zóny. [23]**

### 6.2.10 Stanovení, zda může dojít k porušení integrity vestaveb kontejnmentu a šachty reaktoru

Při analýze je třeba stanovit celkové poškození konstrukcí. Hlavním požadavkem z hlediska bezpečnosti je zachování integrity ŠR a vnitřních vestaveb, a dále zadržení radioaktivní kapaliny a zachování nepropustnosti BSVP. Je tedy třeba posoudit konstrukce v každém kritickém průřezu a stanovit, zda vzniklé trhliny prostoupí celý průřez a dojde tak k ohrožení těchto požadavků, či nikoli. Pro posouzení vodonepropustnosti se doporučuje použít normu ČSN EN 1992-3: Nádrže na kapaliny a zásobníky. K zachování nepropustnosti přispívá i ocelová vystýlka. K posouzení ocelové vystýlky je doporučeno řídit se mezinárodním standardem ASME [1].

Požadavky na porušení integrity jsou blíže specifikovány viz Tabulka 7 a Tabulka 8.

**T A**

**Č R**

## 6.3 Konstrukce ocelových hermetizačních dveří

V této kapitole je představen postup pro posouzení konstrukce hermetizačních dveří na účinek parní exploze způsobené smísením koria s vodou, kterou může být zatopen prostor pod reaktorem. Vzhledem ke komplexnosti zkoumaného problému je postup rozdělen do několika po sobě jdoucích fází. Jednotlivé fáze jsou řešeny odděleně a využívají jak analytické, tak numerické metody výpočtu.

Analýzu je nutné rozdělit na dvě hlavní části:

1) Stanovení kinetické energie hermetizačních dveří a z toho vyplývající zatížení ochranné bariéry (stínící stěny uvnitř kontejnmentu), pro které je potřeba provést následující analýzy:

1a) Analytický výpočet nárazu tlakové vlny na konstrukci hermetizačních dveří

1b) Posouzení kotevních prvků konstrukce hermetizačních dveří

1c) V případě, že kotvící prvky nepřenesou účinky tlakové vlny, je nutné stanovení pohybu hermetizačních dveří, pravděpodobného místa a energie nárazu do dalších konstrukcí.

2) Výpočet a posouzení odolnosti železobetonové konstrukce při zatížení nárazem letících hermetizačních dveří.

Metodiku lze v případě potřeby použít rovněž pro případné zesílení stávajících konstrukcí.

Hermetizační dveře jsou v blocích typu VVER 1000 umístěné na konci tunelu sloužícího k přístupu k nádobě reaktoru. Délka tohoto tunelu je přibližně 3 m, jeho šířka je 1,8 m a výška 3,0 m. Přibližně v polovině délky tunelu se nacházejí ochranné betonové dveře, které netěsní a v analýze nejsou uvažovány.

Zkoumané hermetizační dveře jsou konstantní tloušťky 400 mm a jsou vyrobené z oceli. Jsou plnostěnné. Podél jedné svislé strany jsou ukotveny čtveřicí pantových závěsů, protilehlá strana je v zavřeném stavu fixována čtyřmi zámky - ocelovými dvojjzratnými pákami. Rozmístění těchto prvků je symetrické podle vodorovné osy dveří.

Za hermetizačními dveřmi se nachází konstrukce dráhy přístroje pro periodickou kontrolu TNR. Vodorovné konstrukce jsou masivní, železobetonové. Pod podlahovým souvrstvím je železobetonová deska tloušťky 2,4 m, tloušťka stropní desky je 1,2 m. V ose hermetizačních dveří se před konstrukcí kontejnmentu nachází železobetonová půdorysně zalomená stěna tloušťky 600 mm, výšky 6 m a šířky 7,4 m. Stěna má oboustrannou ocelovou výstelkou tl. 6 mm, procento příčné výztuže je zanedbatelné.

### 6.3.1 Shromáždění dostupných podkladů

Pro analýzu problému jsou potřebné následující podklady:

- Původní projektová a aktuální dokumentace - výkresy tvaru a výztuže, detailní informace o materiálu a konstrukci hermetizačních dveří včetně upevňovacích prvků, konstrukce dráhy pro revizní přístroj.
- Výsledky laboratorních zkoušek materiálů



- Literatura (numerické simulace parní exploze)
- Normy:
  - Eurokódy
    - ČSN EN 1990 - Zásady navrhování konstrukcí
    - ČSN EN 1991 - Zatížení konstrukcí
    - ČSN EN 1992 - Navrhování betonových konstrukcí
    - ČSN EN 1993 - Navrhování ocelových konstrukcí
  - Další dle požadavků zadavatele

### 6.3.2 Stanovení vhodných materiálových modelů

Chování **oceli** může být realisticky popsáno pružnoplastickým modelem popsaným Misesovou podmínkou plasticity, která závisí pouze na deviatorické složce napětí. Pro realističtější, avšak méně konzervativní výpočty, může být použito kinematické zpevnění. Změkčení lze v pracovním diagramu dosáhnout např. zavedením poškození, jehož vývoj je možné popsat v závislosti na plastické deformaci.

Pro popis **betonu** je potřeba zvolit materiálový model, který umožňuje popsat plastické chování se změkčením v tlaku, kvazikřehké chování v tahu, vyšší pevnost při víceosém tlaku, realistický vývoj objemové deformace při plastickém přetváření a v neposlední řadě vliv rychlosti zatěžování na pevnost materiálu v tahu a tlaku. Poslední podmínka může vést k méně konzervativnímu výpočtu než v případě čistě kvazistatického přístupu bez vlivu rychlosti zatěžování na chování materiálového modelu.

Tato kritéria splňuje například model označovaný CDPM2 [20], Concrete Damage-Plasticity Material, představený roku 2013 Peterem Grasslem. Jedná se o novější a vylepšenou verzi modelu CDPM1 [19] z roku 2006 autorů Grassl a Jirásek. Modely CDPM jsou založené na plasticitě s izotropním zpevněním a nesdruženým zákonem plastického přetváření. Změkčení je popsáno mechanikou poškození. Podmínka plasticity modelů CDPM je formulována v prostoru efektivních napětí a závisí na všech třech invariantech napětí. Zákon plastického přetváření je odvozen z plastického potenciálu, který závisí jen na hydrostatickém napětí a druhém invariantu deviatorického napětí. Plocha plasticity se při plastickém přetváření rozšiřuje z původního tvaru, který odpovídá mezi pružného chování, a blíží se k finálnímu tvaru, který koresponduje s obálkou pevnosti.

Změkčení je popsáno poškozením, jehož vývoj závisí na objemové plastické deformaci a závisí na druhu napjatosti. Tímto způsobem lze realisticky vystihnout duktilnější odezvu při víceosém sevření. Nejvýraznější rozdíl mezi modely CDPM1 a CDPM2 představuje změkčení. První verze modelu pracuje jen s jedním parametrem poškození, zatímco jeho novější verze operuje s poškozením pro tah a tlak odděleně, což vede k jednodušší kalibraci materiálového modelu.

Oba modely mohou být regularizovány např. pomocí metody pásu trhlin (crack-band approach), což je z hlediska výpočetního času výhodnější než více realistický nelokální přístup. Modely mají vysoký počet materiálových parametrů, ale pro základní nastavení jich postačuje

kalibrovat pět. Těmito parametry jsou modul pružnosti, Poissonovo číslo, jednoosá tahová a tlaková pevnost a lomová energie pro mód namáhání I.

Vliv rychlosti zatěžování na zvýšení hodnot tahové a tlakové pevnosti betonu se řídí vztahy popsány v článku [21], pro kalibraci této závislosti nejsou potřeba žádná dodatečná experimentální data.

### 6.3.3 Volba vhodných výpočetních programů

#### Nárazu tlakové vlny do hermetizačních dveří

Řešení **nárazu tlakové vlny** do hermetizačních dveří lze nalézt v uzavřeném tvaru, výpočetní program není pro tuto aplikaci potřeba.

Vzhledem k jednoduchosti implementace materiálového modelu s Misesovou podmínkou plasticity může být pro numerický **výpočet únosnosti závěsů** hermetizačních dveří MKP může být proveden téměř v libovolný komerční program umožňující nelineární analýzu ve 3D, např. Ansys, Abaqus, Atena, případně volně šiřitelný program, např. OOFEM, SIFEL, Mofem.

#### Pohyb hermetizačních dveří

Pro stanovení pohybu hermetizačních dveří je nutné některé sekvence řešit numericky. K tomuto účelu lze použít jednoúčelové skripty napsané např. v programovacím jazyce Matlab/Octave, Python, C apod. Pro konkrétní příklad je podrobná analýza uvedena v příloze č.3 - Účinek parní exploze v ŠR na hermetické dveře.

#### Náraz hermetizačních dveří do železobetonové stěny

Pro popis nárazu hermetizačních dveří do železobetonové stěny může být použit libovolný software podporující režim nelineární (explicitní) dynamiky a statiky a ve kterém je implementován vhodný materiálový model charakterizovaný v předchozí kapitole. Materiálový model CDPM2 je implementován např. v programu OOFEM 2.5 [22], vyvíjeném na Katedře mechaniky, Fakulty stavební, ČVUT v Praze.

### 6.3.4 Ověření modelů na jednoduchých výpočtech

Správnou funkčnost numerických modelů je potřeba před řešením komplexní úlohy ověřit pro základní způsoby namáhání na úrovni materiálového bodu/ 1 konečného prvku. Zejména se jedná o ověření chování betonu (modelu CDPM2) při jednoosém tahu, tlaku, víceosé napjatosti a při různé rychlosti zatěžování. K tomuto účelu lze využít experimentální data a vypočtené odezvy v původních člancích [19][20][21].

### 6.3.5 Modelování konstrukcí a procesů

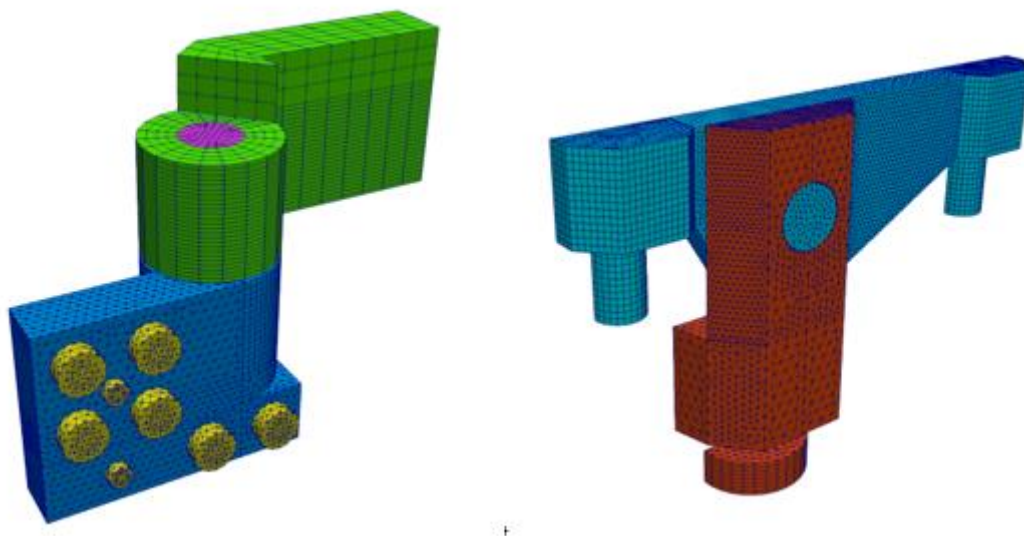
Výpočet účinku **tlakové vlny** na hermetizační dveře i na jiné konstrukce kontejnmentu má být v souladu s přesností a spolehlivostí zatížení. Aktuálně je tedy adekvátní přibližný výpočet,

který postihne jen hlavní parametry odezvy. Pro analytické vyjádření účinků tlakové vlny je potřeba zavést celou řadu zjednodušujících předpokladů: revizní tunel je uvažován jako ideálně tuhý a zcela zatopený. Kromě normálového tlaku není mezi vodou a tunelem žádná interakce, stejný předpoklad platí i pro interakci s dveřmi. Viskozita a závislost na tlaku a teplotě je zanedbána, dveře jsou tuhé a tlumící síly jsou zanedbány. Stínící betonové dveře a výklenky tunelu se rovněž zanedbávají vzhledem k poměru rozměrů těchto nepravidelností k délce tlakové vlny 15 m. Vodní těleso pak tvoří jednoduchý prizmatický vlnovod, jehož průřez je shodný s rozměrem dveří. Vzhledem k výsledné rychlosti dveří po nárazu vlny jde o konzervativní předpoklad.

Konzervativní odhad rychlosti udělené dveřím plyne z rovnosti impulzu a hybnosti,  $I = \int \sigma dt$ ,  $v=I/m$ , kde  $\sigma$  je tlak ve vlně a  $m$  je hmotnost dveří na jednotku plochy. Interakci tlakové vlny s dveřmi postihuje přibližně druhý nejjednodušší model, jednorozměrné kontinuum (vlnovod), reprezentující vodu v tunelu s připojenou hmotností dveří. Pro šíření vlny platí obyčejná diferenciální vlnová rovnice. Pokud se zanedbá odpor pantů a zámků dveří, najde se řešení v uzavřeném tvaru.

Předpokládá se, že při pokroku v definici zatížení se metoda přizpůsobí. Předkládané řešení bude v tomto směru využito k volbě vhodné přesnější metody a pro kontrolu jejích výsledků.

Pro **stanovení únosnosti kotevních prvků** hermetizačních dveří může být použita metoda konečných prvků. V tom případě je nutné vytvořit dostatečně podrobné výpočetní modely obou typů závěsů - pantu a zámku (dvojitelné páky). Snaha je o maximalizování oblasti se strukturovanou sítí konečných prvků, a pokud to je možné, o využití symetrie. Chování a podepření modelů musí korespondovat s realitou, např. čep páky a dřík pantu musí umožňovat volné pootáčení. Toho lze dosáhnout využitím kontaktních prvků, které přenášejí pouze tlakové normálové napětí. Nerespektování těchto zásad a příliš velké zjednodušující předpoklady mohou vést k výsledkům, které nebudou realistické a mohou být na straně nebezpečné.



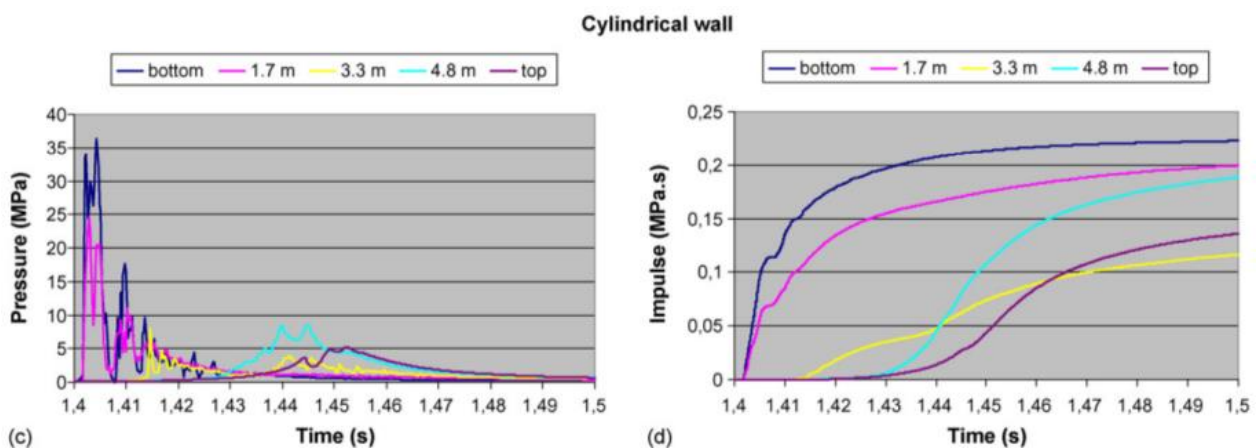
**Obrázek 23: Výpočetní modely kotevních prvků držících hermetizační dveře**

Při výpočtu **pohybu hermetizačních dveří** jsou tyto dveře považovány za ideálně tuhé, charakterizované pouze hmotností a setrvačností v rovině pohybu. Při výpočtu je nutné použít řadu zjednodušujících předpokladů, které umožňují stanovit horní (idealizace pružného nárazu, tj. zákonu zachování energie) a dolní (idealizace plastického rázu, tj. zákonu zachování hybnosti) odhad kinetické energie dveří v okamžiku nárazu dveří do železobetonové bariéry.

Při analýze **nárazu letících dveří do železobetonové stěny** MKP lze problém v zásadě analyzovat dvěma způsoby – kvazistatickým a dynamickým výpočtem. V prvním případě je kinetická energie letících dveří porovnána s vykonanou prací stanovenou postupným přitěžováním stěny až do jejího kolapsu. V tomto případě nemusí výpočetní model obsahovat dveře. Ve druhém případě je konstrukce zatížena nárazem dveří, jejichž počáteční rychlost lze určit z celkové kinetické energie pohybujících se dveří. Kontaktní problém (tj. spojení dveří a stěny) lze zjednodušeně nahradit vhodně zvolenými okrajovými podmínkami a tím zaručit realistické namáhání stěny. Za předpokladu dopadu dveří ve středu železobetonové stěny stačí modelovat jen symetrickou čtvrtinu konstrukce, což významně sníží výpočetní náročnost úlohy.

### 6.3.6 Zatížení konstrukcí

Při **řešení účinků tlakové vlny** je přijat předpoklad, že tlak v zaplavené ŠR není podstatně ovlivněn zatečením tlakové vlny do přístrojového tunelu. Za definici tlakové vlny volíme pro tuto metodiku pravoúhlý puls s tlakem 20 MPa a trváním 10 ms, který je přibližně obálkou průběhu tlaku ve výšce 1,7 m nad dnem šachty v simulaci [17], viz Obrázek 24.



Obrázek 24: Vývoj tlaku a impulsu v simulaci [17]

V této simulaci se předpokládalo centrální protavení reaktorové nádoby a osově symetrická parní exploze. Délka pulsu tlakové vlny je cca 15 m při rychlosti vlny ve vodě 1500 m/s. Takto zjednodušený puls odpovídá přibližně nejsilnějšímu impulsu ze simulací OECD-SERENA 1 [18].

Za účelem **stanovení únosnosti kotvících prvků hermetizačních dveří** mohou být tyto prvky zatíženy zvětšujícím se posunem. Únosnost se pak zjistí jako maximální vypočtená síla.

Při řešení **pohybu hermetizačních dveří** je dveřím udělena počáteční rychlost, která vychází z řešení účinků tlakové vlny. Tuto rychlost je možné snížit v důsledku ztráty energie, která je potřeba pro porušení kotvících prvků (pantů a zámků) hermetizačních dveří. Velmi pravděpodobná hodnota počáteční rychlosti činí 26 m/s.

Způsob **zatížení železobetonové bariéry** se liší v závislosti na použitém přístupu. U kvazistatického výpočtu může být zatížení předepsáno vodorovným posunem. Z výpočtu se stanoví množství vykonané práce, které lze porovnat s energií dveří před nárazem. V případě dynamického výpočtu je nejprve potřeba provést zjednodušení a převést celkovou kinetickou energii letících dveří na jejich ekvivalentní rychlost dostředného pohybu. Tato rychlost je pak předepsána jako počáteční rychlost ve výpočtu MKP.

Svislé zatížení železobetonové stěny konstrukcemi shora není třeba ve výpočtu uvažovat. Svislý tlak způsobuje příčné sevření betonu a tím i jeho vyšší únosnost a duktilitu. Výpočtem bez svislého zatížení je získána konzervativní hodnota únosnosti.

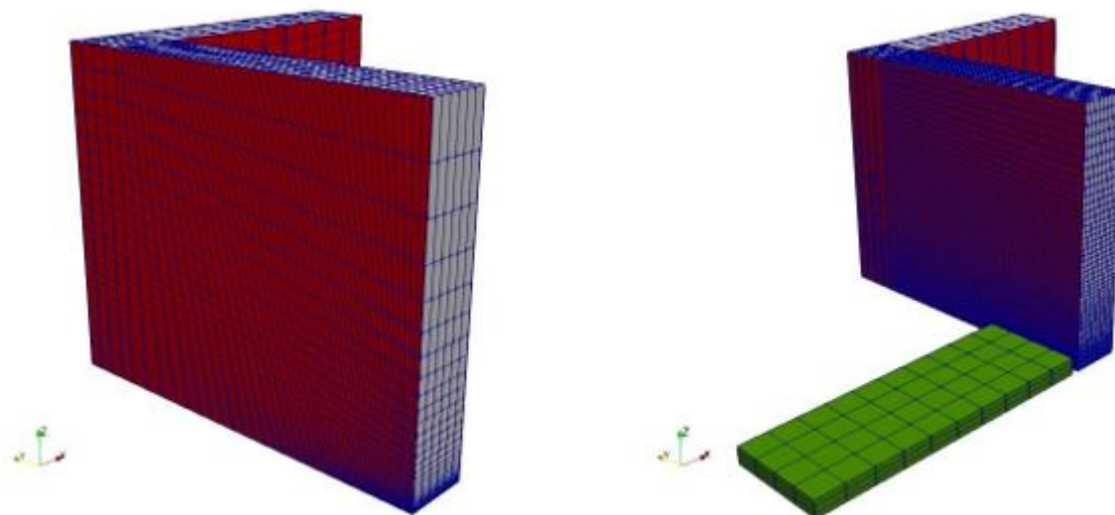
### 6.3.7 Stanovení vhodných výpočetních metod

Vzhledem k množství zjednodušujících předpokladů lze **řešení účinků tlakové vlny** na hermetizační dveře provést analyticky.

Stanovení **únosnosti kotvících prvků hermetizačních dveří** lze provést MKP, v tom případě a při řízení posunem lze využít algoritmus Newton-Raphson. Druhou možností je jednoduchý ruční výpočet, který dá velmi dobrý odhad únosnosti a disipované energie, neposkytne ovšem informace o počáteční tuhosti závěsů.

Účinek nárazu dveří na dráhu revizního přístroje lze za zjednodušujících předpokladů určit analyticky z bilance hybnosti, momentu hybnosti a rovnice dynamické rovnováhy. Úloha **pohybu dveří** po nárazu na podlahu není triviální, a i po zavedení řady zjednodušujících předpokladů je jednodušší výslednou rovnici integrovat numericky.

Při výpočtu **nárazu dveří** MKP v režimu nelineární statiky lze využít algoritmus Newton-Raphson, neboť úlohu lze řídit přímo posunem. Dynamický výpočet MKP lze provést explicitně nebo implicitně. Při explicitním výpočtu je nutné volit velmi krátký časový krok, oproti tomu v implicitním výpočtu je nutné iterovat v rámci jednoho časového kroku, což by v konkrétním případě s velmi podrobným výpočetním modelem mohlo vést k vysokým nárokům na výpočetní čas. Proto se v tomto případě jeví jako výhodnější explicitní výpočet.



*Obrázek 25: Varianty výpočetního modelu železobetonové stěny pro kvazistatický (vlevo) a dynamický (vpravo) výpočet*

### 6.3.8 Vyhodnocení výsledků

Z vypočtených simulací je potřeba vyhodnotit:

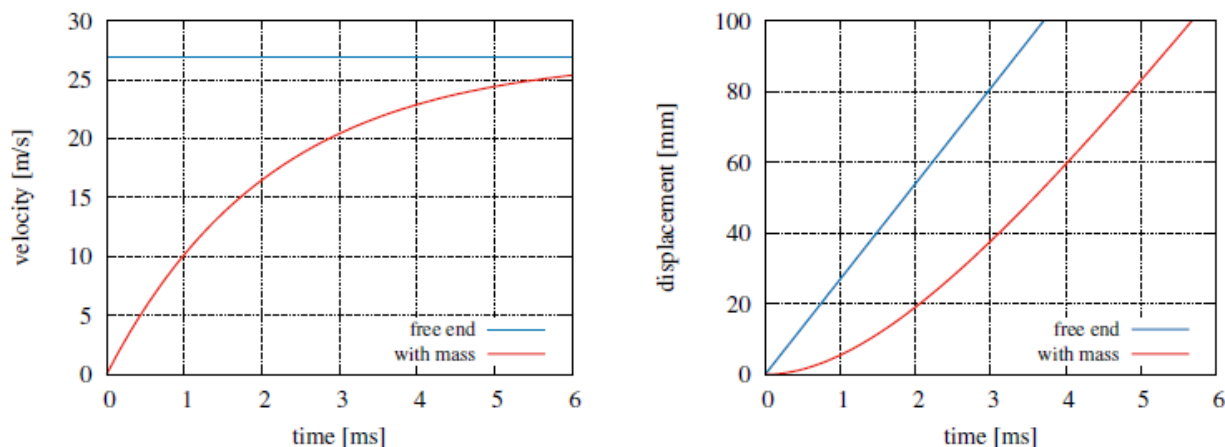
- 1) rychlost pohybu hermetizačních dveří způsobeného nárazem tlakové vlny parní exploze;
- 2) bilanci namáhání hermetizačních dveří a únosnosti kotevních prvků hermetizačních dveří, v případě jejich selhání dále stanovení úbytku kinetické energie hermetizačních dveří;
- 3) pravděpodobné místo a energii nárazu hermetizačních dveří do železobetonové bariéry;
- 4) únosnost železobetonové bariéry na účinek nárazu hermetizačních dveří;
- 5) energii, kterou letící předměty mají v případě, že dojde k proražení železobetonové bariéry.

Výsledky analytického vyjádření **odezvy hermetizačních dveří** (v podobě jejich rychlosti a posunu) **na účinky tlakové vlny** jsou znázorněny viz Obrázek 26. Modrou barvou je vyznačena odezva pro nehmotné dveře (nerealistický a silně konzervativní předpoklad), červenou barvou pro výpočet se skutečnou hmotností dveří. V grafech je čas 0 okamžik nárazu čela vlny na dveře. Po 5 ms je posunutí asi 8 cm, což otevírá otvor této šířky po obvodu dveří, kudy voda uniká do volného prostoru místnosti za dveřmi. Vlnovod přestává fungovat, ale rychlost v tomto okamžiku již téměř neroste, je rovna cca 26 m/s. Tuto rychlost lze považovat

# T A Č R

za horní mez počáteční rychlosti dveří jejich dalšího pohybu. Vzhledem k nejistotám svázaným s výpočtem zatížení je ale potřeba brát stanovenou rychlost se značnou rezervou.

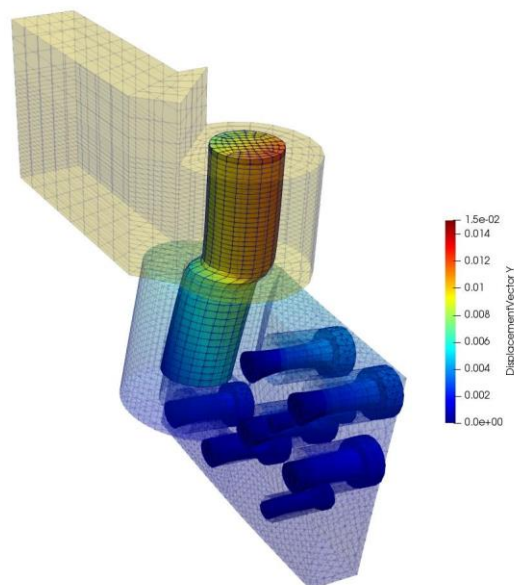
Přesnější výpočet by vyžadoval 3D hydrodynamický model neustáleného proudění, což není adekvátní nejistotě v definici zatížení.



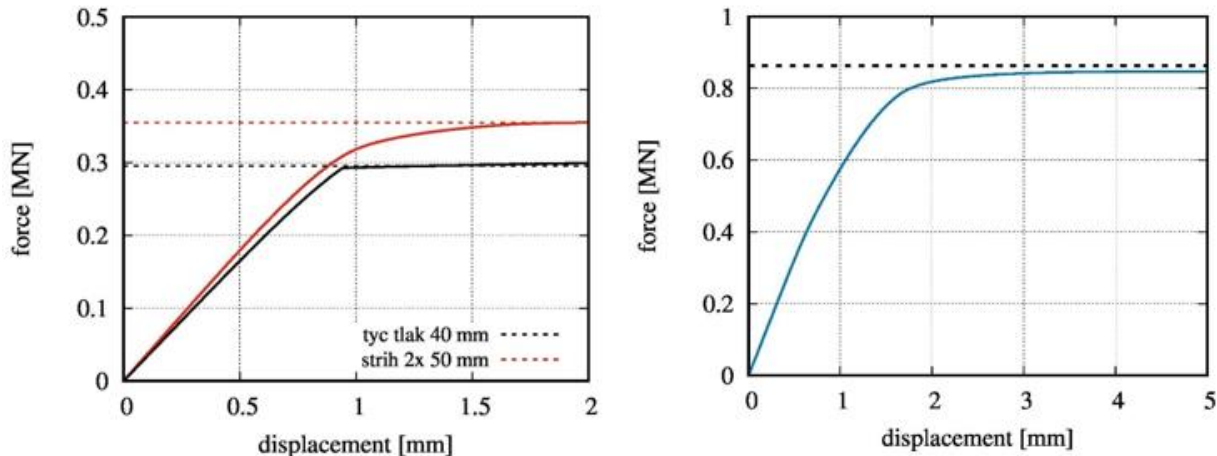
**Obrázek 26: Vývoj rychlosti a posunu hermetických dveří pro dva idealizované případy**

Pracovní diagramy **kotevních prvků** (pantu a zámku), které odrážejí závislost přenášené síly na předepsaném posunu, jsou ilustrovány viz Obrázek 28. V obrázcích jsou výsledky získané 3D statickým, materiálově i geometricky nelineárním MKP výpočtem porovnány s ručním výpočtem, ve kterém figurují pouze základní dimenze kotevních prvků. Z porovnání je zřejmé, že vzhledem k jasnému namáhání kotevních prvků a jejich jednoduché konstrukci, není nutné provádět komplexní a časově náročný výpočet, zejména pokud je cílem jen stanovení únosnosti nebo odhad množství disipované energie potřebné k porušení těchto prvků. V obou případech je potřeba vyjít z reálných hodnot pevnosti a tažnosti. Při jejich absenci lze konzervativní hodnotu stanovit za předpokladu oceli S235 a tažnosti okolo 30 %. Pro výpočet disipační kapacity je (v případě MKP i ručního výpočtu) dále nutné učinit odhad o objemu, ve kterém se odehrává plastické přetváření.

Panty a zámky jsou zanedbatelné jak z hlediska zadržovací síly, tak i z pohledu disipační kapacity kotevních prvků vůči kinetické energii dveří. Odolnost konstrukce představuje cca 3 % zatížení. Z tohoto důvodu lze při výpočtu pohybu dveří oprávněně zanedbat odpor pantů a zámků (viz příloha č. 3 - Účinek parní exploze v ŠR na hermetické dveře).



Obrázek 27: Deformovaný tvar pantu v MKP modelu



Obrázek 28: Pracovní diagram pantu (vlevo) a zámků (vpravo) držících hermetické dveře. Plné čáry představují výsledky MKP, čárkovaná čára výsledků ručního výpočtu

Po vytržení pantů a zámků letí dveře vodorovnou translační rychlostí stanovenou v první etapě výpočtu,  $u_0=26$  m/s. Následně dveře narazí svou spodní částí do dráhy přístroje pro periodickou kontrolu TNR a začnou rotovat. Horní hrana dveří narazí ve vzdálenosti asi 4 m od počáteční polohy do dráhy shora. Stav dráhy po prvním nárazu se nedá zjistit, předpokládáme, že dveře dráhu snadno prolomí a jejich další let to podstatně neovlivní. Tento předpoklad je z hlediska účinku na bariéru konzervativní, ve skutečnosti se na prolomení dráhy spotřebuje energie, kterou ale nelze zjistit jakýmkoli výpočtem. Ve vzdálenosti asi 8 m dopadne dolní hrana dveří na podlahu. Tento kontakt ovšem zanedbat nelze, jde o náraz na více než 2 m



tlustou železobetonovou desku podepřenou stěnami spodních komor obestavby kontejnmentu. Po nárazu se dveře otáčejí kolem bodu dopadu, dokud je svislá složka kontaktní síly tlakem a potom letí dále volným letem k bariéře, na kterou dopadnou horní hranou. Letové fáze se dají integrovat analyticky, pro fázi/e kontaktu s podlahou je nutná numerická integrace.

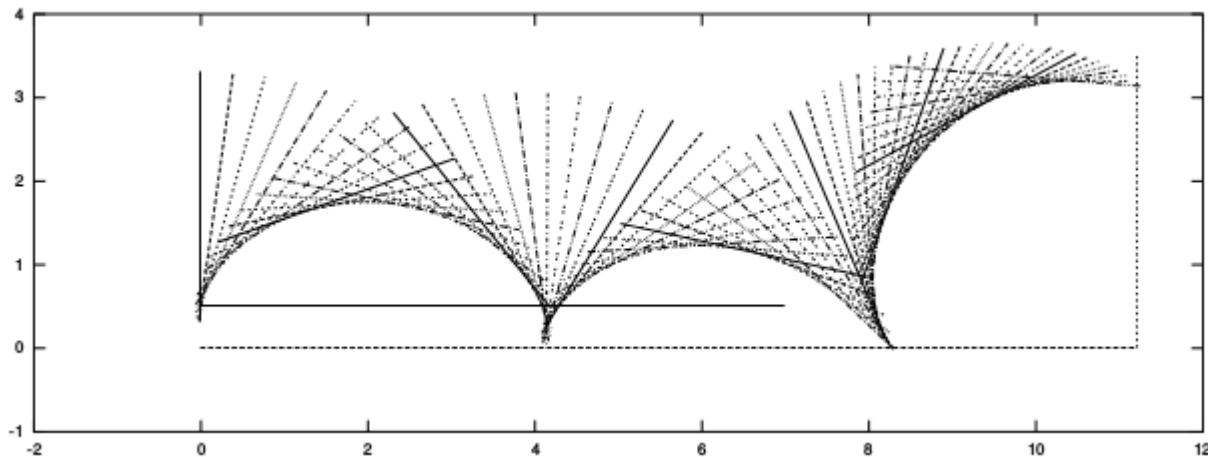
**Tabulka 10: Řešení v okamžiku nárazu dveří na stěnu**

$u_0$		poloha těžiště a úhel				čas a bod nárazu na stěnu			rychlosti a kinetická energie			
		$x_t$	$y_t$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$t$	$x$	$y$	$\dot{x}_t$	$\dot{y}_t$	$\dot{\varphi}$	$w_{kin}$
26	plast.	9.87	3.12	-0.069	-0.997	0.72	11.37	3.01	8.87	5.50	-8.167	1704
	elast.	9.97	3.45	-0.155	-0.989	0.62	11.45	3.22	13.78	11.15	-12.68	4110
30	plast.	9.91	2.69	0.209	-0.977	0.54	11.38	3.00	14.27	8.09	-11.53	3395
	elast.	9.82	2.69	0.278	-0.960	0.50	11.26	3.11	17.99	11.02	-14.53	5392
20	plast.	9.75	0.46	0.150	0.988	1.38	11.23	0.68	3.45	-4.56	-2.84	206
	elast.	10.14	6.34	-0.60	0.801	1.02	8.95	5.44	6.45	8.42	-9.99	2551

Jak je ilustrováno viz Tabulka 10 (specifikace veličin a bližší popis k Tabulka 10 je uveden v příloze č. 3 - Účinek parní exploze v ŠR na hermetické dveře), výsledky výpočtů jsou silně citlivé na hodnotu počáteční rychlosti dveří a také na předpokladu o chování při kontaktu dveří s podlahou. Pro ocenění citlivosti parametrů dopadu na bariéru na těchto dvou nejistých faktorech jsou v tabulce shrnuty výsledky šesti variant s počátečními rychlostmi 26, 20 a 30 m/s a s elastickým/plastickým nárazem na podlahu. Plastický náraz je extrém na straně nebezpečné, elastický náraz je extrém na straně konzervativní. Striktně vzato, elastický náraz a setrvalý kontakt při otáčení kolem bodu dopadu se vzájemně vylučují, ale pro konzervativní odhad rychlosti otáčení je rovnost energie před a po dopadu přijatelná.

Pro počáteční rychlost 26 m/s a pružný náraz do podlahy je pohyb letících dveří znázorněn viz Obrázek 29, kde je let rozfázován po 0,02 s, plná čára vyznačuje těžišťovou osu dráhy, čárkovaně je označena podlaha a zadní stěna. Místo dopadu je přibližně v polovině výšky stěny.

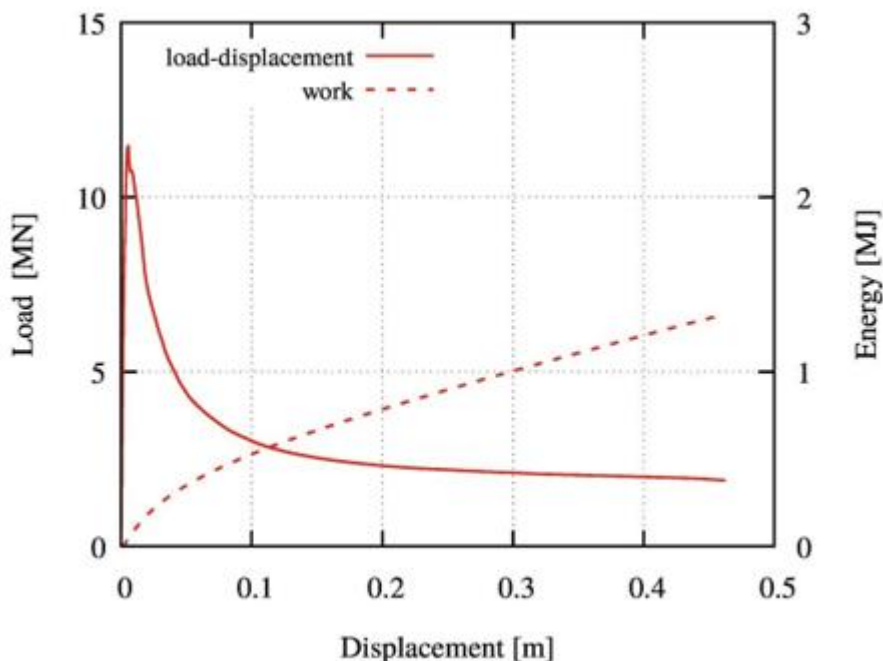
Všechny numerické a grafické výsledky je třeba chápat jako ilustraci funkce algoritmů a skriptu a hrubý odhad toho, co se s dveřmi děje. Nejvýznamnější nejistoty simulace jsou vstupní rychlost dveří a vlastnosti kontaktu při dopadu na podlahu.



**Obrázek 29: Rozfázovaný let hermetických dveří pro počáteční rychlost 26 m/s a předpoklad pružného nárazu**

Při uvážení pružného nárazu se před nárazem hermetizačních dveří do železobetonové stěny pro všechny uvažované počáteční rychlosti kinetická energie dveří sníží o cca 30 % počáteční hodnoty. Za předpokladu plastického nárazu jsou rozdíly úbytku energie větší, 40-70 %. Pro předpokládanou rychlost 26 m/s je průměrná hodnota kinetické energie 2,907 MJ, což činí 51 % původní hodnoty.

Po **nárazu dveří do železobetonové bariéry** dojde ke vzniku smykové plochy kolem oblasti nárazu a k vylomení středové části stěny. Kvazistatický výpočet dokládá strmý pokles únosnosti brzy po vzniku první trhliny, viz Obrázek 30. V tomto grafu je vyneseno vztah síly a vykonané práce v závislosti na předepsaném posunu (velikosti síly odpovídá levá svislá osa, hodnotě vykonané práce pravá svislá osa). Duktilní chování závisí jen na tažnosti oceli, která bude klesat s rychlostí zatěžování. Při vodorovném posunu 0,5 m nedosahuje množství disipované energie ani poloviny požadované hodnoty. Jako reálný limit průhybu, který lze považovat za stav odpovídající porušení konstrukce, lze akceptovat hodnotu 0,3 m, která koresponduje poměru vodorovného posunu vůči výšce konstrukce 5 %.



Obrázek 30: Výsledek kvazistatického výpočtu – závislost síly a vykonané práce na posunu

Odezva železobetonové bariéry na zatížení účinky letících dveří je velmi podobná v případě kvazistatického i dynamického výpočtu. Oba přístupy ukazují, že železobetonová stěna nedokáže zastavit náraz letících dveří. Dynamický výpočet dokládá velmi malý pokles rychlosti dveří, a tedy nízký pokles kinetické energie.

### 6.3.9 Stanovení, zda může dojít k porušení integrity ochranné obálky

Tato část metodiky poskytuje obraz účinku tlakové vlny parní exploze v ŠR na hermetické dveře a následné zatížení ochranné bariéry. Analýza je s ohledem na nejistoty v zatížení navržena s konzervativními hodnotami parametrů a s řadou velmi zjednodušujících předpokladů.

Tato část metodiky má dvě hlavní fáze:

- Stanovení kinetické energie hermetických dveří a z toho vyplývající zatížení ochranné bariéry. Za předpokladu, že bude k dispozici lepší popis parní exploze, bude možné zde uvedeným postupem (s přihlédnutím k postupu popsanému v příloze č. 3 této metodiky) dosáhnout výrazného zlepšení výsledků.
- Odolnost železobetonové konstrukce ochranné bariéry. Model železobetonu je založen na konstitutivních vztazích, které reprezentují současné nejlepší znalosti. Nelze předpokládat, že by zde v dohledné době došlo k významnému pokroku.

**T A**

**Č R**

Provedené analýzy naznačují, že dveře s vysokou pravděpodobností prorazí železobetonovou bariéru (stínící stěnu uvnitř kontejnmentu) a dostanou se do kontaktu s hermetickou obálkou kontejnmentu.

Pokud by došlo k zesílení ochranné bariéry, tato metodika může posloužit pro návrh tohoto zesílení.

Dalšího zpřesnění stanovení rizika je možné především využitím pravděpodobnostního přístupu (nebo jiného odhadu nejistot) zejména pro průběh tlaku v tlakové vlně a pro analýzu letu dveří.

T A

Č R

## 7 Vyhodnocení nejistot vstupů

Při vlastním posouzení stavebních konstrukcí jsou nejistoty popsány standardním způsobem, který používají normy. Protože se jedná o silně nelineární chování stavebních konstrukcí, je třeba počítat s charakteristickými hodnotami a bezpečnost vyjádřit až pomocí součinitele u finálních hodnot. Charakteristické hodnoty jak pro beton, tak pro ocel jsou stanoveny na základě statistických hodnocení. Největší nejistota v předložené metodice je zatížení tlakovou vlnou parního výbuchu. Pro rámcové vyjádření nejistoty jsou použity dva zdroje, popisující parní výbuch. V OECD projektu SERENA 1 [18] bylo provedeno 6 nezávislých simulací, Leskovar/Ursic [18] publikovali další. Časový průběh tlaku použitý v části Konstrukce vnitřních vestaveb kontejnmentu ŠR je zjednodušený průběh tlaku stanovený jako nejnepríznivější z 6 simulací SERENA 1. Při posuzování účinku na ocelové hermetizační dveře je použita simulace Leskovar/Ursic. Průběh tlaku a impulsu je v metodice uveden. Nejistota se tím zmenšuje, i když simulace Leskovar/Ursic patrně nejsou zcela nezávislé na výsledcích projektu SERENA 1.

Z hlediska odezvy stavebních konstrukcí je důležitý celkový impuls, tj. časový integrál tlaku. Ten se pro obě použítá zatížení prakticky shoduje. Obdélníkový tvar časové funkce tlaku má tu výhodu, že integraci vlnové rovnice lze provést analyticky a výsledek je v uzavřeném tvaru, k dispozici kdykoli při změně parametrů zatížení (podrobnosti viz Příloha metodiky).

## 8 Závěr

V metodice byl popsán postup výpočtu pro stanovení odezvy železobetonových a předpjatých konstrukcí bloků VVER 1000 na extrémní dynamická zatížení vznikající při parní explozi uvnitř ŠR. Metodika se věnovala stanovení vhodného postupu výpočtu. „Krok za krokem“ provedla čtenáře výběrem vhodných podkladů pro stanovení zatížení vznikajícího při této TH, volbou vhodných materiálových modelů pro výpočet, popisem tvorby numerických modelů jednotlivých konstrukcí bloku VVER 1000, jejich výpočtem a vyhodnocením získaných výsledků.

Na základě této metodiky je možné provést komplexní analýzu železobetonových a předpjatých konstrukcí bloků VVER 1000 na extrémní dynamická zatížení vznikající při parní explozi uvnitř ŠR a stanovit z ní vyplývající rizika pro jednotlivé konstrukce bloku.

## 9 Seznam použité literatury

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Div 1 a Div 2, The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [2] Bažant, Z. P. a Oh, B. H., Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Materials and Structures*, 16, RILEM, 1983, 155-177.
- [3] CASH Benchmark, [www.benchmark-cash.org](http://www.benchmark-cash.org), OEDC-NEA, (Nuclear Energy Agency), Benchmark on the beyond design capacity of reinforced concrete walls, 2019.
- [4] Collins, M.P., Vecchio, F., Melhorn, G. – An International Competition to Predict the Response of Reinforced Concrete Panels, Festschrift Prof. Dr. Bruno Thurlimann, ETH Zurich 1983, pp. 471-491
- [5] Collins, M.P., et al.: Challenge of Predicting the Shear Strength of Very Thick Slabs. *Concrete International*, V.37, No.11, Nov. 2015, pp 29-37.
- [6] Červenka, J., Nonlinear Analysis of Pre-stressed Concrete Nuclear Containments, Nordic Concrete Research, Proc. of XXI Nordic Concrete research Symposium, Hämeenlinna, Finland 30.5-1.6.2011, ISBN 978-82-8208-025-5, ISSN 0800-6377. pp.437-440.
- [7] Červenka, J., Janda, Z., Jendele, L., Pukl, R., Červenka, V., 2017, „ Simulation of Severe Accident Scenarios in Nuclear Containments v online časopise *Procedia Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.097>.
- [8] Červenka, J., Jendele, L., Červenka, V. ATENA Program documentation. Červenka Consulting, [www.cervenka.com](http://www.cervenka.com), 2019.
- [9] Červenka, J., Papanikolaou, V.: Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete. *Int. J. of Plasticity*, Vol. 24, 12, 2008, ISSN 0749-6419, pp. 2192-2220.
- [10] Červenka, V., Červenka, J., Kadlec, L.: Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures - *Structural Concrete Journal fib*, Journal of International Federation for Structural Concrete, DOI: 10.1002/suco.201700287, 2018;1–13.
- [11] Červenka, V., Červenka, J., Sajdlová, T., Pukl, R. Uncertainty of predicting shear strength, (2017) *Solid State Phenomena*, 259 SSP, pp. 244-248. 10.4028/www.scientific.net/SSP.259.244.
- [12] FIB bulletin 65: Model Code 2010 - Final draft, Vol 1. Ernst & Sohn, ISBN 978-2-88394-105-2, March 2012..
- [13] Hordijk, D. A., Local Approach to Fatigue of Concrete, doktorská práce, Technická univerzita Delft, Nizozemsko, 1991, ISBN 90/9004519-8.
- [14] Janda, Z., Červenka, J., Numerická analýza tlakové zkoušky experimentálního kontejnmentu v laboratořích BARC, Indie, Konference o bezpečnosti komponent jaderných zařízení, Srní 2011, Česká Republika.
- [15] Jendele, L., Červenka, J., Finite element modelling of reinforcement with bond, *Computers and Structures* 84 (2006) 1780–179.

- [16] von Mises, R. (1913). Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. Göttin. Nachr. Math. Phys., vol. 1, pp. 582–592.
- [17] Leskovar, M., Ursic, M., Estimation of Ex-vessel Steam Explosion Pressure Loads. Nuclear Engineering and Design, 239:2444-2458, 2009.
- [18] Hong, S-W, Piluso, P., Leskovar, M., Status of the OECD-SERENA Project for the Resolution of Ex-vessel Steam Explosion Risks, Journal of Energy and Power Engineering 7 (2013) 423-431.
- [19] Grassl, P., Jirásek, M., Damage-plastic model for concrete failure. International Journal of Solids and Structures, 43(22):7166–7196, 2006.
- [20] Grassl, P., et al., CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. International Journal of Solids and Structures, 50(24):3805-3816, 2013.
- [21] Grassl, P., Nystrom, U., Rempling, R., Gylltoft, K., A damage-plasticity model for the dynamic failure of concrete. Eurodyn 2011, 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven Belgium, 2011.
- [22] Patzák B., OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures. Acta Polytechnica, 52(6):59–66, 2012..
- [23] Veselý, V., Parametry betonu pro popis lomového chování. Ústav stavební mechaniky, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2004.
- [24] ABAQUS, ABAQUS Documentation, Dassault Systemes, Providence, RI, USA, 2011.
- [25] ANSYS, Theory Guide, 2019.
- [26] Denk, L., Výpočet nehod se ztrátou chladiva v ochranné obálce JE Temelín s výkonem reaktoru zvýšeným na 104% pro určení jejich radiačních následků. Zpráva ÚJV č. Z 3107 T, 2011.
- [27] VOS, E., Influence of Loading Rate and Radial Pressure on Bond in Reinforced Concrete, Dissertation, Delft University, pp. 219-220, 1983.

## 10 Seznam publikací předcházejících této metodice

Bittnar, Z., Havlasek, P., Patzak, B., Stepan, J., Comparison of predicted and measured data of prestressed containmet long term deformation. CMNCC, Toronto, Canada, 2017.

Červenka, J., Janda, Z., Jendele, L., Pukl, R., Cervenka, V., Simulation of Severe Accident Scenarios in Nuclear Containments. Publikováno v online časopise Procedia Engineering, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.097>.

## 11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Kritérium pro tlakové porušení betonu v trojosé napjatosti a jednoosý pracovní diagram, $\sigma_1$ , $\sigma_2$ , $\sigma_3$ značí hlavní napětí, $\sigma_0$ , $\tau_0$ označují hydrostatické a oktaedrické smykové napětí, $E_s$ je sečnový modul pružnosti, ostatní veličiny viz Tabulka 1 .....	12
Obrázek 2: Model rozetřených trhlin pro tahové chování betonu.....	13
Obrázek 3: Multi-lineární pracovní diagram výztuže .....	15
Obrázek 4: Modelování předpínacích lan, a) předpínací lana ve stěně, b) předpínací lana ve střeše .....	17
Obrázek 5: Pracovní diagram a plocha plasticity dle Von Mises [16].....	18
Obrázek 6: Numerický model kontejnmentu tvoří: a) skořepinové prvky pro stěnu, střešní kopuli a zesílení okolo otvorů, b) 3D objemové prvky pro suterén, věnec a výplně otvorů, c) 2D membránové prvky pro ocelovou vystýlku d) model předpínacích kabelů z tyčových prvků .....	22
Obrázek 7: Zobrazení vrstev skořepinového prvku a vrstvy výztuže .....	23
Obrázek 8: Doporučené umístění senzorů .....	24
Obrázek 9: Vývoj teplot při průběhu havárie LOCA. Převzato z [26]. .....	26
Obrázek 10: Schéma nelineárního řešení MKP.....	27
Obrázek 11: Vypočtený zatěžovací diagram konstrukce JE Temelín (viz příloha č. 1) .....	30
Obrázek 12: Pracovní diagram betonu při jednoosém zatížení v tahu (a) a tlaku (b) pro numerický materiálový model Concrete Damaged plasticity [24].....	36
Obrázek 13: Rozdílné materiálové modely (barevně odlišeny) na ŠR a okolních vestavbách v JE Temelín .....	37
Obrázek 14: Konstantní souřadný systém [24] .....	38
Obrázek 15: Radiální souřadný systém [24].....	39
Obrázek 16: Příklad použití skořepinových prvků a nadefinování výztuže pomocí rebar layers u ŠR JE Temelín (viz příloha č. 2).....	39
Obrázek 17: Síť konečných prvků (model ŠR a vestaveb JE Temelín) .....	41
Obrázek 18: Konečné 3D prvky [25] .....	42
Obrázek 19: Příklad zjemnění sítě konečných prvků na ŠR v JE Temelín .....	43
Obrázek 20: Zatěžovací křivka havárie [18] .....	44
Obrázek 21: Aplikace zatížení explozí na vnitřní stěny ŠR.....	45
Obrázek 22: Formování nelineární zóny v kvazikřehkém materiálu a) zatěžovací diagram taženého vzorku, b) schematické znázornění pochodu v neelastické zóně, c) rozdělení napětí po délce nelineární zóny. [23] .....	47
Obrázek 23: Výpočetní modely kotevních prvků držících hermetizační dveře .....	51
Obrázek 24: Vývoj tlaku a impulsu v simulaci [17].....	52
Obrázek 25: Varianty výpočetního modelu železobetonové stěny pro kvazistatický (vlevo) a dynamický (vpravo) výpočet.....	54
Obrázek 26: Vývoj rychlosti a posunu hermetických dveří pro dva idealizované případy.....	55
Obrázek 27: Deformovaný tvar pantu v MKP modelu .....	56
Obrázek 28: Pracovní diagram pantu (vlevo) a zámků (vpravo) držících hermetické dveře. Plné čáry představují výsledky MKP, čárkovaná čára výsledek ručního výpočtu .....	56
Obrázek 29: Rozfázovaný let hermetických dveří pro počáteční rychlost 26 m/s a předpoklad pružného nárazu.....	58
Obrázek 30: Výsledek kvazistatického výpočtu – závislost síly a vykonané práce na posunu.....	59



**T A**

**Č R**

## 12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry materiálového modelu pro beton (Cementitious 2).....	13
Tabulka 2: Materiálové parametry předpínací výztuže .....	16
Tabulka 3: Materiálové parametry betonářské výztuže .....	18
Tabulka 4: Materiálové parametry ocelové vystýlky .....	19
Tabulka 5: Intervaly zatížení při posouzení kontejnmentu.....	28
Tabulka 6: Doporučený seznam posuzovaných veličin v numerické analýze .....	29
Tabulka 7: Kritéria pro splnění integrity kontejnmentu .....	32
Tabulka 8: Kritérium pro splnění integrity kontejnmentu dle ASME [1] .....	33
Tabulka 9: Seznam použitých veličin pro Obrázek 12 .....	36
Tabulka 10: Řešení v okamžiku nárazu dveří na stěnu.....	57
Tabulka 11: Seznam příloh.....	67

T A

Č R

## 13 Seznam zkratek

ASME	American society of mechanical engineers
AZ	aktivní zóna
BSVP	bazén s vyhořelým palivem
CDPM	concrete damage-plasticity materiál
CMOD	otevření trhliny
ČSN	Česká technická norma
DEC	design extension conditions
EC	Eurokód
ExVC	ex-vessel coolability
FIB	The International Federation for structural Concrete
IO	primární okruh
IU	iniciační událost
IVR	in-vessel retention
JE	jaderná elektrárna
LOCA	loss of coolant accident (ztráta primárního chladiva)
MKP	metoda konečných prvků
OECD	Organisation for economic co-operation and development
SERENA	steam explosion resolution for nuclear applications
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ŠR	šachta reaktoru
TH	těžká havárie
TNR	tlaková nádoba reaktoru
VVER	vodo-vodní energetický reaktor

**T A**

**Č R**

## 14 Seznam příloh

*Tabulka 11: Seznam příloh*

<b>Příloha č.</b>	<b>Název</b>
1	Analýza odezvy kontejnmentu na extrémní zatížení v programu ATENA (111 s)
2	Dynamická analýza na zatížení parní explozí uvnitř šachty reaktoru (58 s)
3	Účinek parní exploze v šachtě reaktoru na hermetické dveře (31 s)