

---

# A KIEMELTEN FONTOS RENDSZEREK ÉS RENDSZERELEMEK TERVEZÉSE

A konténment és rendszerei

A konténment konstrukciós kialakítása és szerkezeti  
integritása

Katona Tamás János

2015.

## Tartalomjegyzék

|   |    |
|---|----|
| 1. A konténment.....  | 5  |
| 2. A konténment tervezési alapja .....                            | 7  |
| 2.1. Funkcionális követelmények .....                             | 7  |
| 2.2. Biztonsági osztályba sorolás.....                            | 7  |
| 3. A terhek.....  | 8  |
| 3.1. A funkcióból adódó tervezési paraméterek megállapítása ..... | 9  |
| 3.2. Biztonsági szelepek működése .....                           | 11 |
| 3.3. Üzem közbeni tranziensek.....                                | 11 |
| 3.4. A LOCA utáni állapot.....                                    | 11 |
| 3.5. A külső veszélyek figyelembe vétele .....                    | 11 |
| 3.5.1. Általános követelmények.....                               | 11 |
| 3.5.2. Földrengés .....   | 11 |
| 3.5.3. Repülőgép rázuhanás .....                                  | 17 |
| 3.5.4. Robbanás.....  | 24 |
| 3.5.5. Repülő tárgy.....  | 25 |
| 3.5.6. Meteorológiai szélsőségek.....                             | 25 |
| 3.6. A belső veszélyek figyelembe vétele.....                     | 28 |
| 3.7. A környezeti körülmények figyelembevétele.....               | 28 |
| 4. A teherkombinációk .....                                       | 29 |
| 5. Az anyagválasztás.....   | 34 |
| 6. A megfelelőség megítélése.....                                 | 35 |
| 7. A „cliff-edge” effektus, határterhelés .....                   | 36 |
| 8. A megfelelőség ellenőrzése, a konténment próbák.....           | 40 |
| 9. Konténment funkció súlyos balesetek esetén .....               | 41 |
| 10. Konstrukció, tervezési sajátosságok .....                     | 43 |
| 11. Építhetőség, szerelhetőség, kiszolgálhatóság .....            | 46 |
| 12. Irodalom.....   | 50 |

## Táblázatok

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| 1. táblázat  | Nyomottvizes reaktórok konténment típusai .....   | 5  |
| 2. táblázat  | A konténment terhelési esetei.....  | 8  |
| 3. táblázat  | Az EPR (UK) konténment tervezési alap-paraméterei.....                                  | 9  |
| 4. táblázat  | Az 1-5 kategóriára meghatározott inhomogén térbeli fajlagos lezuhanási gyakoriság ..... | 17 |
| 5. táblázat  | Repülőgép lezuhanási és ráuhanási gyakoriságok az új blokkok esetében.....              | 18 |
| 6. táblázat  | A 3. kategóriába tartozó repülőgépek adatai .....                                       | 18 |
| 7. táblázat  | Paks2 esetében TAK-ként kezelt repülőgép ráuhanás – gépadatok.....                      | 19 |
| 8. táblázat  | A meteorológiai szélsőségek jellemzői.....  | 25 |
| 9. táblázat  | A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzői (Paks2, Balti EBJ, US NRC).....            | 26 |
| 10. táblázat | A tornádó által sodort tárgyak jellemzői (Regulatory Guide 1.76).....                   | 27 |
| 11. táblázat | Szél által sodort tárgyak jellemzői az UK-EPR esetén .....                              | 27 |
| 12. táblázat | Példa a tervezésnél figyelembe veendő meteorológiai körülményekre.....                  | 29 |
| 13. táblázat | A terhek a vasbeton konténment tervezésénél (ASME Section III, Table CC-3230-1).....    | 29 |
| 14. táblázat | A konténment teherkombinációi .....   | 30 |
| 15. táblázat | Konténment teherkombinációk az orosz előírások szerint.....                             | 30 |
| 16. táblázat | Terhelés-kombináció a konténment tervezésénél (NAÜ NS-G-1.10) .....                     | 31 |
| 17. táblázat | Terheléskombinációk az EUR szerint .....  | 32 |
| 18. táblázat | Konténment teherkombinációk az orosz előírások szerint – Balti EBJ .....                | 33 |
| 19. táblázat | A feszítő pászmák anyagjellemzői a referencia terv szerint.....                         | 34 |
| 20. táblázat | A terhelési esetek és megengedett konténment állapotok az EPR esetében .....            | 36 |
| 21. táblázat | Az AP1000 Europe terhelhetősége belső nyomásra .....                                    | 38 |
| 22. táblázat | A korszerű EPR és AP1000 konténmentek fő jellemzői .....                                | 43 |
| 23. táblázat | Az orosz terv szerint kettős konténment alapadatai .....                                | 45 |

## Ábrák

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1. ábra | Kettősfalú konténment sémája, olvadékcspárával (NAÜ NS-G-1.10) .....          | 6  |
| 2. ábra | A reaktorépület osztályba sorolása az orosz normák szerint.....               | 8  |
| 3. ábra | Az EPR (UK) konténment funkcióból adódó tervezési alapja .....                | 10 |
| 4. ábra | A burkoló elv alkalmazása az EPR (UK) konténment tervezési alapja esetén..... | 10 |
| 5. ábra | Szabványos válaszspektrumok (laza talaj).....                                 | 12 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 6. ábra  | A balti és a Paksi Atomerőmű földrengés tervezési alapja.....                                  | 13 |
| 7. ábra  | Az épület és a főberendezések földrengés tervezési alapja (Balti EBJ) .....                    | 14 |
| 8. ábra  | Általánosított épület válaszspektrum a reaktor alátámasztásánál.....                           | 14 |
| 9. ábra  | A főépület végeelem modellje az épület válaszának meghatározására .....                        | 15 |
| 10. ábra | A balti és a paksi telephely talajmechanikai jellemzői.....                                    | 16 |
| 11. ábra | Repülőgép ütközés terhelési diagram az EUR szerint .....                                       | 20 |
| 12. ábra | Az EPR tervezésénél alkalmazott terhelés diagramok .....                                       | 20 |
| 13. ábra | A balti atomerőmű tervezésénél alkalmazott terhelési diagram.....                              | 21 |
| 14. ábra | Repülőgép rázuhanási jellemzők a PiN AE-5.6 szerint.....                                       | 21 |
| 15. ábra | A hard missile hatás-típusai .....   | 22 |
| 16. ábra | Jellemző geometriai méretek nagy polgári repülőgép rázuhanásánál (EPR).....                    | 22 |
| 17. ábra | A földrengés és repülőgép rázuhanása által gerjesztett rezgés válaszspektruma (EPR).....       | 23 |
| 18. ábra | A repülőgép rázuhanás okozta rezgés válaszspektruma a reaktor alátámasztáson (Balti EBJ) ..... | 23 |
| 19. ábra | Az EUR által ajánlott robbanás terhelés-diagram.....   | 24 |
| 20. ábra | A robbanás által keltett rezgés válaszspektruma a reaktor alátámasztáson.....                  | 24 |
| 21. ábra | A balti konténment belső térkialakítása, a térbeli szeparációt szolgáló falak .....            | 28 |
| 22. ábra | SANDIA "test to failure" .....   | 37 |
| 23. ábra | Paksi Atomerőmű konténment sérülési görbék belső nyomásra.....                                 | 39 |
| 24. ábra | Paksi Atomerőmű konténment mean konténment sérülési görbe földrengésre .....                   | 39 |
| 25. ábra | Az EPR olvadék-csapdájának sematikus rajza .....   | 41 |
| 26. ábra | Az olvadék-csapda az orosz terv szerint.....   | 42 |
| 27. ábra | Az AP1000 konténment sematikus rajza.....  | 44 |
| 28. ábra | Az EPR konténmentje .....  | 44 |
| 29. ábra | Az orosz kettős konténment sematikus rajza.....  | 45 |
| 30. ábra | Az orosz tervezésű konténment feszítő pászmáinak hálója.....                                   | 46 |
| 31. ábra | Az EPR üzem közben kiszolgálható térrészei .....   | 47 |
| 32. ábra | Az acélcéllás építkezés folyamata .....  | 47 |
| 33. ábra | A burkolattal kialakított acélcéllák a Paksi Atomerőmű építésénél .....                        | 48 |
| 34. ábra | AP1000 acélcéllás modulok.....   | 48 |
| 35. ábra | Crystal River 3. blokk konténmentjének sérülése .....  | 49 |

# 1. A KONTÉNMENT

A konténment a reaktor-berendezést és az ahhoz közvetlenül kapcsolódó rendszereket magába záró nyomásálló, hermetikusan kialakított építmény, amelynek az a funkciója, hogy normál üzem, várható üzemi események és tervezési üzemzavarok esetén megakadályozza, vagy korlátozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását, ha az előtte lévő fizikai gátak, az üzemanyag-mátrix és burkolat, valamint a reaktor-berendezés nyomástartó kontúrja sérülne. Ehhez a konténmentnek el kell viselni az üzemzavar/baleset után kialakult nyomást és hőmérsékletet, és hermetikusan, tömörnek kell lenni. A konténment védi a reaktor-berendezést és az ahhoz közvetlenül kapcsolódó rendszereket a külső környezeti veszélyektől, hatásoktól. (Lásd az NBSZ 3a és az NBSZ 12. kötet szerinti meghatározást.)

Különböző tervezési koncepciójú konténmentek léteznek. Vannak vasbeton, feszített vasbeton, acél, egy- és kéttős-falú, teljes vagy csökkentett nyomású konténmentek. Ez utóbbiak esetében nyomáscsökkentő rendszereket kell alkalmazni már arra is, hogy a tervezési alapba tartozó üzemzavar után kialakuló nyomás-csúcsot, azaz a teherviselő szerkezet tervezési nyomását csökkentésék. A konténment típusokat a 1. táblázat mutatja be ([1], [2] és [3] alapján). A konténment fejlesztés korai szakaszában a 24 órás szivárgás csökkentése és a konténment tervezési nyomás és hőmérséklet növelése volt a fő cél. Így alakultak ki – a csökkentett nyomású (például száraz-jég vagy buborékoltató kondenzátoros) konténmentek. Majd a technika fejlődésével fejlesztették ki a hűtőközeg-vesztés után kialakuló teljes nyomás elviselésére képes konténmenteket.

**1. táblázat Nyomottvizes reaktorok konténment típusai**

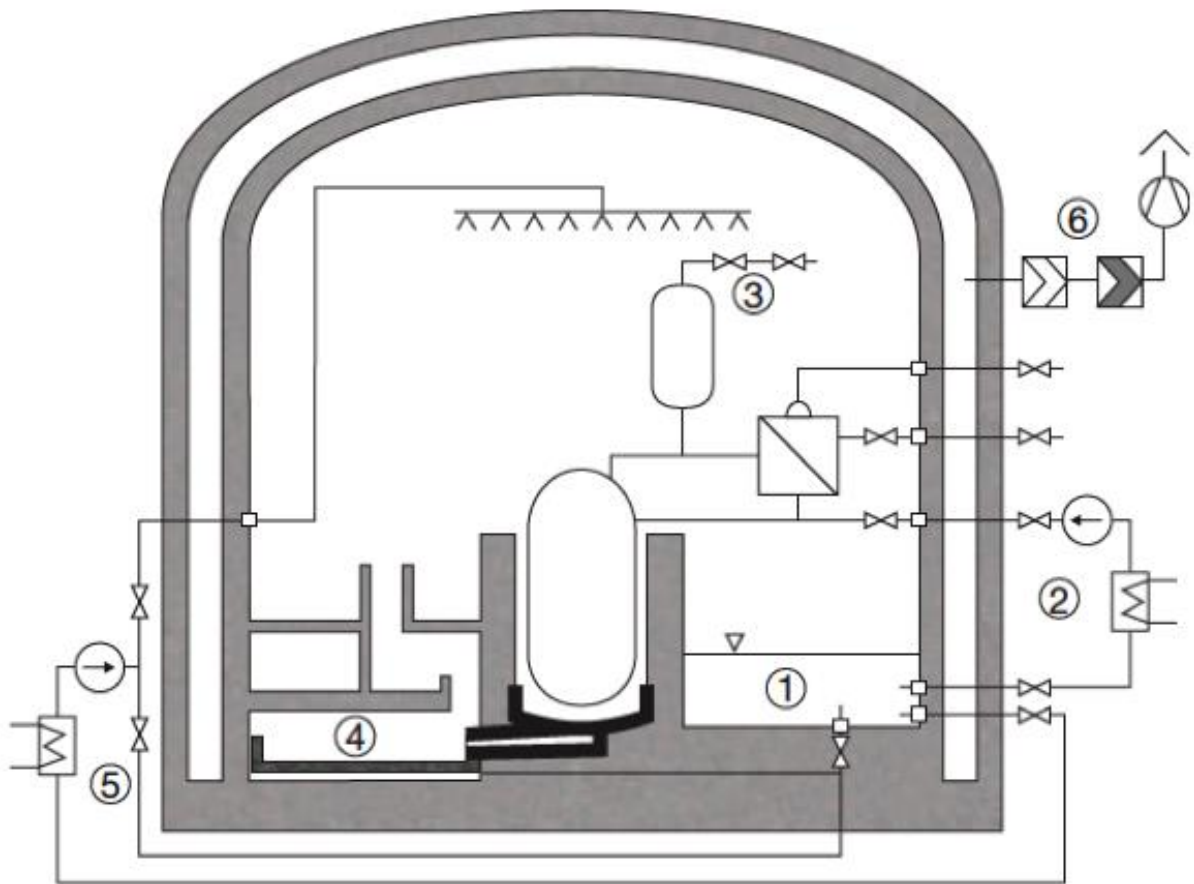
|   |  |  |
|---|--|--|
| teljes<br>nyomású konténmentek                          | acél henger/héj                            | acél henger/héj vasbeton védőépülettel                   |
|   | vasbeton henger acél burkolattal           | egyszeres  |
|   |  | kettős: vasbeton acél burkolattal és külső fallal        |
|   | feszített vasbeton henger acél burkolattal | 1-D függőlegesen vagy átlósan feszített vasbeton héj     |
|   |  | 3-D függőlegesen feszített vasbeton héj                  |
| 3-D függőleges feszített vasbeton és külső vasbeton héj |  |  |
| szubatmoszférikus primer konténment, acél burkolattal   | vasbeton héj (~35 kPa depresszió)          |  |
| csökkentett<br>nyomású konténmentek                     | jég-kondenzátoros primer konténment        | acél henger vasbeton védőépülettel                       |
|   |  | vasbeton henger acél burkolattal                         |
|   | buborékoltató-kondenzátoros konténment     | vasbeton doboz-szerkezet acél burkolattal (VVER-440/213) |

A konténment valójában inkább rendszerként mintsem nyomástartó kontúrként, fogható fel, hiszen inherens részei a konténmentnek az alábbiak:

1. az izoláló elemek:
  - a. zsilipek,
  - b. cső- és kábelátvezetések,
  - c. a konténment kontúron áthatoló csővezetékek kettős kizárása;
2. hermetizáló elemek;
3. a konténment hűtőrendszere;
4. a konténment légterének szellőzése;
5. a robbanóképes gázok kezelésének rendszere;
6. a konténment túlnyomás elleni védelme.

Építészeti kialakítását tekintve is számos megoldás van, alapvetően a félgömb vagy elliptikus héjjal fedett hengeres formák a preferáltak. Ez alól kivételt képeznek például a VVER-440 és a BWR MARK I és MARK II konténmentek.

A kettősfalú megoldásnál a funkciók is megosztottak (1. ábra): a belső konténment szolgál a kibocsátások visszatartására, a külső pedig védi a reaktort és a biztonsági rendszereket a külső hatásoktól, például a repülőgép rázuhanás hatásaitól. A külső hatásokra tervezett, a belső konténmentet körülvevő szerkezetet, épületet védőépületnek (shield building) is nevezik.



1. ábra Kettősfalú konténment sémája, olvadékcsapdával (NAŰ NS-G-1.10)

(Az ábrán lévő számozás szerint (1) a konténment hűtésére szolgáló víz tartálya, (2) az üzemszabari zónahűtő rendszer, (3) reaktor biztonsági szelep, (4) olvadék-csapda, (5) a konténment hűtőrendszere és (6) a gyűrkamra lefúvató rendszere.)

A vasbeton konténmentek lehetnek feszített szerkezetűek [4]. Kettősfalú konténmentek esetében a belső héj lehet feszített, a külső pedig feszítés nélküli vasbeton szerkezetű (lásd a Balti EBJ 3.12 fejezetét). A kettős konténment szerkezet alkalmazását az indokolja, hogy a hűtőközeg-vesztés esetén a konténment héjnak belső nyomással – érintő irányú, hoop feszültséggel szemben – kell ellenállónak lenni, s erre a feszített vasbeton héj alkalmas, míg a külső hatások, mint az ütközés, robbanás dinamikus terheiből származó kompressziós hatásokat a külső vasbeton védőépület elviseli. A két héj közötti, depresszió alatt tartott tér lehetővé teszi a belső héj esetleges szivárgásainak ellenőrzését, lokalizálását, az átvezetések elosztását, a biztonsági rendszerek, csővezetékek, kábelek elosztását, stabil hőmérséklet fenntartását, ami a belső héj termikus feszültségeit csökkenti.

Tekintettel arra, hogy a vasbeton nem hermetizál, a vasbeton konténmenteket minden esetben acél burkolattal teszik tömorré, amire nyilvánvalóan nincs szükség az acél konténmentek esetében.

A túlnyomás elleni védelem csak egyes típusoknál jelenik meg önállóan, ahol a szerkezeti épség megővására lefúvatási lehetőség van. Míg más konstrukciók esetében a túlnyomás elleni védelmet a konténment hűtésével oldják meg. Például az EPR elődjeinek tekintett német Konvoi és francia N4 típusoknál van lehetőség szűrt leeresztésre.

Már a TMI üzemzavart követően a konténmentek határ-terhelhetősége és a súlyos baleseti folyamatok kerültek előtérbe, és a fejlesztések a baleset-kezelésre, különösen a konténmenten belüli hidrogén-robbanás elkerülésére, illetve a reaktortartály külső hűtésének és a zóna-olvadék kezelésének megoldására irányultak. A 2001. szeptember 11-i WTC terrortámadást következményeként a külső hatásokkal szembeni védelem is a fejlesztések fontos céljává vált.

A fukushimai tragédia megerősítette, olyan konténment konstrukcióra és műszaki eszközökre van szükség, amelyekkel a visszatartási funkció a baleset során minél tovább, lehetőség szerint időkorlát nélkül, folyamatosan biztosítható.

## 2. A KONTÉNMENT TERVEZÉSI ALAPJA

### 2.1. FUNKCIONÁLIS KÖVETELMÉNYEK

A konténment az utolsó fizikai gát a nukleáris technológia, az aktív közegek és a környezet között a reaktor minden állapotában (NBSZ 3a 3a.2.1.1600.). A konténment B1 szintű, nem izolálható gát (3a.2.2.0900.), amelynek sérülési valószínűségét minimalizálni kell, hogy a korai nagy kibocsátásokra vonatkozó korlát betartható legyen (3a.2.4.0800.).

A konténment véd az ionizáló sugárzástól a TA1-4 és TAK1-2 üzemiállapotokban egyaránt.

A korszerű konténmenteket úgy kell megtervezni, hogy zónaolvas és tartály sérülés esetén az olvadék a konténmenten belül, lehűtött állapotban megtartható legyen (3a.2.2.7500.).

A konténment funkciót – különös tekintettel a tervezési alapot meghaladó állapotokra – nem csak passzív gátként szolgáló szerkezetek, hanem a konténment hűtését és a nyomás csökkentését szolgáló rendszerek együttesen valósítják meg.

Így a passzív szerkezet tervezését, aminek fókuszában a szilárdsági megfelelés áll, együtt kell kezelni a baleseti nyomáscsökkentő és hidrogén eltávolító rendszerek, valamint az üzemanyag-olvasást okozó eseményeknél a nagynyomású folyamatok, s ezzel a korai konténment sérülések elkerülését szolgáló tervezői intézkedésekkel (3a.2.2.7400.).

A konténment belső térkialakításának és a konténmenten belüli szerkezeteknek is van biztonsági funkciója azon túl, hogy a technológia rögzítésére szolgálnak, megvalósítják a térbeli szétválasztást, árnyékolást, s a belső veszélyekkel szembeni védelmet is szolgálják, így a repülő tárgyak, a robbanás és a nagyenergiájú csőtörés hatásaitól is védenek.

### 2.2. BIZTONSÁGI OSZTÁLYBA SOROLÁS

Az NBSZ 3a szerint a konténment B1 passzív funkcióval rendelkezik, s mint ilyen (a 3a.2.2.1300. bekezdés értelmében) ABOS 1. biztonsági osztályba kell sorolni. A konténmentet az NBSZ 3a 3a.2.2.2300. bekezdése értelmében földrengés-állóság szempontjából is osztályba kell sorolni. tekintettel arra, hogy a konténment passzív szerkezet (B1) és passzív biztonsági funkcióval rendelkezik földrengés-biztonság szempontjából, ezért az NBSZ 3a 3a.2.2.2700. bekezdése értelmében második földrengés-biztonsági osztályba soroljuk. A konténment átvezetések olyan nyomástartó elemek, amelyek funkcionálisan, következőképp a tervezés minden követelményét tekintve a konténment részeként kell felfogni.

Az orosz normák szerint a reaktorépület (UJA, a konténment és közvetlenül csatolt épületek) az OPB-88/97 [5] szerint 2. osztályba tartozik. Ugyanakkor a reaktorépület az I. biztonsági és sugárbiztonsági kategóriába (a PiN AE -5.6 [6] szerint), az I. földrengés-biztonsági kategóriába (az NP-031-01 [7] szerint), robbanás-biztonság szerint B (SP12.13130.2009), tűzbiztonság szempontjából I. kategóriába (SNiP 21-01-97 [8]) sorolt létesítmény (lásd a Balti EBJ 3.12 fejezetét, illetve az 2. ábrát). A reaktorépületen belül a

konténment lokalizációs, passzív (nyomás) teherviselő rendszer, így ebből a szempontból az NP 010-98 [9] hatálya alá tartozik. A konténmentet a nemzetközi nomenklatúra szerint általában a 2. biztonsági, és I. földrengés-biztonsági osztályba sorolják.

| KKS code | Buildings and structures names | Safety class in accordance with the NP-001-97 (OPB-88/97) | Category of responsibility for nuclear and radiation safety in accordance with the PiN AE-5.6 | Seismic category according to NP-031-01 |
|----------|--------------------------------|---|---|---|
| 10UJA    | Reactor building               | 2   | I   | I                                       |

2. ábra A reaktorépület osztályba sorolása az orosz normák szerint

### 3. A TERHEK

A konténment lehetséges terhelési esteit a 2. táblázatban adjuk meg.

2. táblázat A konténment terhelési estei

| teher        |                          | megjegyzés   |
|--------------|--------------------------|--|
| próbák       |                          | próbanyomás és tömörségvizsgálat (+ próba körülmények)   |
| TA1-4 terhek | normálüzemi terhek       | beleértve normálüzemi tranzienseket, daruk változó terheit; biztonsági szelep működésének hatásai; a feszítés terhei;                |
|              | várható üzemi események  | a normálüzemtetől való olyan eltérések, amelyeknek bekövetkezési gyakorisága nagyobb, vagy egyenlő, mint $10^{-2}$ /év, reakcióerők, |
|              | extrém környezeti terhek | $10^{-5}$ /év bekövetkezési gyakoriságú (biztonsági földrengés, meteorológiai szélsőségek, másodlagos hatások)                       |
|              | rendellenes üzemi terhek | LOCA elemzések alapján képzett mértékadó értékek (globális és lokális), reakcióerők;   |
|              | LOCA utáni terhek        | extrém lokális hőmérsékletek, elárasztás a konténment egyes térrészeiben;  |
| TAK1 terhek  |                          | TA1-4 paramétereinél rosszabb konténment paraméterek; repülőgép rázuhanás;   |
| TAK2 terhek  |                          | olvadékcsapda, H-robbanás súlyos balesetként; határterhelhetőség;  |

A konténment tervezésénél az alábbi terheket, hatásokat, körülményeket kell figyelembe venni:

- 1) építési terheket;
- 2) üzembe helyezési próbák terheit;
- 3) a normálüzemi terheket, amelyek előfordulhatnak a TA1-3 üzemi állapotokban:
  - a) önsúly, hasznos teher,
  - b) nyomás és hőmérséklet,
  - c) üzemi tranziensek terhei, amelyek a konténment rendszereire nyomás-, hőmérséklet-változást vagy dinamikus hatást váltanak ki, mint például biztonsági szelep működések terhei;



- 4) a tervezési alapba tartozó belső eseményeket, illetve az ebből eredő terheket, mint:
  - a) *LOCA nyomás és hőmérséklet eloszlásból eredő terhek*;
  - b) nagyenergiájú csőtörések által okozott belső nyomás és hőmérséklet, beleértve a tört cső ostorozásából és a vízszugártól származó hatásokat;
  - c) belső veszélyek (például repülő tárgy, nehéz teher leejtése);
  - d) a tervezési alapba tartozó üzemzavarok során reakcióerők, lokális terhek;
  - e) post-LOCA terhek (nyomás, hőmérséklet);
- 5) a tervezési alapba tartozó külső veszélyek terheit, mint:
  - rendkívüli környezeti hatások által okozott terheket (extrém hőmérsékletek);
  - extrém környezeti terheket (például a biztonsági földrengés, SSE, tervezési alapba tartozó tornádó, repülőgép rázuhanás);
- 6) tervezési alapon túli, komplex üzemzavarok és baleseti (TAK1 és TAK2) körülmények között a konténmentre ható terheket, mint
  - a) baleseti körülmények között a hidrogén deflagrációból eredő terhek,
  - b) a nagy polgári légi jármű erőműre történő rázuhanásából eredő hatások,
  - c) az zónaolvadás és az olvadék kezelésének hatásait.

### 3.1. A FUNKCIÓBÓL ADÓDÓ TERVEZÉSI PARAMÉTEREK MEGÁLLAPÍTÁSA

A konténmentre származtatni kell az aktuális tervezési alapnak megfelelő nyomás, nyomáskülönbség és hőmérséklet értékeket. Ehhez vesszük a tervezési alapba tartozó üzemzavarokat, s a burkoló elv alkalmazásával kiválasztjuk mértékadónak azokat a jellemző tranzienseket, amely következtében a konténmentben legnagyobb nyomás, illetve az egyes térrészek között legnagyobb nyomáskülönbség, valamint legnagyobb konténment légtér-hőmérsékletek alakulnak ki. Ez általában vagy a nagy LOCA vagy a gőzvezeték törése a primerkörben. Általában a termohidraulikai számításokban kapott nyomás-maximumoknál 10÷25 %-kal nagyobb értékeket veszünk mértékadónak a méretezés során, mint a termohidraulikai számításokban kapott maximumok, míg a térrészek közötti nyomáskülönbségek esetében 15-40%-kal nagyobb értékeket. Itt útmutatóként alkalmazni lehet a NAÜ NS-G-1.10 [2] és az US NRC SRP [10] 3.8.1 és 6.2.1 fejezeteit, illetve a Regulatory Guide 1.136-ot [11], amelyek alapján származtatni lehet konténment tervezési nyomás és hőmérséklet adatokat.

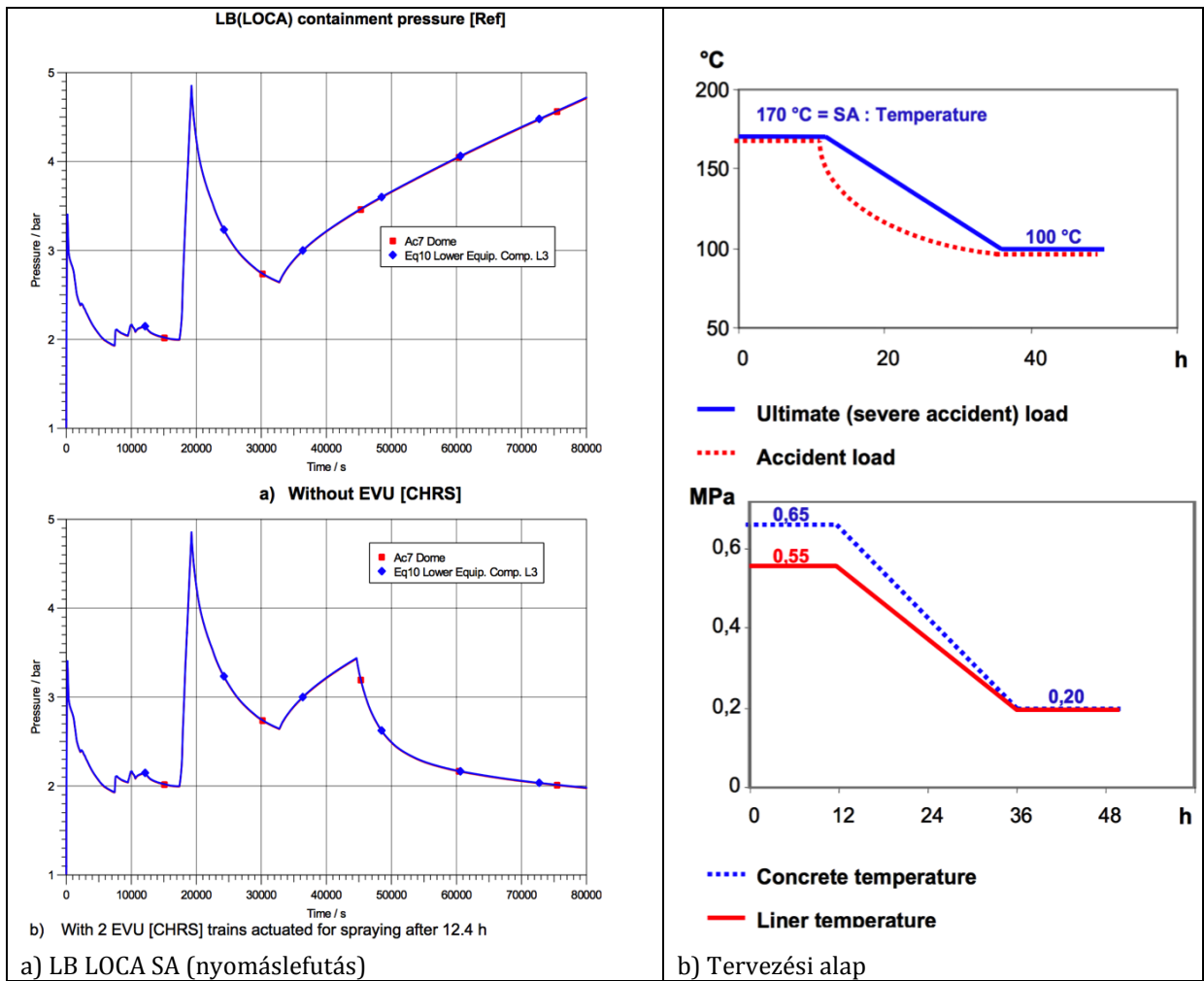
A súlyos balesetek tekintetében a konténment funkciójából adódó tervezési alapja a súlyos baleseti szcenáriók elemzéséből származtatható. Az EPR-UK [12] LB LOCA súlyos baleset-elemzésének nyomás-lefutását mutatja a 3. ábra. A tervezési alap (p-T terhelési görbék) meghatározásánál alkalmazzák a burkoló elvet (4. ábra és 3. táblázat).

#### 3. táblázat Az EPR (UK) conténment tervezési alap-paraméterei

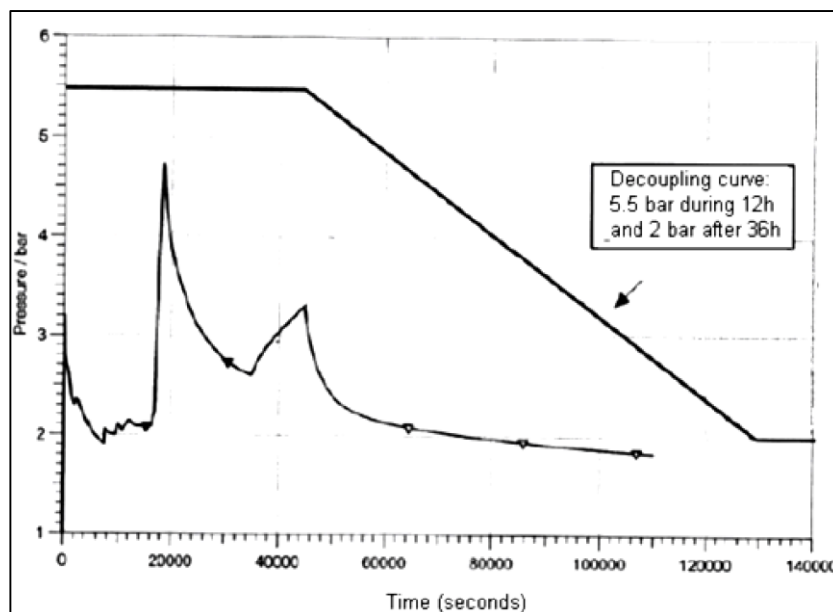
| Scenario |                          | Pressure peak (bar) | Temperature peak (°C) |
|----------|--------------------------|---------------------|-----------------------|
| wall     | LB LOCA                  | 4.5                 | 177                   |
|          | 2A-LOCA                  | 4.3                 | 182                   |
|          | SLB                      | 5.2                 | 183                   |
| liner    | Severe accident: LB LOCA | 4.7                 | 137                   |

A Balti EBJ alapján például a konténment tervezési hőmérséklete 150 °C, a túlnyomás pedig 0,4 MPa. Más helyen a Balti EBJ (3.12.2.6.4.) az NP-010-98 [9], ACI 359 (ASME BPVC [13]) szabványokra hivatkozva azt írja, hogy a termohidraulikai elemzésekben kapott 0.39 MPa 1.15-szerese a mértékadó érték, azaz 0,45 MPa.

Sikeres üzemzavar kezelés esetén a konténment paraméterek kedvezően alakulnak a hűtőközeg-vesztést követően, de átmenetileg akár depresszió léphet fel a konténmentben, s a LOCA után egyes térrészeket a hűtőközeg eláraszthatja, ami lokális nyomás és hőmérséklet-változást okoz. A LOCA utáni állapotra jellemző hatásokat a konténmentben lejátszódó termohidraulikai folyamatok elemzése alapján kell meghatározni.



3. ábra Az EPR (UK) konténment funkcióból adódó tervezési alapja



4. ábra A burkoló elv alkalmazása az EPR (UK) konténment tervezési alapja esetén

A biológiai védelmi funkció nem a konténmentre, hanem elsősorban a konténmenten belüli térkialakításra és szerkezetekre hat:

- a. a térrészek kialakításának olyannak kell lenni, hogy az maximális árnyékolást adjon, s megakadályozza az „átlövéseket”;
- b. egyes szerkezetek, mint a reaktor-akna anyagválasztásának, beton receptúrájának olyannak kell lenni, hogy ésszerű falvastagságok mellett biztosított legyen az árnyékolás. A reaktorakna vasbeton tömege fokozott árnyékoló képességét rendszerint nehézbeton alkalmazásával érik el.

Speciális konstrukció az olvadék-csapda, amely tervezési alapját a corium materiális és hőtechnikai paraméterei határozzák meg.

Az üzemzavari hidrogénkezelés tervezési alapja úgyszintén a baleseti hidrogénképződés és konténmentben való eloszlás elemzéséből származtatható, hasonlóképp, mint a hidrogén robbanás hatásának figyelembe vétele.

A külső és belső veszélyek hatásainak tervezési alapként, illetve a tervezési alap kiterjesztéseként való figyelembe vételét külön, részletesen taglaljuk.

### 3.2. BIZTONSÁGI SZELEPEK MŰKÖDÉSE

Egyes tranziensek során biztonsági szelepek működhetnek, ami a konténmenten belül nyomás-, vagy hőmérsékletváltozást okoz, sőt jelentős lokális dinamikus hatásokat is válthat ki. Technológiai elemzéssel kell meghatározni a biztonsági szelepek működéséből származó hatásokat.

### 3.3. ÜZEM KÖZBENI TRANZIENSEK

Üzem közben a konténment nyomáscsökkentő rendszerének hibás működése miatt a konténment nyomása csökkenhet, míg a kettős konténment gyűrűkamrájában csőtörés következtében a nyomás megnövekedhet. Az ilyen esetek hatásait a tervezésnél figyelembe kell venni (lásd NAÜ NS-G-1.10 4.57§ [2], valamint NBSZ 3a kötet 3a.2.2.4700. bekezdést).

### 3.4. A LOCA UTÁNI ÁLLAPOT

### 3.5. A KÜLSŐ VESZÉLYEK FIGYELEMBE VÉTELE

#### 3.5.1. ÁLTALÁNOS KÖVETELMÉNYEK

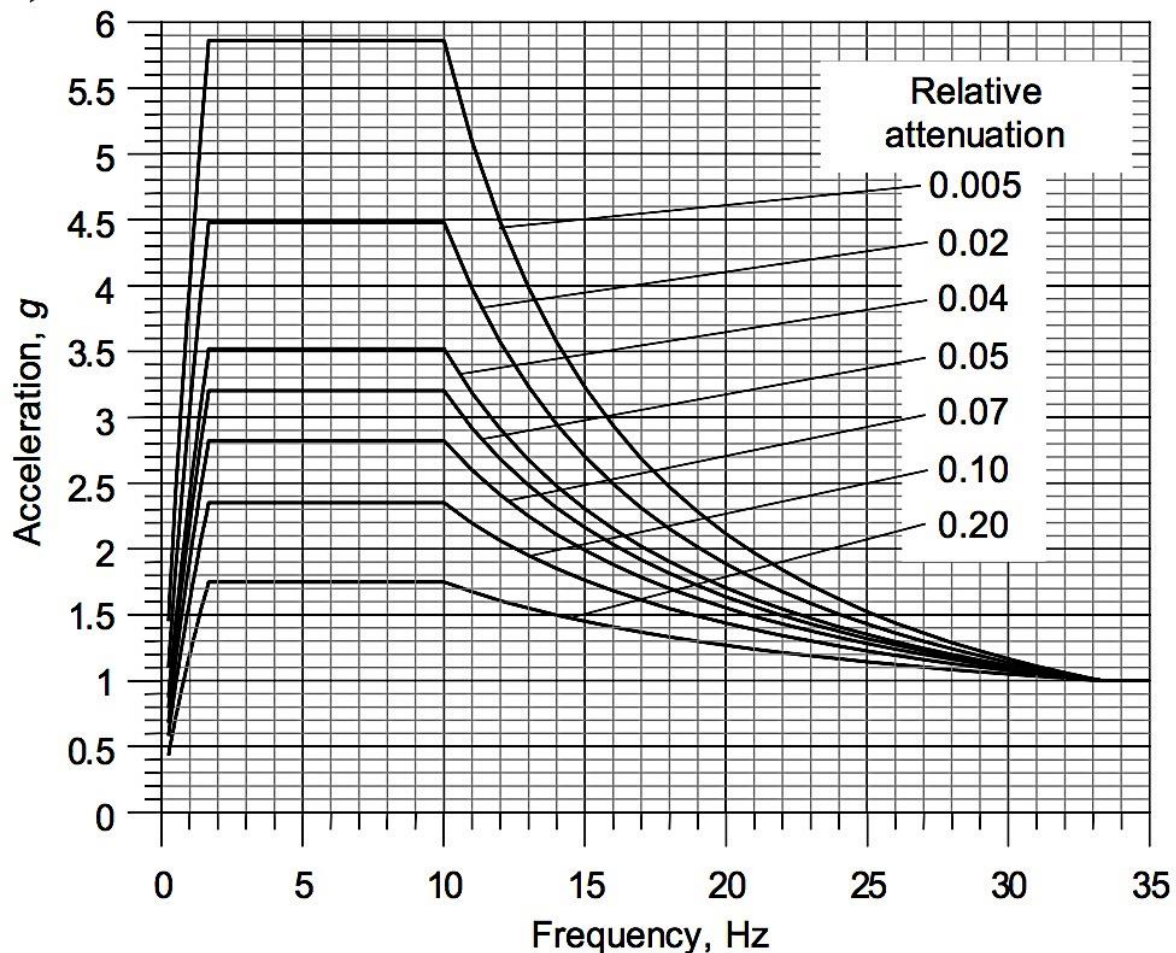
A konténmentet tervezni (ellenőrizni) kell a telephelyre jellemző külső hatásokra (3a.4.6.0300.). Ezen külső hatások példaszerű listáját tartalmazza az NBSZ 3a. A külső eseményekkel szembeni védetség egyfelől azt jelenti, hogy a konténment ezek hatására megőrzi szerkezeti integritását, tömörségét és megvédi a primerköri hőhordozót tartalmazó fővízköri rendszereket, valamint a konténmenten belüli biztonsági rendszereket (az épület külső hatásra adott válaszából eredő hatásokkal szemben is). A konténment globális szerkezeti épségének, illetve visszatartó képességének meg kell maradni a TAK1 és TAK2 üzemállapotokban is, következésképp a tervezésnél – megfelelő mérlegeléssel – figyelembe kell venni a TAK1 és TAK2 állapotokhoz vezető külső hatásokat, illetve ezek kombinációit. Itt a konténment tervezése szempontjából meghatározó veszélyekkel, illetve azok hatásaira való tervezéssel foglalkozunk.

#### 3.5.2. FÖLDRENGÉS

A konténment tervét lényegesen befolyásolja a biztonsági földrengés mértéke (maximális vízszintes gyorsulás és válaszspektrum), valamint másodlagos hatásként a talaj állékonysága földrengés esetén. Ez utóbbi szoros összefüggésben van a konténment, s lényegében az egész főépület alapozásával, amelyet a talaj teherviselő képessége határoz meg.

A tervezésnek biztosítania kell a konténment szerkezeti integritását és tömörségét a tervezés alapját képező (biztonsági) földrengés esetén, elegendően nagy tartalékkal, azaz a szakadákszél-jelenség kizárásával (lásd a biztonsági rendszerek tervezése és a külső-belső veszélyek témakör jegyzetét!).

A gyakorlati tervezés, főleg a títusterv, nem telephely-specifikus, hanem az NP-031-01 [7] szerinti szabványos válaszspektrum alapján történik (5. ábra).

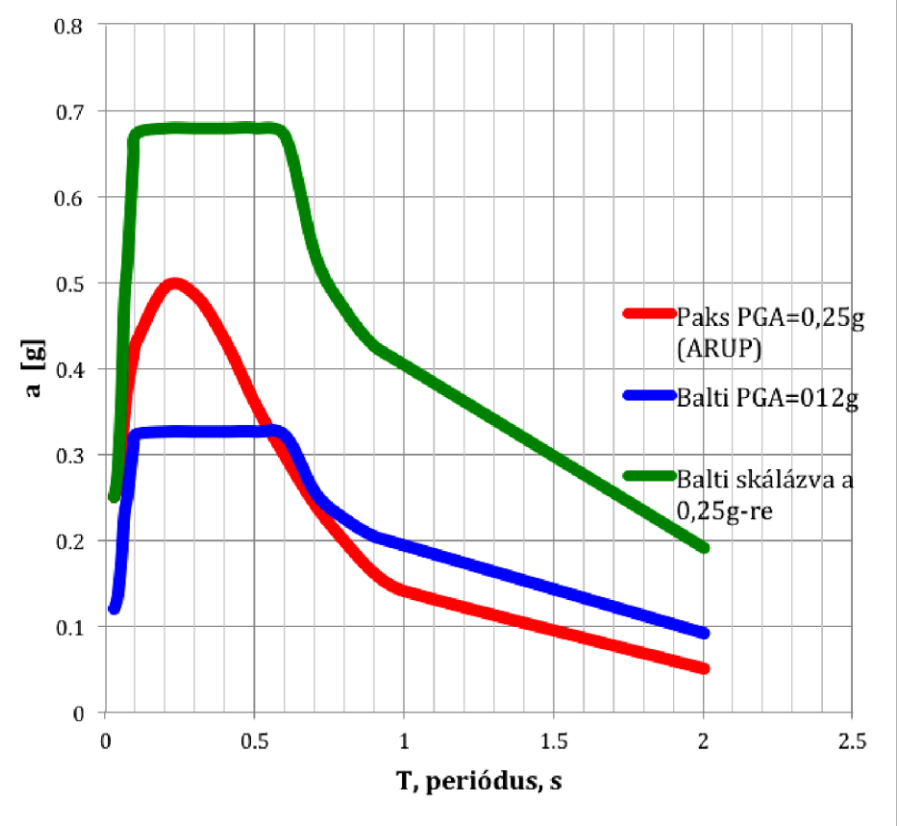
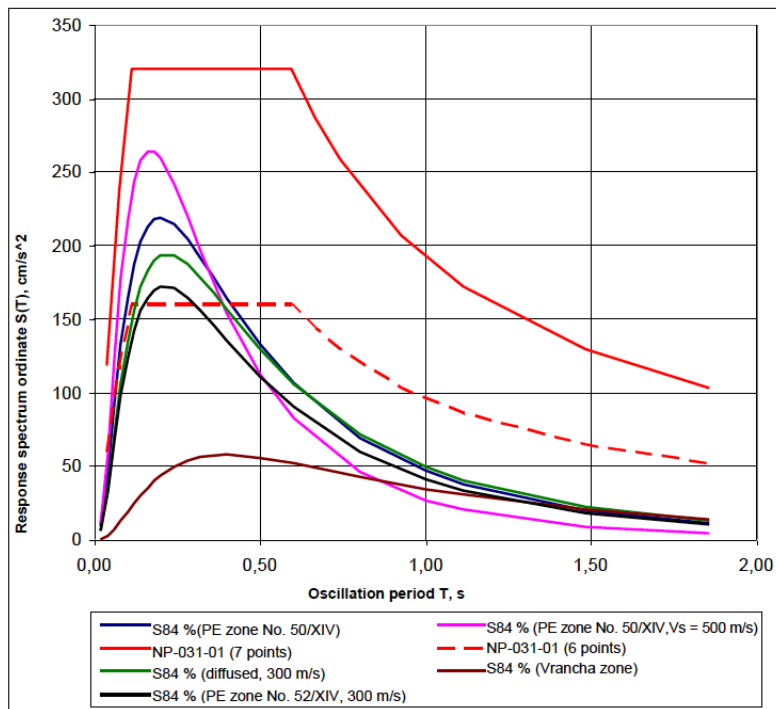


5. ábra Szabványos válaszspektrumok (laza talaj)

A balti atomerőmű konténmentjét MSK-64 intenzitás skála szerint 7° intenzitású, PGA=0,12 g maximális vízszintes gyorsulással jellemzett földrengésre tervezték<sup>1</sup>. A biztonsági földrengés válaszspektrumát, amelynek visszatérési idejét illetően kétségeket hagy a dokumentáció, és annak összehasonlítását a Paksi Atomerőmű – 10<sup>-4</sup>/év gyakoriságnak megfelelő – tervezési alapjával a 6. ábra mutatja meg.

A Balti EBJ szerint a reaktor főberendezéseket (nukleáris gőzfejlesztő berendezést és biztonsági rendszereket?) – annak ellenére, hogy magát a főépületet csak a 6. ábra szerinti földrengésre tervezték – egy 0,25g PGA-val, illetve ehhez illesztett szabványos válaszspektrumokkal (5. ábra) jellemzett földrengésre tervezték. Az épület válaszokat, azaz az épület padlóspektrumokat talajtípusra számították ki. Ez egy „tipikus”, más esetekből is ismert, orosz tervezői következetesség, következetlenség.

<sup>1</sup> A biztonsági földrengés orosz rövidítése MRZ, amerikai SSE. PGA – maximális vízszintes gyorsulás.



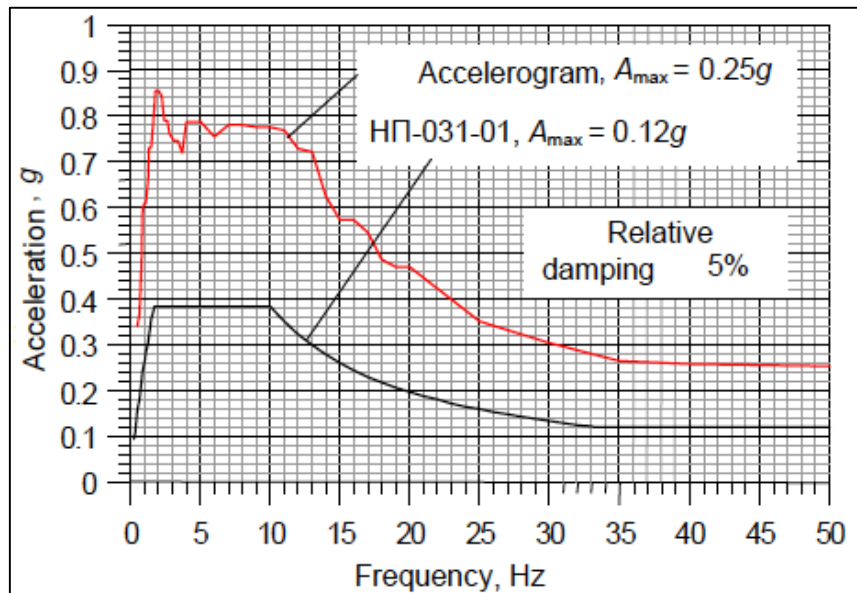
Balti EBJ 2. kötet 264. oldal

Balti PGA=0,12g válaszspektrum skálázva a 0,25g-re

6. ábra A balti és a Paksi Atomerőmű földrengés tervezési alapja

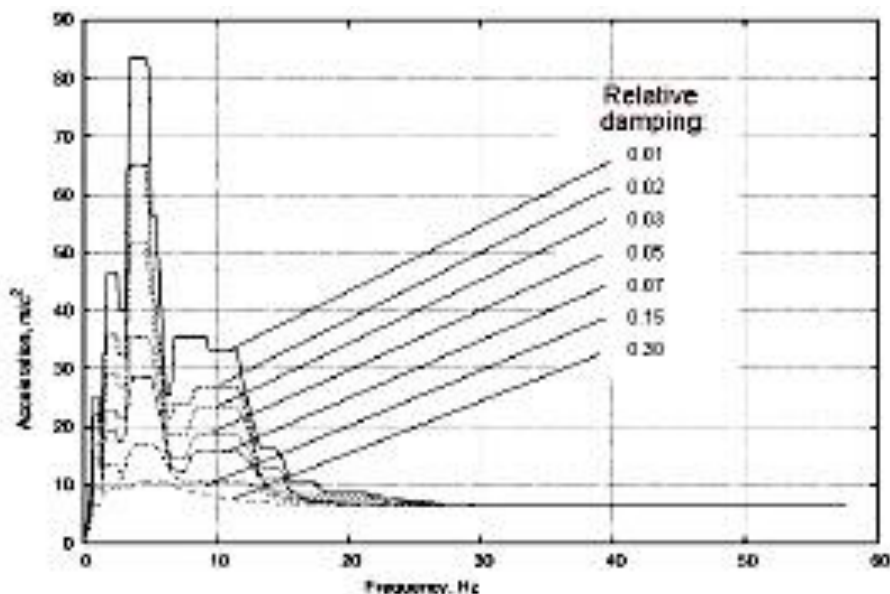
A konténment dinamikus válasza a földrengés által okozott gerjesztésre adja az inputját a konténment adott szintjein, pontjain rögzített technológiai rendszerlemek tervezésének. Ez lehet a felállítás helyre jellemző válaszspektrum, vagy padlóspektrum.

Ahogy azt a 7. ábra mutatja a konténment/főépület és a benne lévő főberendezések tervezési alapja teljes mértékben eltérő, sőt még azt sem állíthatjuk, hogy a konténment földrengésállóságánál elvárt 40% tartalék lefedné a két válaszspektrum közötti különbséget, azaz a tartalékot figyelembe véve sem felel meg az épület a 0,25g PGA-val jellemzett földrengésre. Ergo, a tervezés nem egyenszilárdságú.



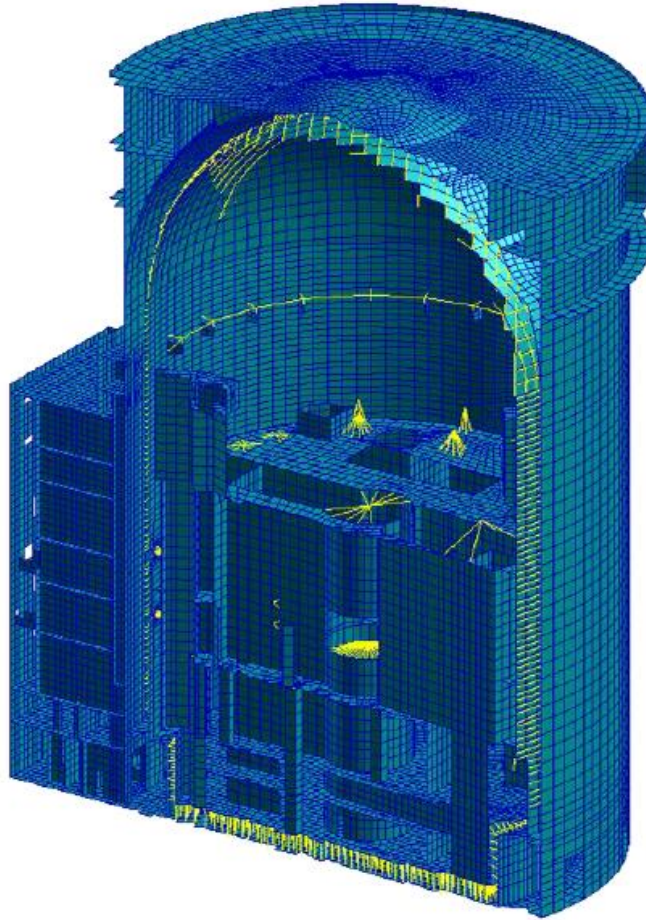
7. ábra Az épület és a főberendezések földrengés tervezési alapja (Balti EBI)

Az általánosított épület válaszspektrumra ad példát a 8. ábra, ahol a reaktor alátámasztási ponton az x-irányú válaszspektrumok láthatók különböző csillapítás értékeknél. A számítás szabványos laza talajra alapozott főépületre készült, amely esetben az épület első öt sajátfrekvenciája 2,26 Hz alatt van. A főépület számítási modellje 9. ábrán látható.



8. ábra Általánosított épület válaszspektrum a reaktor alátámasztásánál



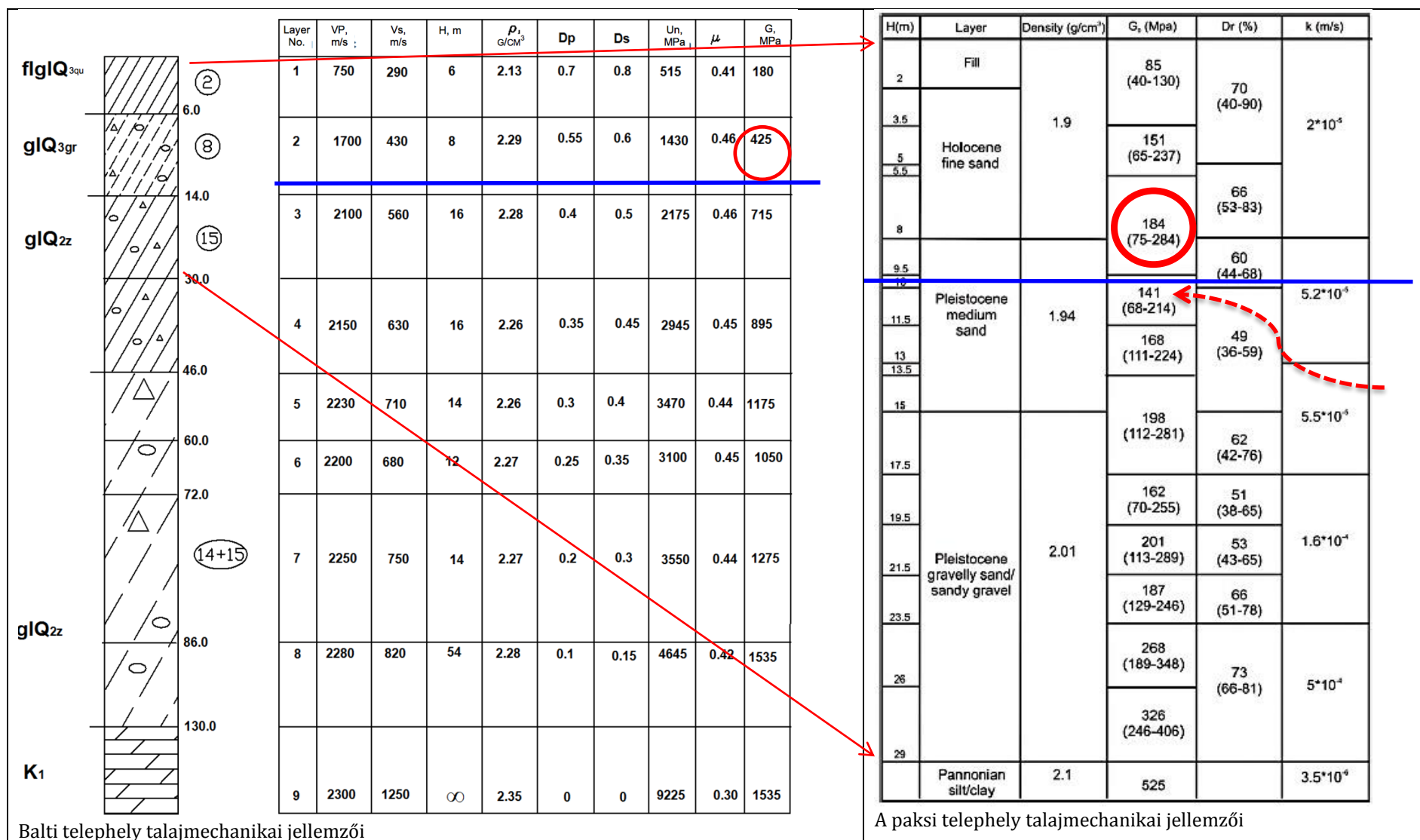


9. ábra A főépület végeelem modellje az épület válaszának meghatározására

Nyilvánvaló, hogy ez a dinamikus válasz a konkrét telephely talajmechanikai tulajdonságaitól és a telephely-specifikus válaszspektrumtól függ. A lokális viszonyok összehasonlítására lásd a 10. ábrát. Látható, hogy ebben a tekintetben a balti terv nem referenciája a paksinak, hiszen a paksi telephelyen a baltinál lényegesen lazább, kisebb teherbírású, s ahogy azt már tudjuk, folyósásra hajlamos talajrétegek vannak.

A szakadékszél-jelenség kiküszöbölésére az orosz felfogásban, s összhangban az European Utility Requirement Document-tel, 40 %-os tartalékot biztosít a terv. (Ennek igazolása a Balti EBJ-ből hiányzik.)

Földrengés-állóság szempontjából előnyös az a konténment konstrukció, amely tömeg és merevség eloszlása egyenletes, tengelyszimmetrikus, az épület beágyazása, alapozása pedig igen merev és a lehető legmélyebben van. A konténment megfelelően dilatált a körülötte lévő épületektől. Az orosz blokkok, beleértve a balti tervet is, minden szempontnak megfelelnek, kivéve azt, hogy az alapozásuk lényegében nem mélyen van (-9,80 m), s a tömegközéppontjuk elég magasan van, különösen, ha figyelembe vesszük a reaktor passzív hőelvonó rendszerének és a konténment hőelvonó rendszerének magasan elhelyezett tömegeit. Megjegyezzük, hogy ez a sajátosság még inkább jellemző az AP1000-re, ahol több mint 3000 m<sup>3</sup> vizet tároló tartály van a védőépület tetején.



10. ábra A balti és a paksi telephely talajmechanikai jellemzői



### 3.5.3. REPÜLŐGÉP RÁZUHANÁS

#### 3.5.3.1. A TERVEZÉSI ALAP

A konténmentnek, illetve a kettős konténmentek esetében a külső védőépületnek meg kell védenie a reaktort és a zónaolvadás megakadályozására szolgáló biztonsági rendszereket a repülőgép rázuhanásának hatásaitól. A tervezési alapba az a géposztály kerül, amely esetében az atomerőműre történő rázuhanás éves gyakorisága nagyobb, mint  $10^{-7}/\text{év}$  (3a.2.2.4300. j), 3a.2.2.5000. b)).

A repülőgép rázuhanás valószínűségét nem csak a lezuhanások gyakorisága, hanem a célfelület nagysága is befolyásolja.

A paksi Atomerőmű esetében a lezuhanó repülőgép okozta hatások szempontjából a legfontosabb szerkezeti tömb a reaktort, primerkört és a legfontosabb technológiai berendezéseket, valamint a pihentető medencét magában foglaló 72x52x18,9 m-es épülettömb. A környezetet súlyosan veszélyeztető nagyaktivitású radioaktív anyagok, azaz elsősorban a kiégett nukleáris üzemanyag a reaktorban illetve a pihentető medencében található. A reaktort és a legfontosabb technológiai berendezéseket magába foglaló hermetikus boksok a 18,90 m szintű földem alatt találhatóak. Ez a V-G sorok 7-11 keretállásai közötti terület a 1. blokkon, illetve az ezzel analóg elhelyezkedésű területek a többi blokkokon képezik a legérzékenyebb, mintegy 1900 m<sup>2</sup> célfelületet. Ez alatt a földem alatt helyezkednek el a primerkörü technológiai berendezések.

A Paksi Atomerőmű körül 3 km sugarú, 463443É 0185110K középpontú körben tiltott légtér van 5950 m repülési magasságig. A légi jármű rázuhanás a *könnyű repülőgépek és helikopterek kivételével* valószínűségi alapon kiszűrhető (VBJ 2.6 alfejezet, 2007. évi IBJ 6. fejezethez készült „Összefoglaló jelentés a légtérhasználat-változás időszakos ellenőrzéséről a repülőgép rázuhanás értékelése céljából” c., 0000N02ERE00010/B sz. tanulmányt), lásd az IBJ 6 fejezet 10.14. táblázatát, nálunk 4. táblázat.

#### 4. táblázat Az 1-5 kategóriára meghatározott inhomogén térbeli fajlagos lezuhanási gyakoriság

| A rázuhanási gyakoriság, az 1-5 kategóriát együttesen véve |           | az erőmű beépített területe | főépület | blokk   | következtetés                       |
|--|-----------|-----------------------------|----------|---------|-------------------------------------|
| 0,05% meg-nemhaladás                                       | 1,073E-11 | 7,717E-07                   | 5,2E-07  | 1,3E-07 | célfelület pontosítással kiszűrhető |
| 50% meg-nemhaladás   | 2,484E-12 | 1,786E-07                   | 1,2E-07  | 3,0E-08 | kiszűrhető                          |

Belátható, hogy nem lehet az új blokkokra automatikusan átvinni a működő blokkokra kapott rázuhanási gyakoriságokat, egyrészt a célfelületek eltérő nagysága, másrészt azért, mert az új blokkok esetében kötelező TAK1 esetként figyelembe venni a legnagyobb polgári légi jármű rázuhanását.

Az új blokkok esetében a jellemző adatokat az 5. táblázat tartalmazza (ERBE, Összefoglaló értékelő dokumentáció, REPÜLŐGÉP BECSAPÓDÁS VALÓSZÍNŰSÉGÉNEK ÉS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA ÉS ÉRTÉKELÉSE, 13A380042026-22-13-001 R3, 2015).

Látható, hogy a tervezés alapjába – tekintettel arra, hogy az üzemidő végre prognosztizált gyakoriság a  $10^{-7}/\text{év}$ -hez közelít – számításba kell venni a katonai és polgári könnyű szállítógépeket (2,3÷20 t). Ezek adatait a 6. táblázatban közöljük. Ugyanitt, a táblázat utolsó sorában láthatók a balti atomerőmű tervezésénél figyelembe vett LearJet-23 gép adatai.

*Nyilvánvaló, nem a hajózási sebesség, hanem a rázuhanás sebessége (általában kisebb, mint 100m/s) és szöge (10-45°) a meghatározó a tervezésnél, amelyet a fenti adatok alapján, a géptípusnak megfelelően (a sárkány jellemzői, siklószám) kell a tervezőnek meghatározni.*

## 5. táblázat Repülőgép lezuhanási és rázuhanási gyakoriságok az új blokkok esetében

| Kategória   | Rázuhanási gyakoriság [1/év/m <sup>2</sup> ] | Reaktor-épület 13795 m <sup>2</sup> | Baleseti dfzel 3280 m <sup>2</sup> | Hűtővíz szivattyúk 415 m <sup>2</sup> | Turbina-épület 7210 m <sup>2</sup> | Egy blokk területe 24700 m <sup>2</sup> |
|---|--|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|
| 0. vitorlázó és sárkányrepülő                                   | 1,25E-11                                     | 1,73E-07                            | 4,11E-08                           | 5,20E-09                              | 9,04E-08                           | 3,10E-07                                |
| 1. könnyű katonai és polgári kis repülőgépek (<2,3 t)           | 7,46E-12                                     | 1,03E-07                            | 2,45E-08                           | 3,09E-09                              | 5,38E-08                           | 1,84E-07                                |
| 2. katonai és polgári helikopterek                              | 1,10E-11                                     | 1,52E-07                            | 3,61E-08                           | 4,57E-09                              | 7,94E-08                           | 2,72E-07                                |
| 3. katonai és polgári könnyű szállítógépek (2,3÷20 t)           | 1,36E-12                                     | 1,87E-08                            | 4,46E-09                           | 5,64E-10                              | 9,80E-09                           | 3,36E-08                                |
| 4. katonai és polgári nehéz szállítógépek                       | 8,53E-13                                     | 1,18E-08                            | 2,80E-09                           | 3,54E-10                              | 6,15E-09                           | 2,11E-08                                |
| 5. katonai harci és sugárhajtású gyakorló repülőgépek (40÷50 t) | 8,53E-13                                     | 1,18E-08                            | 2,80E-09                           | 3,54E-10                              | 6,15E-09                           | 2,11E-08                                |
| Összesen  | 3,24E-11                                     | 4,46E-07                            | 1,06E-07                           | 1,34E-08                              | 2,33E-07                           | 7,99E-07                                |

## 6. táblázat A 3. kategóriába tartozó repülőgépek adatai

| Típus család       | Max. tömeg [kg] | Max. hajtómű tömeg [kg] | Max. üzemanyag [l, kg]* | Max. sebesség [km/h] | Max. utas-szám [fő] | Szárny fesztáv [m] |
|--------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| An-2               | 5500            | 1x 579                  | 900 kg                  | 258                  | 2                   | 18,2               |
| <b>An-26</b>       | <b>24000</b>    | <b>2x 600</b>           | <b>6000 kg</b>          | <b>500</b>           | <b>40</b>           | <b>29,2</b>        |
| L-39 Albatros      | 4700            | 1x 350                  | 280 kg                  | 750                  | 2                   | 9,5                |
| <b>Lear Jet-23</b> | <b>5670</b>     | <b>2x 200</b>           | <b>3026 kg</b>          | <b>904</b>           | <b>5-8</b>          | <b>10,85</b>       |

### 3.5.3.2. A TERVEZÉSI ALAP KITERJESZTÉSE

Az új blokkok esetében elvárható lenne, hogy TAK1 esetként figyelembe vegyünk a legnagyobb polgári légi jármű rázuhanását, ahogy azt több országban, például Finnországban – 2001. szeptember 11-i tragédia következményeként – teszik.

A finn példát tekintve az YVL B.7 jelzetű normatív dokumentum [14] 339. bekezdése kimondja: „Az atomerőművek biztonságával kapcsolatban kiadott kormányrendelet (733/2008) 17.§-a<sup>2</sup> alapján a tervezés során a nagy kereskedelmi repülőgépek becsapódására is fel kell készülni. A nukleáris létesítmények tervezése során érvényesítendő kis repülőgépek, valamint a nagy kereskedelmi repülőgépek becsapódása elleni felkészülésre vonatkozó részletes követelményeket az YVL A.11 [15] „Nukleáris létesítmény biztonsági intézkedései” útmutató tartalmazza.” Az itt hivatkozott YVL A.11 specifikálja, a maximum 20 mSv megengedett éves dózist, mint korlátozott környezeti hatást, a TAK1 (DEC – design extension condition) kritériumaként az adott esetben. Az YVL A.11 meghatározza, hogy azoknak az épületeknek, rendszereknek, amelyeknek szerepe van az adott követelmény teljesítésében megfelelő ellenállással kell bírniuk az ütközés közvetlen hatásával, az ütközés által gerjesztett rezgéssel és védettnek kell lenni a repülőgép üzemanyagának égésével szemben. A kiömlő repülőgép üzemanyag nem hatolhat be ezekbe az épületekbe. A nagy polgári repülőgép rázuhanása esetén is ki kell zárni a szakadákszél-jelenséget.

Az EUR [16] feltételezi, hogy a repülőgép rázuhanás esetén legalább a fűtőelem burkolat és a primerkör, azaz két fizikai gát teljesen ép marad, ezért a konténment szempontjából nem a tervezési alap követelményeit kell érvényesíteni<sup>3</sup>. Ugyanezen koncepció érvényesül a „Methodology for Performing

<sup>2</sup> Section 17, Protection against external events ...Design must also take account of illegal activities undertaken to damage the plant, and a large airliner crash.

<sup>3</sup> An aircraft crash will not cause a loss of coolant and fuel damage. Therefore no significant release of fission products will occur inside the containment and two Barriers\* will be assured even if the containment design leakrate cannot be proven under these conditions. Volume 2 Chapter 9 CONTAINMENT SYSTEM, 2.9 2.3.2 Man-made external hazards, EUR

Aircraft Impact Assessments and Large Explosion Assessments for New Plant Designs” dokumentumban<sup>4</sup> is. Lényegében ezekre épült az NBSZ 3a követelménye is.

Az NBSZ 3a ebben a tárgyban úgy rendelkezik (lásd az NBSZ 3a 3a.3.6.3100. és 3a.3.6.3300. bekezdéseket), hogy a katonai és polgári repülőgép becsapódás esetére biztosítani kell a TAK1 üzemállapotra vonatkozó követelmények teljesítését: Az atomerőművi blokknak rendelkeznie olyan jellemzőkkel és funkcionális képességekkel, amelyek biztosítják, hogy

- a) az atomreaktor aktív zónájának hűtése fennmarad, vagy a konténment nem sérül, és
- b) a pihentető medence hűtése, vagy integritása fennmarad.

Az NBSZ 3a a megfelelőség kritériumaként nem dóziskorlátot definiál, hanem a korai kibocsátásra vonatkozó összegzett gyakorisággal ( $10^{-6}$ /év) minősít kritériumát, illetve korlátozott környezeti hatást definiálja a védelmi intézkedéseket korlátozva (lásd a 3a.2.2.7000., 3a.2.4.0800, 3a.2.4.0700. bekezdéseket).

A vizsgálatok alapján katonai gép (5.) kategóriában mértékadó lehet esetünkben a Saab JAS-39 Gripen gép rázuhanása. A nagy polgári repülőgép reprezentánsa az Airbus 380. Ezek adatait a 7. táblázatban megadjuk.

**7. táblázat Paks2 esetében TAK-ként kezelt repülőgép rázuhanás – gépadatok**

| Típus család       | Max. tömeg [t] | Max. hajtómű tömeg [kg] | Max. üzemanyag [kg]* | Max. sebesség [km/h]        | Max. utasszám [fő] | Szárny fesztáv [m] |
|--------------------|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| Saab JAS-39 Gripen | 14 ÷ 16,5      | 1x 1055                 | 2000                 | 2 M (2120 km/h)             | 1 (C) 2 (D)        | 8,4                |
| Airbus A380        | 590            | 4x 6246 ÷ 6712          | 262072               | 0,96 M (1020 km/h, h=11 km) | 525 ÷ 555          | 79,8               |

Az NBSZ 3a kötet 3a.3.6.3300. bekezdéséhez hasonló követelményt a balti atomerőmű tervezésénél nem alkalmaztak. Az 6. táblázat és 7. táblázat adatainak összehasonlításából itt is következik, hogy a balti atomerőmű terve közvetlenül nem adaptálható a paksi telephelyre.

### 3.5.3.3. A RÁZUHANÁS HATÁSAI

A repülőgép rázuhanásnál az alábbi hatások lehetségesek:

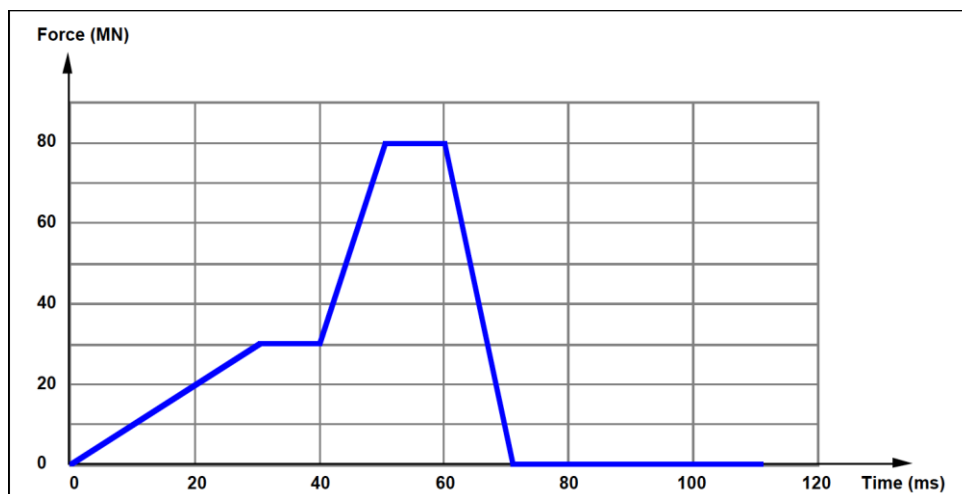
- 1) globális szerkezeti hatás:
  - a) összeomlás;
  - b) súlyos szerkezeti károk;
  - c) felborulás (stabilitásvesztés);
  - d) túlzott igénybevételek;
- 2) lokális szerkezeti hatások:
  - a) penetráció;
  - b) repedések;
  - c) mállás;
  - d) átfúródás;
- 3) ütközés keltette rezgések hatása;
- 4) kiömlő üzemanyag által okozott tűz vagy robbanás hatása

A veszély jellemzése megadja e hatások meghatározásához szükséges alapadatokat, mint a repülési tömeg, sebesség, a hajtómű tömege és a gép tömeg- és merevség-eloszlása, továbbá az üzemanyag típusa, mennyisége, illetve a beesési szög.

<sup>4</sup> NEI 07-13 Revision 7, Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs, May 2009, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0914/ML091490723.pdf> . Az US NRC az US NRC Regulatory Guide 1.217 „Guidance For The Assessment Of Beyond-Design-Basis Aircraft Impacts” című útmutatója kodifikálja a NEI 07-13 alkalmazását.

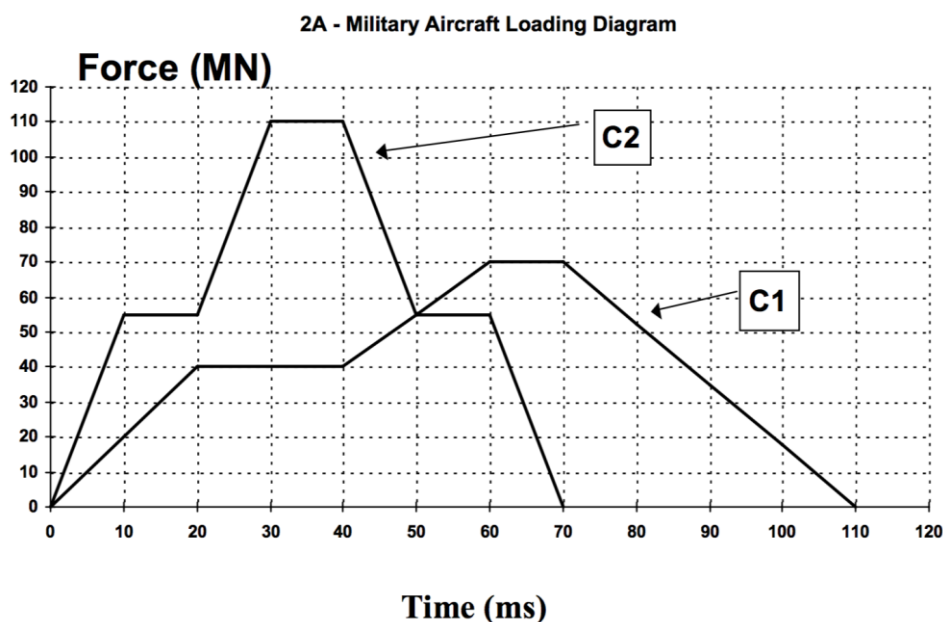
Ennek alapján lehet származtatni a várható hatásokat. Az ütközés erő-idő diagramja az elsődleges származtatott jellemző. Ez lehet szabványosított, de kiszámítható az ütközés dinamikus szimulációjával is. A szabványosított ütközés terhelés-diagramokat kísérletek alapján határozták meg, mint például a SANDIA National Laboratories által végzett kísérletek<sup>5</sup> [1]. A kísérletek azt mutatták, hogy a repülőgép kinetikus energiájának döntő részét magának a géptestnek a deformálása emészti fel.

Az EUR [16] által tipizált ütközési diagramot a 11. ábra mutatja.



11. ábra Repülőgép ütközés terhelési diagram az EUR szerint

Az EPR terhelési diagramját a 12. ábra láthatjuk (UKEPR-0002-131 Issue 04, PCSR – Sub-chapter 13.1 – External Hazards Protection [12]). Itt két görbét alkalmaztak, a C1 a konténmenten belüli szerkezetekre ható rezgés-gerjesztés válaszspektrumának származtatására szolgál (mint lejjebb a 17. ábra), a C2 pedig a merev célfelülettel való ütközést jellemzi és a penetráció ellenőrzésére szolgál.



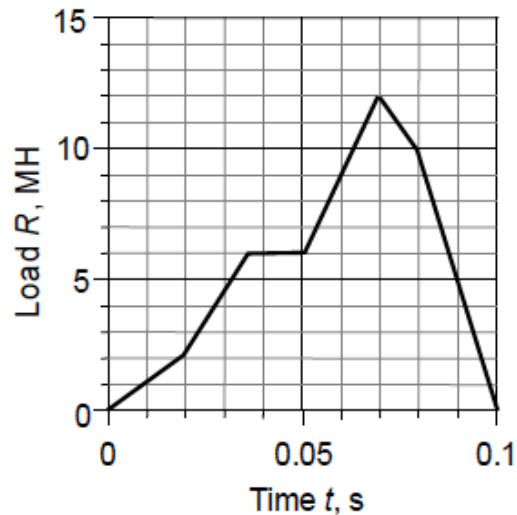
12. ábra Az EPR tervezésénél alkalmazott terhelés diagramok

A balti atomerőmű tervezésénél alkalmazott LearJet-23 terhelés diagramját a 13. ábra mutatja. A három ábra összehasonlítása önmagáért beszél, nem igényel kommentárt. A Balti EBJ-ben még szerepelnek a

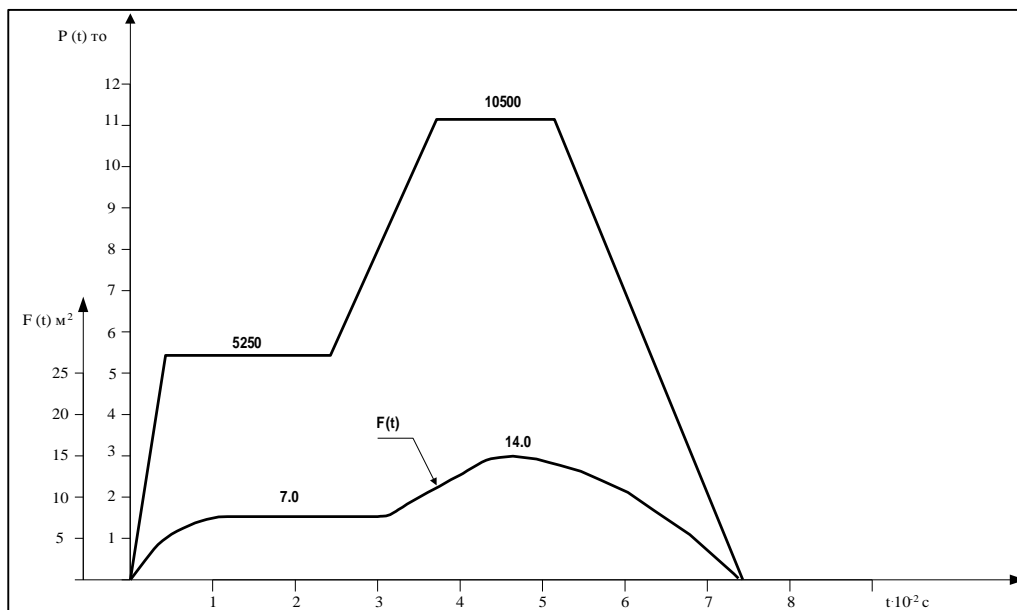
<sup>5</sup> <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6906/>

hajtómű adatai: átmérő 0,45 m, tömeg 200 kg, rázuhanás sebessége 45 m/s, a gép rázuhanási sebessége pedig 100 m/s.

Mindemellett tudni kell, hogy az orosz normatív dokumentumok ennél jelentősen nagyobb géptípus rázuhanásának figyelembe vételét követelik meg (14. ábra), de a PiN AE-5.6 [6] ebben a kérdésben a megrendelő elvárásait helyezi előtérbe.



13. ábra A balti atomerőmű tervezésénél alkalmazott terhelési diagram (A terhelési diagram függőleges tengelyén MN szerepel)

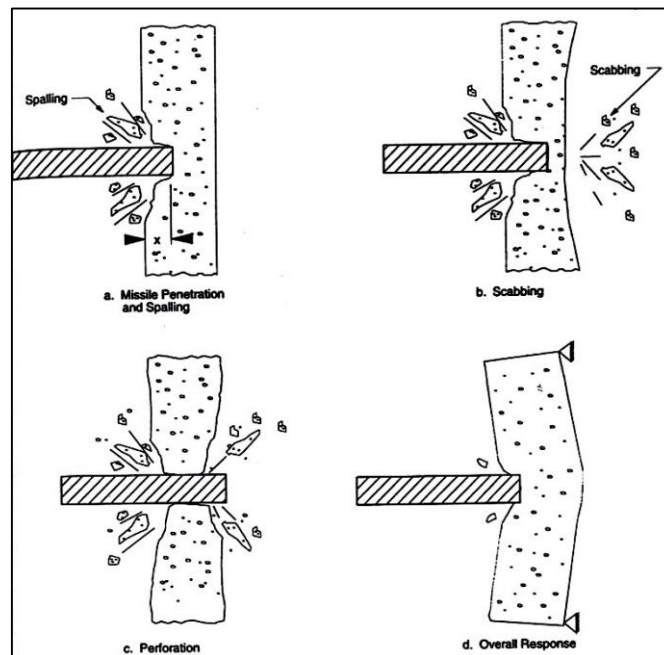


14. ábra Repülőgép rázuhanási jellemzők a PiN AE-5.6 szerint (A terhelési diagram függőleges tengelyén tonna, a vízszintesen századmásodpercek vannak, míg az alsó ábrarészlet az ütközési felületet írja le)

Összehasonlítva a 12. ábra és a 14. ábra szerinti lefutásokat és maximumokat, bizonyos hasonlóságot ugyan tapasztalhatunk (a maximumok 102,97 MN (orosz) versus 110 MN (EPR)), feltehetően azonos géposztályról, de szemmel láthatóan nem azonos géptípusról lehet szó.

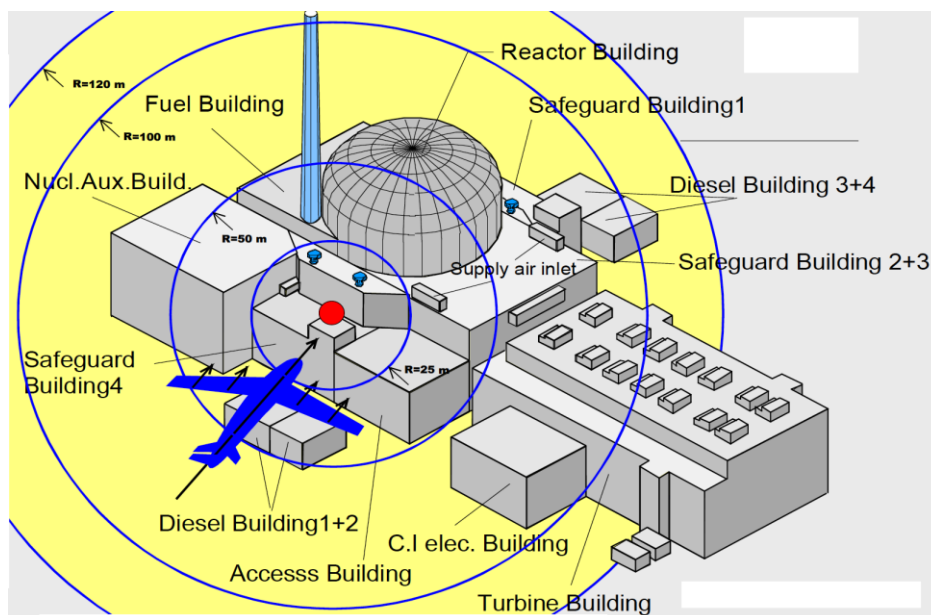
A rázuhanó gép sárkánya gyűrődő, kis merevségű, míg a hajtóművek az úgynevezett hard missile kategóriába tartoznak. A hard missile által okozott sérülések típusait a 15. ábra mutatja be. Ezeknek a

hatásoknak az elemzésére, azaz a behatolási mélység, a leválás (varasodás) és a perforáció szempontjából megfelelő falvastagság számítására empirikus formulák léteznek, lásd a már idézett NEI 07-13 (Revision 7) dokumentumot.



15. ábra A hard missile hatás-típusai

A legfontosabb másodlagos hatás az üzemanyag-tűz. Egyes mértékadó normák szerint a védőépület falának el kell viselnie 90 m átmérőjű tűzgömb 1200 °C hőmérsékletét 2 percig, míg a tartós tűz 800 °C hőmérsékletét fél óráig. A kiterjedéseket szemlélteti a 16. ábra. Alapvető információt az atomerőművek tűzbiztonságáról a NUREG-1805 [17] tartalmaz. Jellemzően az NRC egy excel számítási segédletet is publikált<sup>6</sup>. Figyelembe kell venni a tűz lehetőségét az ütközési pont alatt elhelyezkedő épületrészekben.

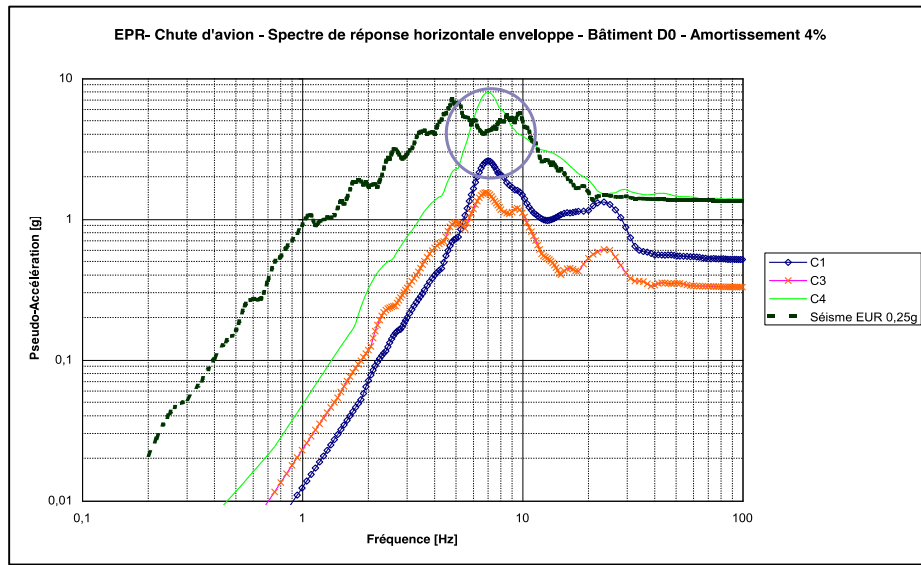


16. ábra Jellemző geometriai méretek nagy polgári repülőgép rázuhanásánál (EPR)

<sup>6</sup> ([http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/05.3\\_Thermal\\_Radiation\\_From\\_Hydrocarbon\\_Fireballs.xls](http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/05.3_Thermal_Radiation_From_Hydrocarbon_Fireballs.xls))

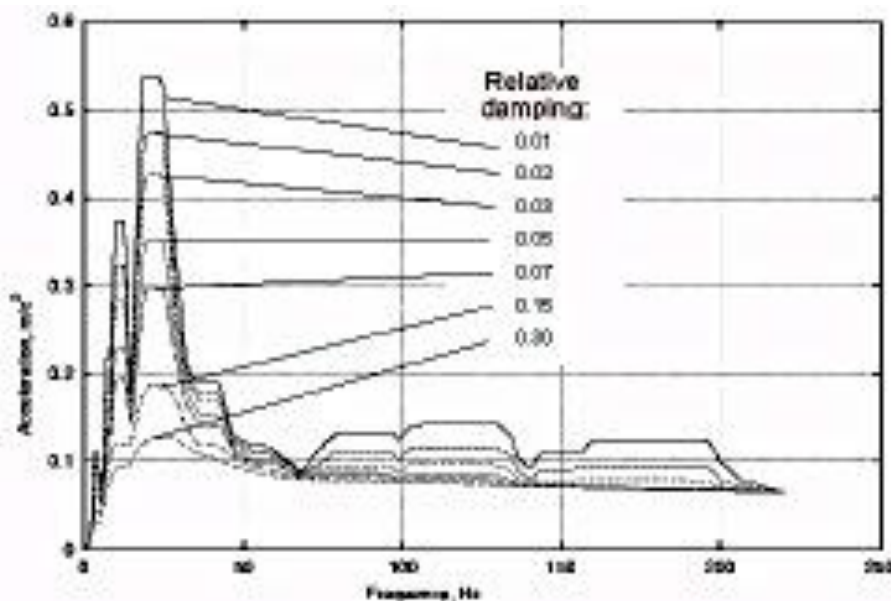
A főépület, s nyilvánvalóan így a konténment kialakításának, azon túl, hogy a lezuhanó gép üzemanyagának tüzét el kell viselni, biztosítani kell az üzemanyag elfolyását anélkül, hogy az az épület belső terébe bejutna.

A repülőgép ütközése a konténment védőépületre jelentős rezgést okoz, amire a biztonság szempontjából az adott esetben szükséges rendszereket tervezni, minősíteni kell, különösen a védőépület falához kihorgonyozott berendezéseket. Ez a rezgés frekvencia-tartalmát illetően jelentősen eltér a földrengés által okozottól. Ezt a 17. ábra szemlélteti, ahol az EPR épület válaszspektruma látható különböző repülőgép rázuhanási esetekre és földrengésre (lásd [18]). Meg kell vizsgálni a polárdaru viselkedését is az ütközés által gerjesztett épületválaszra (lásd NEI 07-13).



17. ábra A földrengés és repülőgép rázuhanása által gerjesztett rezgés válaszspektruma (EPR)

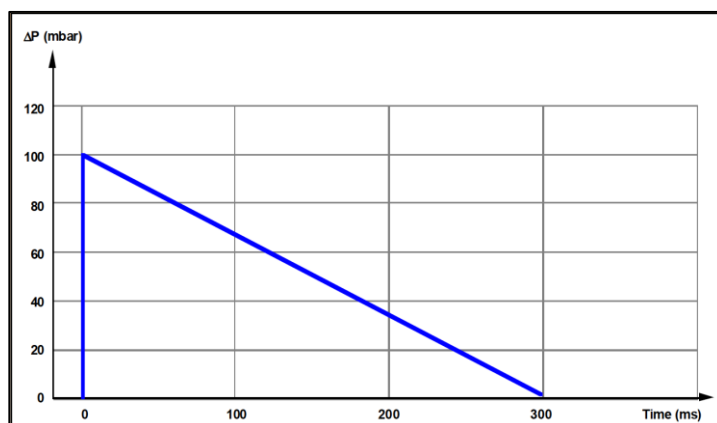
A balti atomerőmű tervében a LearJet-23 rázuhanása a fenti EPR esettől lényegesen eltérő ütközés által okozott gerjesztést vettek figyelembe, 18. ábra. A 8. ábra és a 18. ábra összehasonlítása mutatja a szeizmikus és az ütközés által okozott gerjesztés közötti különbséget.



18. ábra A repülőgép rázuhanás okozta rezgés válaszspektruma a reaktor alátámasztáson (Balti EB)

### 3.5.4. ROBBANÁS

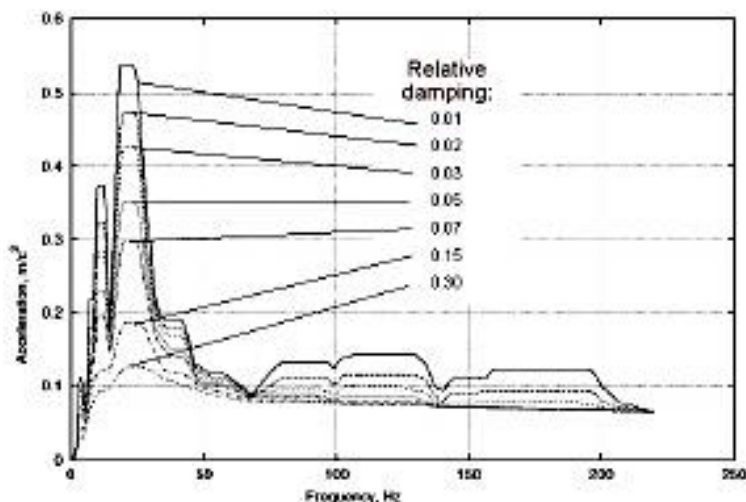
A konténment tervezésénél figyelembe kell venni a telephelyen és környezetében bekövetkező ipari baleseteket, különös tekintettel a robbanások hatásait [19]. A robbanást hatását le lehet írni általánosított terhelés diagrammal, ahogy azt az EUR [16] is ajánlja, 20. ábra.



19. ábra Az EUR által ajánlott robbanás terhelés-diagramm

A balti atomerő esetében PiN AE-5.6 [6] normatív dokumentum szerint  $\Delta p_f = 30 \text{ kPa}$  (300mbar) maximális amplitúdójú,  $\tau_+ = 1 \text{ s}$  időtartamú terhelés-diagrammal számoltak, ami úgy a maximális amplitúdó, mint az időtartam tekintetében jó háromszorosa az EUR ajánlásnak. A robbanás-veszélyt a paksi telephelyen eddigi ismeretek szerint kiszűrtük. A balti telephelyen ez erőmű területén bekövetkező tartályautó robbanás hatását vették figyelembe az adott terhelés-diagrammal. A balti atomerőmű tervezésénél, a repülőgéprázúhanás következtében 200 kg kerozin robbanásával számoltak. Ezt a fent említett 300 mbar nyomáscsúcsú terhelési görbe burkolja. A Paks2 esetében a robbanás-veszélyt kiszűrtük, ami azt jelenti, hogy ebben a tekintetben a referencia terv a telephelyre alkalmazható.

A robbanás rezgéseket gerjeszt a főépületben. A 20. ábra a robbanás válaszspektrumát mutatja a reaktor alátámasztásnál. Érdeemes megfigyelni, hogy a robbanás által okozott rezgés válaszspektruma szinte azonos a repülőgéprázúhanás által keltett rezgésével (18. ábra), azaz az erősített tartomány 0-50Hz között van, s az 5%-os csillapításnál  $0,35 \text{ m/s}^2$  a maximális spektrális gyorsulás-amplitúdó. Ezzel szemben az ábra szerint a földrezgés válaszspektrumának erősített része, ahogy várható volt, a 0-15 Hz között van és a maximális spektrális gyorsulás-amplitúdó  $35 \text{ m/s}^2$ .



20. ábra A robbanás által keltett rezgés válaszspektruma a reaktor alátámasztáson



### 3.5.5. REPÜLŐ TÁRGY

A konténmenten kívüli repülő tárgyak a védőépületet veszélyeztetik. Konténmenten kívüli repülő tárgyak származhatnak telephelyi ipari balesetekből, robbanásokból, s főképp a konténmenten kívüli technológiák meghibásodásából. Elsősorban itt a nagyenergiájú törések, de leginkább a turbinalapát töréséből eredő repülő fragmentumok jöhetnek számításba. 40 év élettartamra számítva a turbinalapát törések valószínűségét a Balti EBJ  $8 \cdot 10^{-7}$  értékben jelöli meg, ami közelítőleg  $2 \cdot 10^{-8}$ /év gyakoriságot jelent. (Nota Bene! A Balti EBJ 3.5.1.1.3.2-2 táblázatában ez az adat hibásan  $8 \cdot 10^{-8}$ /év.) A turbinalapát törésből eredő veszélyeket a turbina tengelyének megfelelő tájolásával lehet és kell kezelni. Ezt ma minden tervben figyelembe veszik (nem úgy a Paksi Atomerőmű tervezésekor).

Külső „hard missile” merev repülő tárgyak a repülőgép rázuhanás során keletkező roncsdarabok, de legfőképp maga a repülőgép hajtómű. Ezek adatait a 3.5.3. fejezetben láthatjuk. Ahogy ez fentebb már szerepelt, a balti tervben ez a „hard missile” 0,45 m átmérőjű, 200 kg tömegű és 45 m/s sebességű.

A fejezetben taglaljuk a tornádók hatásait, beleértve a tornádó által repített tárgyak jellemzőit is, amelyeket a tervezésnél figyelembe kell venni.

Repülő tárgyak keletkezhetnek a konténmenten belül robbanásokból, nyomástartó edények töréséből. Ezek hatását a konténmentre a belső térkialakítással lehet kivédeni.

### 3.5.6. METEOROLÓGIAI SZÉLSŐSÉGEK

Példát a konténment tervezésnél figyelembe veendő szélsőséges meteorológiai adatokra a 8. táblázat tartalmaz, ami egyúttal lehetővé teszi a Paksi Atomerőmű VBJ adatainak, a Paks2 adatszolgáltatás és a Balti EBJ adatainak összehasonlítását is. Ezek az adatok lényegében a konténment védőépület, a külső héj tervezése szempontjából lényegesek, mert a belső héj klimatikus viszonyait a gyűrűkamra klímája határozza meg, s azt időjárás-függetlenként kell fenntartani. A Balti EBJ 2. fejezetében (2.3.1.11.1) más adatok szerepelnek, mint a 3. fejezetben.

#### 8. táblázat A meteorológiai szélsőségek jellemzői

|                                    | VBJ<br>(10-4/év) | I.19<br>(10-5/év) | Balti (10-4/év) |               | EUR         |
|------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------|
|                                    |                  |                   | 2.<br>fejezet   | 3.<br>fejezet |             |
| maximum hőmérséklet, °C            | 45,3             | 48,2              | 46              | 52            | 42          |
| minimum hőmérséklet, °C            | -47,9            | -57,6             | -52             | -61           | -35         |
| hó, kPa                            | 1,5 (108cm)      | 1,81              | 2,5 (110cm)     | 4,3           | 1,5         |
| szélsebesség, m/s                  | 42 (48,8)        | 47,3              | 53              | 61            | 70          |
| intenzív napi csapadék maximum, mm | 132              | 155,7             | 156             | 156           | 400 (100/h) |

Az NBSZ 3a nem tekinti a tornádót különleges veszélynek, ahogy ezt teszi például az US NRC a Regulatory Guide 1.76 [19], amely az új atomerőművek esetében a  $10^{-7}$ /év (best estimate) tornádót tekinti a tervezés alapjának, s a kitettségek megfelelően három zónára bontva az USA területét, megadja a mértékadó tornádó adatait. A legkevésbé veszélyeztetett zónát véve az USA-ban a tervezés alapja a 72 m/s maximális sebességgel jellemezhető tornádó.

Az orosz szabályozás szerint a 10<sup>-4</sup>/év szintet 1000 km<sup>2</sup>-re vetítve kell értelmezni<sup>7</sup>. Létezik speciális orosz szabvány is a tornádó-veszély értékelésére és a tervezésnél való figyelembe vételére. Ez a PB-022-01 jelzetű szabvány.

A 9. táblázatban láthatjuk a Paks2 adatszolgáltatás, a Balti EBJ és az US NRC Regulatory Guide 1.76 szerinti, a tervezés alapjába tartozó tornádó jellemzőket.

A Balti EBJ 2. fejezetében (2.3.1.11.1) az RB-022-01 [20] szerint a 1000 km<sup>2</sup> referencia területet véve a tornádó gyakoriság 14•10<sup>-4</sup>/év és az intenzitás F=2.75, amelyet 76 m/s rotációs, 19 m/s translációs sebesség és 70 hPa nyomásesés jellemez. Amennyiben egy blokk biztonsági szempontból fontos építményei területét közelítőleg 25 000 m<sup>2</sup> területűnek vesszük, akkor a balti tervben a 3,5•10<sup>-8</sup>/év tornádó veszélyt vették figyelembe.

A tornádóra történő ellenőrzésnél felteszik, hogy a tornádó középpontja a főépület tengelyében van. Az épületen belül, lényegében a gyűrűkamrában, adott a nyomás, s ennek, illetve a tornádó magjában lévő nyomásnak a különbsége hat a szerkezetre. A tornádó esetére a teherkombináció az alábbi (lásd például NUREG-0800 Standard Review Plan [10], 3.3.2 Tornado Loads):

$$Q = Q_p + Q_m + 0,5\Delta p_{max}$$

ahol  $Q$  a teljes teher,  $Q_p$  a szélnyomásból adódó,  $Q_m$  az ütközésből adódó, a  $\Delta p_{max}$  pedig a nyomáskülönbségből adódó teher. A balti atomerőmű esetében  $\Delta p_{max} = 11,1 \text{ kPa}$ , a szélnyomás pedig 8,7 kPa.

#### 9. táblázat A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzői (Paks2, Balti EBJ, US NRC)

|                        |       | I.19 <sup>8</sup>       | Balti EBJ a PB-022-01 szabvány szerint   |          | US NRC              |           |            |
|------------------------|-------|-------------------------|--|----------|---------------------|-----------|------------|
|                        |       |                         | 2. kötet                                 | 3. kötet | I. régió            | II. régió | III. régió |
| valószínűség           | 1/év  | 5,6 10 <sup>-4</sup> !? | 14                                       | ?        | 10 <sup>-7</sup>    |           |            |
|                        |       |                         | 10 <sup>-4</sup> /év/1000km <sup>2</sup> |          |                     |           |            |
| intenzitás F           |       | F1-F2                   | F2,75                                    | F3,6     |                     |           |            |
| osztály ( $K_r$ )      | class | u.a.                    | 2,75                                     | 3,6      |                     |           |            |
| maximális sebesség     | m/s   | 18                      | 98                                       | 119      | 103                 | 89        | 72         |
| max. rotációs sebesség | m/s   | 32,5-70,3               | 76                                       | 95       | 82                  | 72        | 58         |
| transzlációs sebesség  | m/s   |                         | 19                                       | 24       | 21                  | 18        | 14         |
| maximum nyomásesés     | kPa   | 2                       | 7  | 11,1     | 8,3                 | 6,3       | 4,0        |
| nyomásesés sebessége   |       |                         |  |          | 3,7                 | 2,5       | 1,3        |
| hossz                  | km    |                         | 26                                       | 57,1     |                     |           |            |
| szélesség              | m     |                         | 260                                      | 571      |                     |           |            |
| sugár                  | m     |                         | 130                                      | 285      | 45,7                | 45,7      | 45,7       |
| repülő tárgy           |       | N/A *                   |  |          | lásd a 10. táblázat |           |            |

A Regulatory Guide 1.76 [19] szerint a tervezésnél a 10. táblázatban megadott, tornádó által sodort tárgyak hatását kell figyelembe venni.

<sup>7</sup> Учет опасных природных процессов и явлений при выборе площадки размещения АЭС, «СОЮЗАТОМГЕО», 2014

<sup>8</sup> Állítólóg a VBJ 2.3.2.2 alapján.

10. táblázat A tornádó által sodort tárgyak jellemzői (Regulatory Guide 1.76)

| Missile Type                   |            | Schedule 40 Pipe  | Automobile   | Solid Steel Sphere  |
|--------------------------------|------------|---|--|---|
| Dimensions                     |            | 0.168 m dia × 4.58 m long<br>(6.625 in. dia × 15 ft long) | Region I and II<br>5 m × 2 m × 1.3 m<br>(16.4 ft × 6.6 ft × 4.3 ft)          | 2.54 cm dia<br>(1 in. dia)                                |
|                                |            |   | Region III<br>4.5 m × 1.7 m × 1.5 m<br>(14.9 ft × 5.6 ft × 4.9 ft)           |   |
| Mass                           |            | 130 kg<br>(287 lb)  | Region I and II<br>1810 kg<br>(4000 lb)                                      | 0.0669 kg<br>(0.147 lb)                                   |
|                                |            |   | Region III<br>1178 kg<br>(2595 lb)   |   |
| C <sub>D</sub> A/m             |            | 0.0043 m <sup>2</sup> /kg<br>(0.0212 ft <sup>2</sup> /lb) | Region I and II<br>0.0070 m <sup>2</sup> /kg<br>(0.0343 ft <sup>2</sup> /lb) | 0.0034 m <sup>2</sup> /kg<br>(0.0166 ft <sup>2</sup> /lb) |
|                                |            |   | Region III<br>0.0095 m <sup>2</sup> /kg<br>(0.0464 ft <sup>2</sup> /lb)      |   |
| V <sub>Mh</sub> <sup>max</sup> | Region I   | 41 m/s<br>(135 ft/s)                                      | 41 m/s<br>(135 ft/s)   | 8 m/s<br>(26 ft/s)  |
|                                | Region II  | 34 m/s<br>(112 ft/s)                                      | 34 m/s<br>(112 ft/s)   | 7 m/s<br>(23 ft/s)  |
|                                | Region III | 24 m/s<br>(79 ft/s)                                       | 24 m/s<br>(79 ft/s)  | 6 m/s<br>(20 ft/s)  |

A Paks2 adatszolgáltatásban szereplő feltevés, mely szerint szél sodorta tárggyal nem kell számolni, helytelen, mivel 34m/s szélességeket felett már a sodort tárgyak hatást figyelembe kell venni. Az más kérdés, hogy egy másik hatás ezt esetleg burkolja. A kisebb tárgyak ütközése a konténment szempontjából lehet veszélytelen, de nem úgy például az állomás szempontjából.

A Balti EBJ szerint (3.10.1.1 fejezet), az F3.6 (119 m/s) tornádó esetén, az RB-022-01 [20] (illetve a PiN AE-5.6-86 [6]) szabványnak megfelelően, 1800 kg tömegű autót, 2,5 cm tömör acélgolyót és 200 mm kaliberű páncéltörő lövedéket vizsgáltak, amelyek sebessége a maximális sebesség 35%-a, azaz 42 m/s.

Az UK-EPR ezen adatait a 11. táblázat tartalmazza (PCSR – Sub-chapter 13.1 – External Hazards Protection, UKEPR-0002-131 Issue 04).

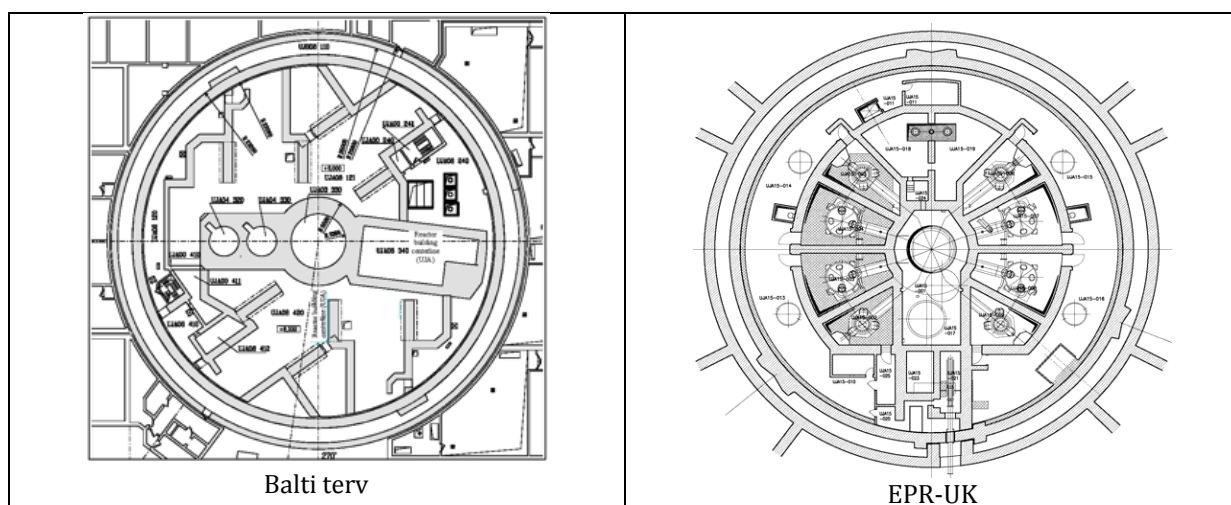
11. táblázat Szél által sodort tárgyak jellemzői az UK-EPR esetén

| Missiles        | Dimension (m)    | Mass (kg) | Maximum height (m) | Speed                         |
|-----------------|------------------|-----------|--------------------|-------------------------------|
| Automobile      | 3.8 x 1.5 x 1.3  | 900       | 0                  | 3 m/s                         |
| Wooden board    | 3.7 x 0.3 x 0.09 | 50        | Any height         | 50% of the maximum wind speed |
| Cladding sheets | 1 x 6            | 60        | Any height         | Maximum wind speed            |

### 3.6. A BELSŐ VESZÉLYEK FIGYELEMBE VÉTELE

Az NBSZ 3a 3a.2.2.7200. bekezdés értelmében tervezési megoldásokkal vagy preventív baleset-kezelési képességek kialakításával gyakorlatilag ki kell zárni azokat a hatásokat, amelyek veszélyeztethetik a konténment integritását, így különösképpen nehéz teher leejtése. Bizonyítani kell, hogy az ilyen hatások bekövetkezése fizikailag lehetetlen, vagy a bekövetkezési gyakorisága nagy biztonsággal kisebb, mint  $10^{-7}/\text{év}$ . A konténment (belső héj) szerkezetének elegendő tartalékkal kell rendelkeznie ahhoz, hogy a nevezett hatásokat elviseljék, vagy magát a veszélyt kell kizárni.

A nagyenergiájú csőtörések hatásai leginkább a konténmenten belüli szerkezetek szempontjából fontos. A térbeli szeparáció, a védőfalak és védőtávolságok, illetve az elmozdulás gátlók a hatékony megoldás a nagyenergiájú csőtörések hatásaival szemben. LBB elemzések, a megfelelő üzem közbeni vizsgálatok és monitorozás, továbbá kifolyás gátlók segítik kizárni a nagyenergiájú csőtörések veszélyét. A belső térkialakításra és szeparációra mutat példát a 21. ábra.



21. ábra A balti konténment belső térkialakítása, a térbeli szeparációt szolgáló falak

A belső veszélyeket tekintve a nehéz teher leejtését ki lehet szűrni, ha a daru és a teljes emelő szerkezet egyszer hibátűrő, és például ASME NOG-1, NUREG 0554 & NUREG 0612 követelményeinek megfelel.

A tűzbiztonságra vonatkozóan speciális tervezési követelmények és szabványok vannak, amelyek alkalmazása egyfelől minimalizálja a tűzveszélyt, másfelől lokalizálja és korlátozza a tüzek hatását.

### 3.7. A KÖRNYEZETI KÖRÜLMÉNYEK FIGYELEMBEVÉTELE

A tervezésnél, a számításokban szabványos környezeti körülményeket (szél, hó, hőmérséklet) kell figyelembe venni. Ezek általában 100 éves mértékadó értékek, amelyeket az ACI 359-2007 (ASME BPVC Section III Division 2 [13]), az ASCE/SEI 7-10 „Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” vagy az orosz esetben a SNiP2.01.07-85 [21] szabvány, avagy az MSZ EN szabványsorozat (EUROCODE) meghatározzák. Az MSZ EN 1991 Eurocode: „A tartószerkezeteket érő hatások” szabályzat az alábbi részekből áll:

- Sűrűségek, önsúly és az épületek hasznos terhei (MSZ EN 1991-1-1)
- Tűznek kitett tartószerkezeteket érő hatások (MSZ EN 1991-1-2)
- Hóteher (MSZ EN 1991-1-3)
- Szélhatás (MSZ EN 1991-1-4)
- Hőmérsékleti hatások (MSZ EN 1991-1-5)

<sup>9</sup> Magyarátul lásd Huszár Zs., Lovas A., Szalai K., A TARTÓSZERKEZETI HATÁSOK AZ EUROCODE SZERINT <http://www.hsz.bme.hu/hsz/kutatprog/fajlok/10/mszenfodemterhek.pdf>

A környezeti körülményeket akkor vesszük ilyen módon figyelembe, ha a terheléskombinációban eleve TA1-3 üzemállapotot vizsgálunk, vagy egyéb TA4 hatás mellett vesszük figyelembe a  $10^{-2}$ /év gyakoriságú szabványos környezeti körülményeket. A tervezésnél figyelembe veendő környezeti körülményekre a 12. táblázat ad példát.

**12. táblázat Példa a tervezésnél figyelembe veendő meteorológiai körülményekre**

| normatív adatok                         |     | VBJ | I.19  | SzNiP 2.01.07-85 | EUR |
|---|-----|-----|-------|------------------|-----|
| szélsebesség, 1/50 év, 10 perces átlag; | m/s | 33  | 12,12 | 30               | 43  |
| hóteher                                 | kPa | 0,4 | 0,98  | 2,4              | 0,9 |

## 4. A TEHERKOMBINÁCIÓK

3a.2.2.4800. Az egyedi események minden reális kombinációját figyelembe kell venni a tervezés során - beleértve a külső és a belső eredetű eseményeket is -, amelyek TA3-4 üzemállapothoz vezethetnek.

A tervezésnél figyelembe veendő eseménykombinációkat mérnöki megfontolások és valószínűségi elemzések együttes figyelembevételével kell kiválasztani. 3a.2.2.4900. A tervezés során meg kell határozni a figyelembe veendő külső és belső események érintett rendszerekre és rendszerelemekre gyakorolt hatásának várható mértékét és időtartamát.

A terheket megfelelő kombinációkban kell figyelembe venni a tervezésnél. Példaként lehet a konténment tervezését tekinteni, amelynél irányadó lehet a NAÜ NS-G-1.10 [9] útmutatója, illetve az orosz PNAE G-10-007-89 [10] szabvány.

A terhekre, teherkombinációkra és megengedett értékekre vonatkozó USA NRC követelményeket a vasbeton konténmentre a Regulatory Guide 1.136<sup>10</sup> [11] az acél konténmentre pedig a Regulatory Guide 1.57<sup>11</sup> [12] tartalmazza, amelyek lényegében az ASME megfelelő fejezeteire építenek. Így a vasbeton konténment esetében az ASME Section III Table CC-3230-1 specifikálja a terheket (13. táblázat). Az egyidejű hatások kezelésére pedig a 14. táblázat mutat példát a teherkombinációk formájában.

**13. táblázat A terhek a vasbeton konténment tervezésénél (ASME Section III, Table CC-3230-1)**

|       |                                       |          |   |
|-------|---------------------------------------|----------|---|
| D     | önsúly állandó teher                  | $T_t$    | hőmérsékleti hatás próba idején                   |
| L     | változó hasznos teher                 | $T_o$    | hőmérsékleti hatás üzemi vagy leállás alatt       |
| F     | feszítésből eredő teher               | $T_a$    | hőmérsékleti hatás rendellenes körülmények között |
| G     | lefúvató szelep hatása                | $R_o$    | cső terhek normál üzem vagy leállás idején        |
| $P_t$ | próba idején működő nyomás            | $R_a$    | csőterhek rendellenes üzemi körülmények között    |
| $P_a$ | konténment belső túlnyomás DBA esetén | $R_l$    | lokális csőterhek rendellenes körülmények között  |
| $P_v$ | külső nyomás                          | H        | elárasztás/árvíz okozta terhek-                   |
| $E_o$ | OBE földrengési teher                 | $E_{ss}$ | SSE földrengési teher                             |
| W     | szélteher                             | $W_t$    | tornádó   |

<sup>10</sup> <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/reg-guides/power-reactors/rg/01-136/01-136.pdf>

<sup>11</sup> <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1232/ML12325A043.pdf>

**14. táblázat A konténment teherkombinációi**

| #  | kategória                      | D   | L   | F   | G    | P <sub>t</sub> | P <sub>a</sub> | P <sub>v</sub> | T <sub>t</sub> | T <sub>o</sub> | T <sub>a</sub> | E <sub>o</sub> | E <sub>ss</sub> | W    | W <sub>t</sub> | R <sub>o</sub> | R <sub>a</sub> | R <sub>i</sub> | H   |  |     |
|----|--------------------------------|-----|-----|-----|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|--|-----|
| 1  | teszt                          | 1,0 | 1,0 | 1,0 |      | 1,0            |                |                | 1,0            |                |                |                |                 |      |                |                |                |                |     |  |     |
| 2  | építési                        | 1,0 | 1,0 | 1,0 |      |                |                |                |                | 1,0            |                |                |                 | 1,0  |                |                |                |                |     |  |     |
| 3  | normál                         | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                |                |                 |      |                | 1,0            |                |                |     |  |     |
| 4  | súlyos környezeti              | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 1,0  |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                | 1,5            |                 |      |                | 1,0            |                |                |     |  |     |
| 5  |                                | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 1,0  |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                |                | 1,5             | 1,5  |                | 1,0            |                |                |     |  |     |
| 6  | extrém környezeti              | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                |                | 1,0             |      |                | 1,0            |                |                |     |  |     |
| 7  |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                |                |                 | 1,0  | 1,0            |                | 1,0            |                |     |  |     |
| 8  | abnormál                       | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                | 1,5            |                |                |                | 1,0            |                |                 |      |                |                |                | 1,0            |     |  |     |
| 9  |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                | 1,0            |                |                |                | 1,0            |                |                 |      |                |                |                | 1,25           |     |  |     |
| 10 |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,25 |                | 1,25           |                |                |                | 1,0            |                |                 |      |                |                |                |                | 1,0 |  |     |
| 11 | abnormál/<br>súlyos környezeti | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                | 1,25           |                |                |                | 1,0            | 1,25           |                 |      |                |                |                | 1,0            |     |  |     |
| 12 |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                | 1,25           |                |                |                | 1,0            |                |                 | 1,25 |                |                |                | 1,0            |     |  |     |
| 13 |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                |                |                |                | 1,0            |                | 1,0            |                 |      |                |                |                |                |     |  | 1,0 |
| 14 |                                | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                |                |                |                | 1,0            |                |                |                 |      | 1,0            |                |                |                |     |  | 1,0 |
| 15 | abnormál/<br>extrém            | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0  |                | 1,0            |                |                |                | 1,0            |                | 1,0             |      |                |                |                | 1,0            | 1,0 |  |     |

Egy tartalmilag azonos, de szerkesztésében a fentitől eltérő teherkombináció csoportosítást az orosz PNAE G-10-007-89 [22] szabvány (15. táblázat). Itt nincsenek feltüntetve az építés alatti terhelési esetek, amelyeket általában úgyszintén figyelembe vesznek.

**15. táblázat Konténment teherkombinációk az orosz előírások szerint**

| Fázis                      | terhek és hatások |                   |              |            |                      |             |                      |                   |        |                     |                      |   |
|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------|------------|----------------------|-------------|----------------------|-------------------|--------|---------------------|----------------------|---|
|                            | üzembe helyezési  | állandó és tartós | technológiai |            |                      | szeizmikus  |                      | klimatikus        |        | humán               |                      |   |
|                            |                   |                   | normál-üzem  | üzemzavari | méretezési üzemzavar | „tervezési” | maximális méretezési | karakte-risztikus | extrém | repülőgép rázuhanás | robbanás lökeshullám |   |
| üzembe helyezési           | +                 | +                 | -            | -          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
| üzemi: tartós, rövid idejű | -                 | +                 | +            | -          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | +            | -          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | -            | +          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | -            | +          | -                    | +           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
| rend-kívüli                | -                 | +                 | -            | +          | -                    | -           | -                    | +                 | +      | -                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | -            | +          | -                    | -           | -                    | -                 | -      | +                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | -            | -          | +                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |
|                            | -                 | +                 | +            | -          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | +                    | - |
|                            | -                 | +                 | +            | -          | -                    | -           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | + |
|                            | -                 | +                 | -            | -          | +                    | +           | -                    | -                 | +      | -                   | -                    | - |

A terhek és környezeti hatások osztályozását a SNIp 2.01.07-85 [21] és a PNAE 5.6 [6] szerint kell értelmezni a jelen dokumentumban meghatározott módon. A SNIp 2.01.07-85 részletesen meghatározza és kategorizálja a terheket, megkülönböztetve: egyfelől az állandó és változó (tartós, rövid idejű, különleges) terheket, másfelől az építési és üzem alatti terheket. A SNIp 2.01.07-85 megadja a kombinációkat megkülönböztetve az alapvető (amely állandó, tartós és rövid idejű terhekből áll) és különleges kombinációkat (amely állandó, tartós, rövid idejű és egy rendkívüli teherből áll). A szabvány megadja a kombinációs tényezők értékeit, amelyeket csökkenteni lehet, ha több azonos kategóriájú teher van a kombinációban. A próbanyomás értéke a tervezési 1.15-szerese. A biztonsági tényezőt az állandó, a tartós, a rövididejű terhekre (kivéve a működő technológiai terheket) a SNIp 2.01.07-85 szerint kell felvenni. A rendkívüli hatások esetében a tényező  $\gamma_f=1,0$ . A teherkombinációk a PNAE G-10-007-89 norma 1. táblázatában találhatóak. A NAÜ NS-G-1.10 szerint a konténment terheléskombinációi a 16. táblázatban láthatók. A táblázat két utolsó sora a megfelelőségi kritériumokra utal, amelyeket az alábbiakban még taglalunk. Az EUR is meghatározza a terheléskombinációkat, amelyet 17. táblázatban láthatunk. Ennek szemlélete igen közeli az NBSZ 3a szemléletéhez.

A Balti EBJ 3. fejezete terheléskombinációk a 18. táblázatban láthatók.

**16. táblázat Terhelés-kombináció a konténment tervezésénél (NAÜ NS-G-1.10)**

|   | tervezési         | próba                  | normál-üzem | normál-üzem + extrém szél | SL-2 | külső nyomás | SL-2 + DBA | DBA | repülőgép rázuhanás | külső robbanás |
|---|-------------------|------------------------|-------------|---------------------------|------|--------------|------------|-----|---------------------|----------------|
| önsúly  | x                 | x                      | x           | x                         | x    | x            | x          | x   | x                   | x              |
| hasznos teher   | x                 | x                      | x           | x                         | x    | x            | x          | x   | x                   | x              |
| előfeszítés (ha van)                                    | x                 | x                      | x           | x                         | x    | x            | x          | x   | x                   | x              |
| próba-nyomás  |                   | x                      |             |                           |      |              |            |     |                     |                |
| próba-hőmérséklet                                       |                   | x                      |             |                           |      |              |            |     |                     |                |
| tervezési-nyomás  | x                 |                        |             |                           |      |              |            |     |                     |                |
| tervezési-hőmérséklet                                   | x                 |                        |             |                           |      |              |            |     |                     |                |
| üzemi terhek  |                   |                        | x           | x                         | x    | x            |            |     | x                   | x              |
| üzemi hőmérséklet                                       |                   |                        | x           | x                         | x    | x            |            |     | x                   | x              |
| cső-reakció   |                   |                        | x           | x                         | x    | x            |            |     | x                   | x              |
| extrém szél   |                   |                        |             | x                         |      |              |            |     |                     |                |
| külső nyomás  |                   |                        |             |                           |      | x            |            |     |                     |                |
| SL-2  |                   |                        |             |                           | x    |              | x          |     |                     |                |
| DBA nyomás  |                   |                        |             |                           |      |              | x          | x   |                     |                |
| DBA hőmérséklet   |                   |                        |             |                           |      |              | x          | x   |                     |                |
| DBA csőreakció  |                   |                        |             |                           |      |              | x          | x   |                     |                |
| repülőgép rázuhanás                                     |                   |                        |             |                           |      |              |            |     | x                   |                |
| külső robbanás  |                   |                        |             |                           |      |              |            |     |                     | x              |
| megfelelőségi kritérium szerkezeti épség (határállapot) | megeng. feszült.  | próba megeng. feszült. | I           | I                         | II   | II           | II         | I   | II                  | II             |
| megfelelőségi kritérium tömörség (határállapot)         | megeng. szivárgás | I                      | I           | I                         | II   | II           | N/A        | I   | N/A                 | N/A            |



17. táblázat Terheléskombinációk az EUR szerint

Volume 2 Chapter 9  
CONTAINMENT SYSTEM

Revision C State 05 April, 01

| Section | Requirement | Section comment | Last change |
|---------|-------------|-----------------|-------------|
|---------|-------------|-----------------|-------------|

2.9 3.1.4.5.3 Table 2: Load combinations and acceptance criteria for PWR primary containment structure

C-05

| LOAD DESCRIPTION                            | Design                  | Test        | LC1 | LC2 | LC3 | LC4 | LC5 | LC6 | LC7 | LC8 | LC10 | LC11   | LC12        | LC13        | LC14 | LC15 |
|---|-------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------|-------------|-------------|------|------|
| Dead  | X                       | X           | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X      | X           | X           | X    | X    |
| Live  | X                       | X           | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X      | X           | X           | X    | X    |
| Pre-stressing (1)                           | X                       | X           | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X   | X    | X      | X           | X           | X    | X    |
| Test Pressure                               |                         | X           |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| Test Temperature                            |                         | X           |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| Design Pressure                             | X                       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| Design Temperature                          | X                       |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| Operating Loads                             |                         |             | X   | X   |     | X   | X   | X   | X   |     |      |        |             |             | X    | X    |
| Operating Temperature                       |                         |             | X   | X   |     | X   | X   | X   | X   |     |      |        |             |             | X    | X    |
| Normal Pipe Reaction                        |                         |             | X   | X   |     | X   | X   | X   | X   |     |      |        |             |             | X    | X    |
| ADS Actuation Pressure                      |                         |             |     |     | X   |     |     | (1) | (1) |     |      |        |             |             | (1)  | (1)  |
| ADS Actuation Dynamic Load                  |                         |             |     |     | X   |     |     |     |     | X   |      | X      | X           |             | (1)  | (1)  |
| ADS Actuation Temperature                   |                         |             |     |     | X   |     |     | (1) | (1) |     |      |        |             |             | (1)  | (1)  |
| Basic Wind                                  |                         |             |     | X   |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| Extreme Wind                                |                         |             |     |     |     | X   |     |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| DBE   |                         |             |     |     |     |     | X   |     |     |     |      |        |             |             |      |      |
| DBA Pressure                                |                         |             |     |     |     |     | (2) |     |     | X   |      |        | X           |             |      |      |
| DBA Temperature                             |                         |             |     |     |     |     | (2) |     |     | X   |      |        | X           |             |      |      |
| Local Effects (DBA)                         |                         |             |     |     |     |     | (2) |     |     |     |      |        | X           |             |      |      |
| DBA Pipe Reaction                           | X                       |             |     |     |     |     | (2) |     |     | X   |      |        | X           |             |      |      |
| DEC Pressure                                |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     | X    | X      |             | X           |      |      |
| DEC Temperature                             |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      | X      |             | X           |      |      |
| Local Effects (DEC)                         |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             | X           |      |      |
| DEC Pipe Reaction                           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      | X      |             | X           |      |      |
| Aircraft Crash                              |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             | X    |      |
| External Explosion                          |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |      |        |             |             |      | X    |
| ACCEPTANCE CRITERIA<br>Structural Integrity | Design Allowable Stress | Test Limits | I   | I   | I   | I   | II  | I   | II  | I   | II   | II     | III (local) | III (local) | II   | II   |
| ACCEPTANCE CRITERIA<br>Leaktightness        | N/A                     | I           | I   | I   | I   | I   | N/A | I   | II  | I   | I    | II (3) | N/A         | N/A         | N/A  | N/A  |

| key to load combinations |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| design                   | See Section 2.9.3.1.4.6   |
| test                     | See Section 2.9.3.1.4.6   |
| LC1                      | Normal Operation (NO)     |
| LC2                      | NO + Basic Wind           |
| LC3                      | ADS Actuation             |
| LC4                      | NO + Wind                 |
| LC5                      | DBE                       |
| LC6                      | External Press. (Low AP)  |
| LC7                      | External Press. (Max. AP) |
| LC8                      | DBA                       |
| LC10                     | DEC (Pressure Load)       |
| LC11                     | DEC                       |
| LC12                     | DBA (Local Effects)       |
| LC13                     | DEC (Local Effects)       |
| LC14                     | Aircraft Crash            |
| LC15                     | External Explosion        |

- \* Lower value
- \*\* Higher value
- (1) If applicable
- (2) No consequential DBA after DBE
- (3) If the demonstration required in Section 2.9.3.1.4.2 is impracticable, then level I of leaktightness shall be applied

Example of correlation between limit state definition and standard acceptance limits

| Acceptance Criterion | Steel Structures | Concrete Structures |
|----------------------|------------------|---------------------|
| Level I              | Service Level A  | Service Level       |
| Level II             | Service Level C  | Factored Loads      |
| Level III (local)    | Service Level D  | Factored Loads      |



18. táblázat Konténment teherkombinációk az orosz előírások szerint – Balti EBJ

Table 3.7.3.1.1- Combinations of loads and impacts on structures referred to category I of responsibility for radiation and nuclear safety according to PiN AE 5.6 (except for the pre-stressed inner containment)

| Load classification | Load number                  | Load type                                       | Loads and impacts combination |         |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   |
|---------------------|------------------------------|---|-------------------------------|---------|---|---|---|---|---|---|---|----|---|---|
|                     |                              |   | Main                          | Special |   |   |   |   |   |   |   |    |   |   |
|                     |                              |   | 1                             | 2       | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |   |   |
| Constant            | 1                            | Dead weight                                     | x                             | x       | x | x | x | x | x | x | x | x  | x | x |
|                     | 2                            | Ground pressure                                 | x                             | x       | x | x | x | x | x | x | x | x  | x | x |
|                     | 3                            | Groundwater pressure                            | x                             | x       | x | x | x | x | x | x | x | x  | x | x |
| Continuous          | 4                            | Weight of stationary equipment, pipelines, etc. | x                             | x       | x | x | x | x | x | x | x | x  | x | x |
|                     | 5                            | Normal operating conditions (NOC) temperature   | x                             | -       | x | x | x | x | x | x | x | x  | x | x |
| Short-term          | 6                            | Short-term equipment load                       | x                             | x       | x | x | - | - | x | x | x | x  | x | x |
|                     | 7                            | Snow load                                       | x                             | x       | x | x | - | - | x | x | - | -  | x | x |
|                     | 8                            | Wind load                                       | x                             | -       | x | x | - | - | - | - | - | -  | x | x |
| Special             | 9                            | SSE seismic load                                | -                             | x       | - | - | - | - | - | - | - | -  | - | - |
|                     | 10                           | AOO pressure and temperature                    | -                             | x       | x | - | - | - | - | - | - | -  | - | - |
|                     | 11                           | Design-basis accident (DBA)                     | -                             | -       | - | x | - | - | - | - | - | -  | - | - |
|                     | 12                           | Shockwave impact                                | -                             | -       | - | - | x | - | - | - | - | -  | - | - |
|                     | 13                           | Load due to light aircraft crash                | -                             | -       | - | - | - | x | - | - | - | -  | - | - |
|                     | 14                           | Tornado impact                                  | -                             | -       | - | - | - | - | x | - | - | -  | - | - |
|                     | 15                           | Extreme wind load                               | -                             | -       | - | - | - | - | - | x | - | -  | - | - |
|                     | 16                           | Extreme snow load                               | -                             | -       | - | - | - | - | - | - | - | x  | - | - |
| 17                  | Extreme climatic temperature | -   | -                             | -       | - | - | - | - | - | - | - | -  | x |   |

Note – In the main combination snow load is also taken into account as constant load with a reduction factor, according to SNiP 2.01.07-85\*

A terheléskombinációk meghatározásánál különös figyelmet kell fordítani a terhek egyidejűségére és tartósságára. Például a csőtöréses hűtőközeg-vesztés után a belső nyomásból eredő teher maximuma nem esik egybe a LOCA utáni hőmérséklet-növekedésből eredő terhelés maximumával, így a nyomás, illetve konténment hőmérséklet szempontjából legkedvezőtlenebb szekvenciák maximumainak egyidejű figyelembe vétele jelentős konzervativizmust eredményez.

A kettősfalú konténmentek esetében a visszatartó funkcióval rendelkező belső és a védő funkcióval rendelkező külső héjra a funkció és az elhelyezkedés szerint eltérőek a tervezési alapba tartozó terhek és kombinációk.

## 5. AZ ANYAGVÁLASZTÁS

Az NBSZ 3a 3a.3.2.1700. bekezdés szerint biztosítani kell, hogy a konténmentben használt anyagok fizikai-kémiai tulajdonságai megakadályozzák a TA2-4 és TAK1 üzemállapotot eredményező események során a hidrogénképződést.

Fontos szempont, a konténmentben használt anyagok dekontaminálhatósága, ami részben a rozsdamentes acélburkolatok, részben pedig a dekontaminálható bevonatok alkalmazásával érhető el.

Különleges acélok a feszítő pászmák esetében alkalmaznak, a kúszási, relaxációs problémák kiküszöbölése érdekében. A referenciaként megadott atomerőmű tervében, a feszített szerkezetnél alkalmazott anyagok jellemzőit a 19. táblázat tartalmazza.

19. táblázat A feszítő pászmák anyagjellemzői a referencia terv szerint

| Notation                           | Characteristic  | Value   |
|------------------------------------|---|---|
| $D_{str}$                          | Nominal diameter of tendon  | 15,7 mm   |
| N                                  | Quantity of tendons in one bundle   | 55 pieces   |
| CBL<br>( $f_{pu} \times A_{str}$ ) | Standard breaking load of tendon, security 95%<br>(Characteristic Breaking Load)  | 279 kN  |
| CPL<br>( $f_{py} \times A_{str}$ ) | Load taken by tendon at tension 0,1% (Characteristic 0,1%<br>Proof Load)  | 248 kN  |
| $A_{str}$                          | Cross-section of one tendon   | 150 mm <sup>2</sup>                               |
| $A_{sp}$                           | Area of tendon bundle   | 8250 mm <sup>2</sup>                              |
| $f_{pu}$                           | Warranted ultimate tensile strength   | 1860 MPa  |
| $f_{py}$                           | Conventional yield strength, tension 0,1%   | 1650 MPa  |
| $E_{sp}$                           | Modulus of elasticity   | 195000 MPa  |
| $\alpha_{st}$                      | Linear thermal expansion coefficient  | $1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| $\Delta\sigma_{rel}$               | Losses due to stress relaxation over the period of<br>1000 hours:<br>- at $\sigma_{sp}/f_{pu} = 0,7$ and temperature 20 °C<br>- at $\sigma_{sp}/f_{pu} = 0,7$ and temperature 40 °C<br>- at $\sigma_{sp}/f_{pu} = 0,8$ and temperature 20 °C<br>$\sigma_{sp}$ – stress in tendons | 2,5 %<br>3,0 %<br>4,5 %                           |
| $\mu$<br>K                         | Friction coefficients of bundles:<br>- angular<br>- longitudinal  | 0,05 rad <sup>-1</sup><br>0,001 m <sup>-1</sup>   |

Különleges anyagokat kell alkalmazni az olvadék-csapadék esetében is, amire később példát mutatunk.

## 6. A MEGFELELŐSÉG MEGÍTÉLÉSE

A konténment terve megfelelőségének megítélésre szolgáló kritikus határértékek funkcionálisak, s nem szerkezetiek, azaz a tömörség (s nem az elsődleges szabványos teherbírás), a by-pass szivárgás mértéke, a kibocsátásokból eredő dóziskorlát. A konténment minősége és megfelelősége lényegében a 2 szintű PSA-val igazolható, amely figyelembe veszi a konténment viselkedését és funkcionalitását a tervezési alapot meghaladó folyamatok során.

A NAÜ NS-G-1.10 Safety Guide a szerkezeti és a funkcionális megfelelőségi kritériumokat differenciáltan állapítja meg a szerkezeti funkcióra (ez esetünkben a nyomástartás, a külső hatások elleni védelem és a berendezések szupportja), valamint a visszatartásra.

A NAÜ NS-G-1.10 Safety Guide szilárdsági szempontból három állapotot definiál:

- I. rugalmas tartomány, amelyben a szerkezeti integritás nagy mérnöki tartalékkal biztosított;
- II. kismértékű maradó alakváltozások tartománya, amelyben a szerkezeti integritás elégséges tartalékkal biztosított;
- III. nagy maradó alakváltozások, lokális sérülések tartománya, amely a tervezési alapot meghaladó esetekben engedünk meg;

A konténment tömörségére is lehet megengedett állapotokat meghatározni:

- C1. tömör konténment, a szivárgás a megengedett érték alatt van és a belső nyomással korrelál;
- C2. kismértékű szivárgás-növekedés, amely meghaladhatja a tervezési értéket, de a szivárgás megfelelő módon becsülhető;
- C3. nagy vagy igen jelentős szivárgás-növekedés, a tömörség nem biztosított, a jelentős konténment alakváltozások miatt, de a globálisan szerkezeti állékonyság még biztosítható.

Minden erőmű állapothoz, illetve terhelési esethez/kombinációhoz hozzá kell rendelni a fenti elfogadási kategóriákat. Az egyes terheléskombinációkban megkövetelt állapotot 16. táblázat két utolsó sorában mutattuk be. Általában a korszerű előírás- és szabvány-rendszerek szerint tervezett konténment a tervezési alapba tartozó terheket a rugalmas tartományban, nagy mérnöki tartalékkal elviseli.

A korszerű konténment, mint például az EPR [12] tervezési nyomása 0,55 MPa, de a terv elegendő szilárdsági tartalékot biztosít a 0,65 MPa baleseti nyomás elviselésére. A 0,65 MPa a próbanyomás értéke. A (feszített) vasbeton falat beborító acél burkolat még e nyomás felett is tömör bár maradó alakváltozásokat szenvedhet, a falak határterhelése többszöröse a tervezési értéknek.

Az EPR konténment tervezésénél ezt a koncepciót, amely a biztonság szerint gradált tervezés elvének megnyilvánulása, az alábbi megfelelőségi kategóriákat definiálva alkalmazzák (UK-EPR PCSR Sub-chapter 3.3):

- |    |  |
|----|--|
| AB | a konténment fala a terv szerinti feszültség-állapotban van, a megfelelőség a teljes élettartamra biztosított;                                   |
| RB | a konténment fala elviseli a terheket, maradó alakváltozás lehetséges, de szerkezet stabil és a szerkezet által alátámasztott rendszerelemek is; |
| C  | az acél burkolat teherviselő képesség biztosítja a visszatartást;  |
| AM | a konténment acélszerkezetei (átvezetések) a terv szerinti feszültség állapotban vannak, a burkolat a határállapotot nem éri el;                 |
| RM | az átvezetések megőrzik a funkciójukat maradó alakváltozás mellett is;   |
| E  | a radioaktív közeget tartalmazó medencék és tartályok tömörek még a maradó alakváltozások esetén is.   |

A konténment mint szerkezet megengedett állapotai és a terhelési esetek összerendelését mutatja az EPR-re 20. táblázat.

**20. táblázat A terhelési esetek és megengedett konténment állapotok az EPR esetében**

|   | belső kont. | belső szerk. | külső kont. | alap-lemez | rep.gép. védőép. | burkolat | átvezetések | IRWST tartály | reaktor akna |
|---|-------------|--------------|-------------|------------|------------------|----------|-------------|---------------|--------------|
| normálüzem                                  | AB          | AB           |             | AB         |                  | C+AM     | C+AM        | E             | E            |
| ≤10-2/év gyakoriságú állapotok, tranziensek | AB          | AB           |             | AB         |                  | C+AM     | C+AM        | E             |              |
| OBE   | AB          | AB           | AB          | AB         | AB               |          |             | E             | E            |
| szél és hó                                  |             |              | AB          |            | AB               |          |             |               |              |
| extrém hőmérs.                              |             |              | AB          |            | AB               |          |             |               |              |
| intergrális                                 | AB          |              | AB+C        | AB         |                  | C+AM     | C+AM        |               |              |
| DBE   | RB          | RB           | RB          | RB         | RB               | C        | C           | E             | AM           |
| rep.gép. rázuhanás                          |             |              | RB          | RB         | RB               | C        | C           | E             | AM           |
| robbanás, tűz                               |             |              | RB          |            | RB               |          |             |               |              |
| nagyenergiás csőtörés                       | RB          | RB           | lokális RB  |            |                  | C        | RM          |               |              |
| <10-3/év gyakor. esemény és DEC             | RB          | RB           |             |            |                  | C        | C           | E             |              |
| súlyos baleset                              | RB          | RB           | C           | RB         |                  | C        | C           |               |              |
| DEC GB LOCA (0,65MPa, 170°C)                | RB          | RB           |             | RB         |                  | C        | C           |               |              |
| SLB LOCA +DBE, (0,48MPa, 0,25g)             | RB          | RB           |             | RB         |                  | C        | C           |               |              |

A táblázatban az üresen hagyott pozícióknál az állapokra vonatkozó kikötés nincs értelmezve.

## 7. A „CLIFF-EDGE” EFFEKTUS, HATÁRTERHELÉS

A szakadékszél-jelenséget a konténment esetében konstrukció megfelelő kialakításával és teherbírási tartalékokkal valósítjuk meg. Ezeknek elégségeseknek kell lenni akkor is, ha a konténment technológiai rendszerei nem a terv szerint működnek. A tartaléknak minden terhelési állapotban, minden belső és külső hatást tekintve meg kell lenni.

A belső nyomással szembeni tartalékot határterhelhetőség-elemzéssel állapítják meg, amely szerves része a 2. szintű PSA-nak is, hiszen a konténment sérülését és visszatartási képessége csökkenését így lehet mennyiségileg meghatározni. Igen fontos, hogy a határterhelhetőséget, illetve a meghatározására szolgáló módszereket, a szerkezetek konstitutív modelljeit a tervező, szállító kísérletekkel alátámassza. Alapvető munkáknak tekinthetjük ebben a témában az alábbiakat:

Hessheimer, M. F., Dameron, R. A. (2006), Containment Integrity Research at Sandia National Laboratories, NUREG/CR-6906, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6906/>, SAND2006-2274P [1]

NUREG/CR-6810, –Overpressurization Test of 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, March 2003 [25],

NUREG/CR-6809, –Posttest Analysis of the NUPEC/NRC 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, March 2003 [26]



22. ábra SANDIA "test to failure"



Az 1:4 léptékű konténment a tervezési nyomás 2,5 szeresénél kezdett el jelentősebben szivárogni, mire a belső nyomást gyorsabban növelve elérték, hogy a tervezési nyomás 3,1-szeresénél a modell felnyíljon<sup>12</sup> (22. ábra).

A kísérletek igazolták, hogy az acél konténmentek esetében 2,0-3,0 % globális megnyúlás, míg a vasbeton konténmentek esetében 1,5-2,0 % megnyúlás esetén következik be a tönkremenetel. A NUREG/CR-6810 megmutatta, hogy a feszítő pászmák (hoop) 0,9-1,4 %-os átlagos megnyúlása után (beleértve a feszítés által kiváltottat is) várható a fal sérülése. Mindezek azt eredményezték, hogy megjelenhettek 2007-ben az SRP 3.8.1 és 3.8.2 alfejezeteiben az alakváltozásra vonatkozó egyszerű kritériumok.

A tartalékokat értékelni lehet determinisztikus és valószínűségi módszerrel egyaránt (lásd Klamerus, E. W., Bohn, M. P., Wesley, D. A., Krishnaswamy C. N. (1996). "Containment Performance of Prototypical Reactor Containments Subjected to Severe Accident Conditions", NUREG/CR-6433 [28], US NRC, továbbá NUREG-1150, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five US Nuclear Power Plants", US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1990 [29]).

Az AP1000 Europe konténment determinisztikus módon meghatározott terhelhetőségét a 21. táblázat adatai jellemzik (3. Design of Structures, Components, AP1000 European, Equipment and Systems Design Control Document, EPS-GW-GL-700 3G-1 Revision 1 [30]).

**21. táblázat Az AP1000 Europe terhelhetősége belső nyomásra**

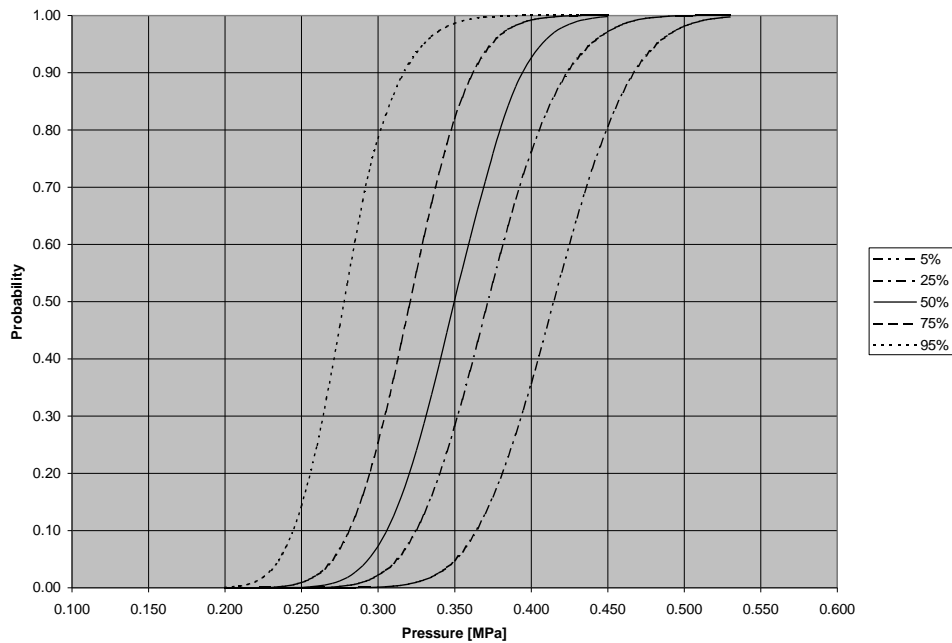
| Table 3.8.2-2                            |             |   |                                   |                                   |  |                                   |
|--|-------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| CONTAINMENT VESSEL PRESSURE CAPABILITIES |             |   |                                   |                                   |  |                                   |
| Containment Element                      |             | Pressure Capability                                   |                                   |                                   |  |                                   |
|  |             | Deterministic Severe Accident Capacity <sup>(1)</sup> |                                   |                                   | Maximum Pressure Capability <sup>(2)</sup> |                                   |
| Temperature                              |             | 100°F<br>(37.78°C)                                    | 300°F<br>(148.89°C)               | 400°F<br>(204.44°C)               | 100°F<br>(37.78°C)                         | 400°F<br>(204.44°C)               |
| Cylinder                                 |             | 135 psig<br>(0.931 MPa<br>gauge)                      | 117 psig<br>(0.807 MPa<br>gauge)  | 112 psig<br>(0.772 MPa<br>gauge)  | 155 psig<br>(1.069 MPa<br>gauge)           | 129 psig<br>(0.889 MPa<br>gauge)  |
| Ellipsoidal Head                         |             | 104 psig<br>(0.717 MPa<br>gauge)                      | 91 psig<br>(0.627 MPa<br>gauge)   | 87 psig<br>(0.600 MPa<br>gauge)   | 174 psig<br>(1.200 MPa<br>gauge)           | 144 psig<br>(0.993 MPa<br>gauge)  |
| 16-foot<br>equipment<br>hatch            | F.S. = 1.67 | 126 psig<br>(0.869 MPa<br>gauge)                      | 121 psig<br>(0.834 MPa<br>gauge)  | 118 psig<br>(0.814 MPa<br>gauge)  | 210 psig<br>(1.448 MPa<br>gauge)           | 198 psig<br>(1.365 MPa<br>gauge)  |
|  | F.S. = 2.50 | 84 psig<br>(0.579 MPa<br>gauge)                       | 81 psig<br>(0.558 MPa<br>gauge)   | 79 psig<br>(0.545 MPa<br>gauge)   |  |                                   |
| Personnel airlocks <sup>(3)</sup>        |             | >163 psig<br>(1.124 MPa<br>gauge)                     | >163 psig<br>(1.124 MPa<br>gauge) | >163 psig<br>(1.124 MPa<br>gauge) | >300 psig<br>(2.068 MPa<br>gauge)          | >300 psig<br>(2.068 MPa<br>gauge) |

**Notes:**

1. The buckling capacity of the ellipsoidal head is taken as 60 percent of the critical buckling pressure calculated by the BOSOR-5 nonlinear analyses; the buckling capacity at higher temperatures is calculated by reducing the capacity at 100°F (37.78°C) by the ratio of yield at 100°F (37.78°C) to yield at the higher temperature. Evaluations of the equipment hatch covers are shown both for ASME paragraph NE-3222 (F.S. = 2.50) and Code Case N-284 (F.S. = 1.67). Evaluations of the other elements are according to ASME Service Level C.
2. The estimated maximum pressure capability is based on minimum specified material properties.
3. The capacities of the personnel airlocks are estimated from test results.

<sup>12</sup> <http://www.sandia.gov/media/NewsRel/NR2000/pccvtest.htm>

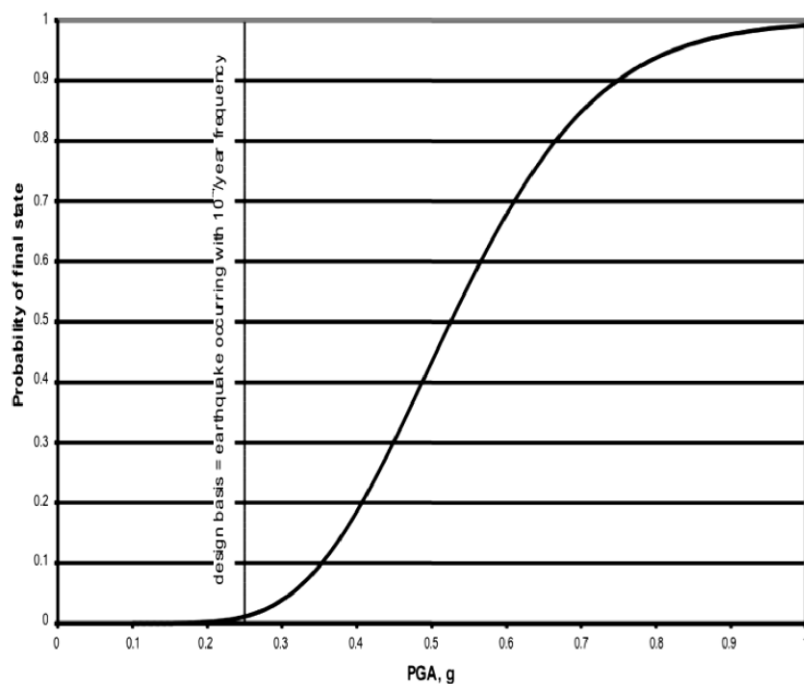
A valószínűségi módszerrel meghatározott határ teherviselő képességre a Paksi Atomerőmű konténmentjének belső nyomásra vonatkozó sérülési görbéi szolgálnak példaként, amint azt a 23. ábrán láthatjuk [31].



23. ábra Paksi Atomerőmű konténment sérülési görbék belső nyomásra

A földrengés hatásával szemben az európai konvenciók szerint 40% tartalékot kell igazolni a biztonsági földrengés felett maximális vízszintes gyorsulásban értelmezve. AZ USA gyakorlatában ez 67%.

A Paksi Atomerőmű konténmentjének földrengésre vonatkozó mean sérülési görbéjét a 24. ábra mutatja [32].



24. ábra Paksi Atomerőmű konténment mean konténment sérülési görbe földrengésre

Nincs kvantitatív kritérium, de hasonlóan kell eljárni a többi hatás, illetve hatáscsoport esetén.

A szakadékszél-jelenség kizárása adja meg a lehetőségét annak, hogy a tervezési alapban nem kezelt scenáriók esetén is biztosítható, ahogy az 3a.2.2.8900. megköveteli, hogy a konténment rendszer TAK üzemállapotot eredményező esemény esetén operátori beavatkozás nélkül legalább 12 órán, de lehetőleg 24 órán át álljon ellen.

## 8. A MEGFELELŐSÉG ELLENŐRZÉSE, A KONTÉNMENT PRÓBÁK

Az NBSZ 3a 3a.2.4.1600., 3a.3.3.0400. bekezdései szerint a konténment hőmérsékletére, nyomására és a szivárgás mértékére kritériumokat kell megállapítani, és nyomástartó képességének rendszeres ellenőrzési lehetőségét biztosítani kell.

A konténment állapotának üzem közbeni ellenőrzése a megkövetelt műszaki állapot és biztonsági funkció fenntartásának szükségszerű feltételei. Ezt a területet a megfelelő szabványok is lefedik, így például a következők:

- ASME BPVC, Section XI, “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components,” Subsection IWE, “Requirements for Class MC and Metallic Liners of Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Power Plants [33]
- ASME BPVC, Section XI, “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components.” Subsection IWL, “Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants.”[34].

Az egyszeres konténmentek állapotának ellenőrzése, öregedés-kezelése különös figyelmet követel. Ilyen az AP1000 szabadon álló acél konténmentje, amely lényegében egy egyszeres gát, hisz a védőépületnek nincs visszatartási funkciója (ahogy azt a kritikussai is hangoztatják).

A kettősfalú konténmentek külső fala a környezeti hatásoktól való védelem mellett jelentős visszatartási képességgel is rendelkezik. Ezért a konténment minden lehetséges hibamódjának és öregedési folyamatának nagy figyelmet kell szentelni, hiszen – lévén csak korlátozottan javítható, de nem cserélhető rendszer – meghatározza az erőmű élettartamát.

A konténment funkció üzem közbeni ellenőrzésére szolgálnak a tömörség-vizsgálatok. Például a 10CFR50 Appendix J „Primary Reactor Containment Leakage Testing for Water-Cooled Power Reactors” [35] és más források szerint háromféle konténment tömörsége-ellenőrző tesztet szoktak végezni:

- A-típusú teszt első integrális illetve ismételt integrális tömörségvizsgálat;
- B-típusú teszt a lokális tömörségvizsgálat, átvezetések, zsilipek, stb.;
- C-típusú teszt a konténment izoláló armatúrák lokális tömörségvizsgálata.

Az integrális tömörségvizsgálat nyomásértéke lehet igen magas is, például  $0,9 \div 1,0 P_d$ .

Fentiek mellett létezik a nyomáspróba, vagy szerkezeti integritás teszt, ami nem a szivárgás-ellenőrzésre, hanem a szilárdság ellenőrzésére szolgál az üzembe helyezés során (lásd az ASME BPVC Section III, Division 2, Article CC-6000, “Structural Integrity Test of Concrete Containments”). Ennek a próbának a nyomásértéke  $1.125 P_d$ .

A „próbák” teherkombináció ellenőrzés tárgyát képezi az előírások szerint.

Ugyanígy érdemi igénybevételt jelentenek a konténment egésze számára az ismételt integrális vizsgálatok. A tömörségvizsgálatoknak átgondolt rendszere van. Az Integrated Leak Rate Test nyomásértéke lehet igen magas is, például  $0,85 \div 0,9 P_d$  (lásd 10CFR50, Appendix J, továbbá ANSI/ANS N45.2-1974 “Leakage Rate Testing of Containment Structures for Nuclear Reactors és ANSI/ANS N56.9-1987 “Containment System Leakage Testing Requirements). Az üzemeltetést megelőző és az üzem közbeni integrális tömörségvizsgálatok végrehajtásának követelményeit az SRP 6.26 fejezete hivatkozta meg<sup>13</sup>.

Nyilvánvaló, semmilyen szilárdsági számítás nem alkalmas arra, hogy a meglévő, javarészt ismeretlen geometriájú, s esetenként rejtett, takart szivárgási helyek nyomás-szivárgás összefüggését megadja, s így alapja legyen egy integrális tömörség-ellenőrzési stratégiának.

<sup>13</sup> Üzembe helyezéskor végeznek egy úgynevezett „Peak Pressure Test”-et, ami épp a tervezési nyomáson történik, amellet, hogy az üzembe helyezéskor csökkentett nyomáson is ellenőrzik a szivárgást (pl.  $0,5 P_d$ ).



A szilárdsági számításal a konténment és a burkolat, terhelésre történő alakváltozását, az egymáshoz mért elmozdulását, az ébredő feszültségeket, s az ilyen terhelések ismétlődésének fárasztó hatását lehet értékelni.

Az US szabványainak és az NRC előírásainak emlegetése nem hiábavaló a mi esetünkben sem, mivel a mintaként tanulmányozható Balti EBJ 3. fejezetében (3.12.2.6.4) az NP-010-98 orosz norma mellett az ACI 359 (alias ASME BPVC Section III, Division 2) szerepel, mint a konténment megfelelősége ellenőrzésének alapja. Itt szerepelnek a szilárdsági nyomáspróba elfogadhatóságának kritériumai (alakváltozás, elmozdulás). A balti atomerőmű esetében a szilárdsági megfelelőség ellenőrzését a maximális tervezési nyomás (0,45MPa) 1,15-szeresén végzik. LB LOCA körülmények között 0,2% konténment térfogatnyi lehet 24 óra alatt a szivárgás.

Nyilvánvaló, hogy a konténment megfelelőségének tesztelésére és üzem közbeni ellenőrzésére megfelelő rendszereket és hozzáférést kell biztosítani a tervezőnek.

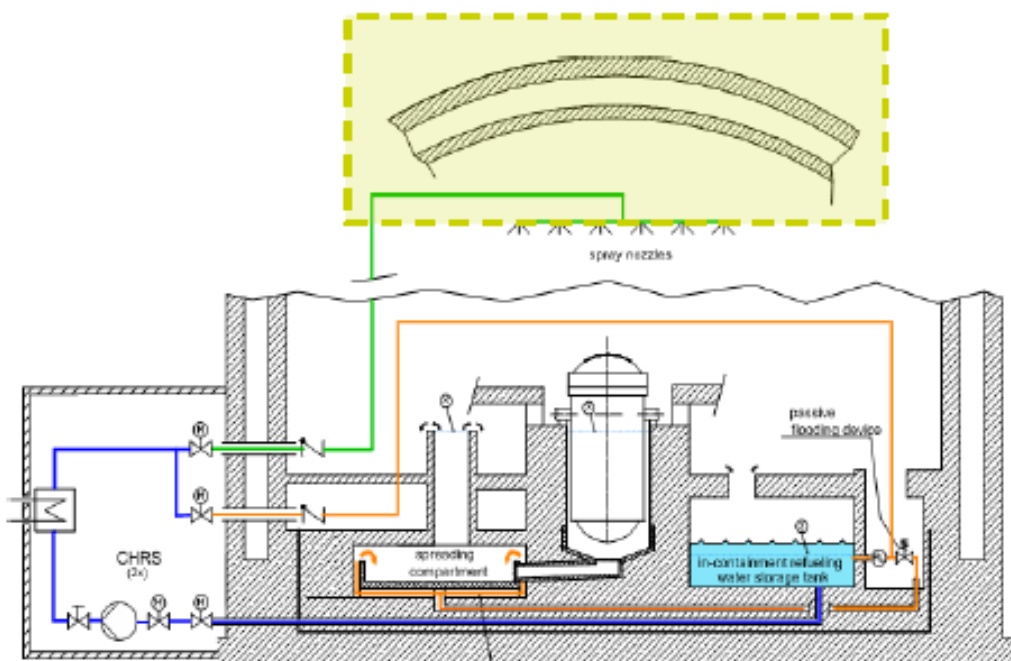
A feszített vasbeton konténmentek feszítő pászmáira úgyszintén ellenőrzési programot kell kidolgozni (kúszás miatti lazulás, a feszítés elvesztése).

A korszerű konténmentek élettartama minimum 60 év. Számolni kell azzal, hogy egy esetleges élettartam hosszabbításnál a konténment élettartama korlátozza az üzemidőt. Ezért a konténmentre a tervezés során el kell végezni az élettartam-korlát elemzéseket, s ezek eredményei, s az üzemeltetési tapasztalatok, az alkalmazott anyagok viselkedésére, az adott közegben lejárló degradációjára tekintettel ki kell dolgozni a konténment öregedéskézelési programjait.

A tárgyban hasznos információt tartalmaznak a [36]-[43] irodalmak.

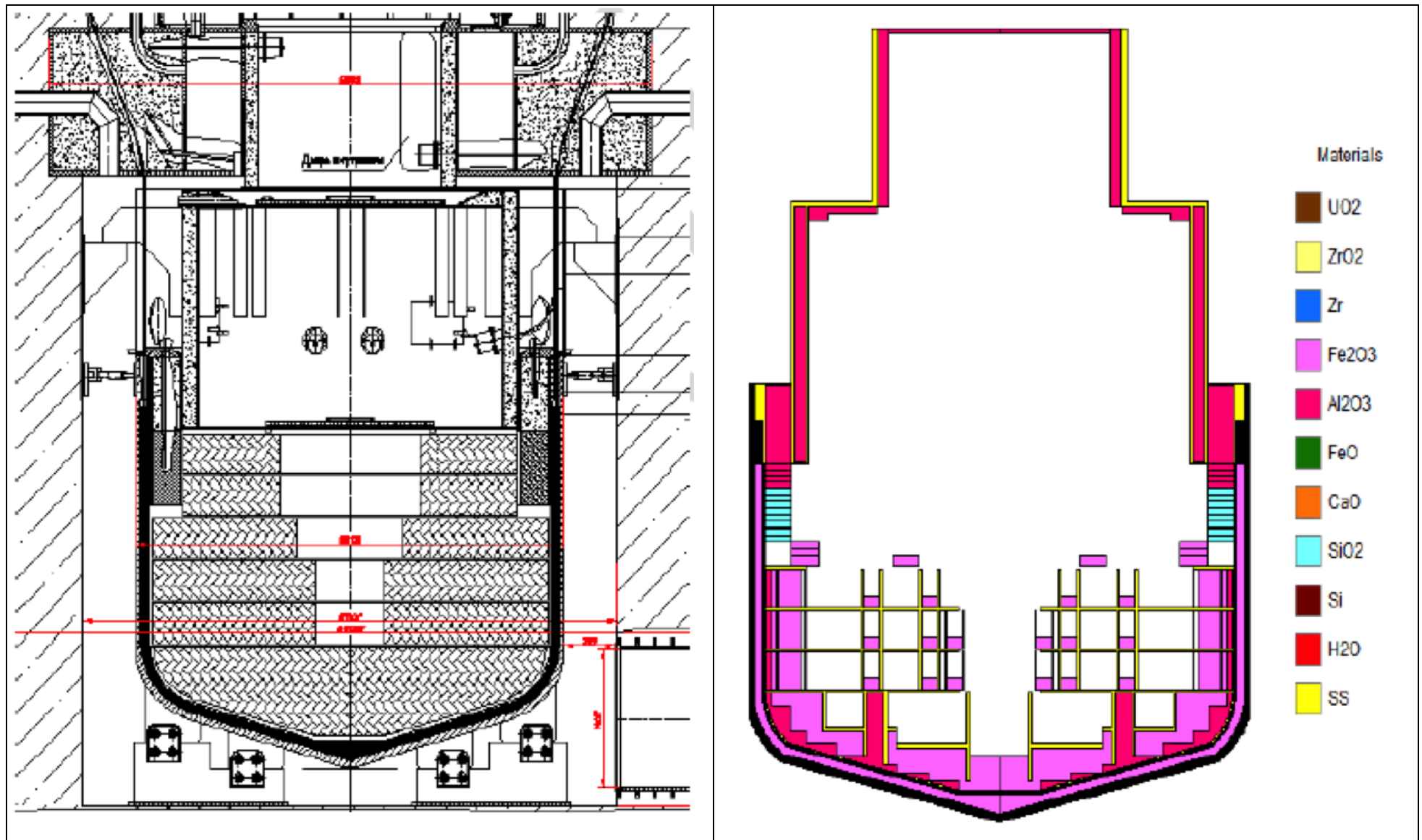
## 9. KONTÉNMENT FUNKCIÓ SÚLYOS BALESETEK ESETÉN

A konténment tervének – a szerkezeti robusztusság és tartalékok, illetve a konténment védelmét szolgáló biztonsági rendszerek, beleértve a balesetkezelés eszközöket eljárásokat is – biztosítani kell a körülményeknek megfelelő szerkezeti épséget és a szivárgás minimális szinten tartását a TAK1 és TAK2 állapotokban is. Van a konténmentnek egy szerkezeti része, amelynek kifejezetten TAK2 esetben van funkciója, s ez a zónaolvadék-csapda. Az EPR olvadékcspadájának sémáját mutatja a 25. ábra.



25. ábra Az EPR olvadékcspadájának sematikus rajza

Az orosz terv szerinti olvadékcspada konstrukcióját és anyagi összetételét a 26. ábra mutatja.



26. ábra Az olvadék-csapda az orosz terv szerint

## 10. KONSTRUKCIÓ, TERVEZÉSI SAJÁTOSSÁGOK

A korszerű konténmentek két archetípusának összehasonlítását a 22. táblázatban láthatjuk.

**22. táblázat A korszerű EPR és AP1000 konténmentek fő jellemzői**

|                                     | EPR  | AP1000  |
|-------------------------------------|--|---|
| a konténment koncepciója            | kettősfalú vasbeton konténment, a belső fal előfeszített, az 1,3 m vastag falat 8 mm vastag acél burkolat hermetizálja   | SA738 Grade B, 44,45 mm vastag acél konténment, amely önmaga a konténment hűtőrendszer része, a tulajdonképpen hermetizáló és hőátadó felület,  |
|                                     | a külső fal 1,8 m vastag nem feszített vasbeton, az ezt körülvevő épületek szerepe még a repülőgép rázuhanástól és más külső hatásoktól való védelem és a súlyos baleset esetén bizonyos mértékű visszatartás          | védőépület a külső hatásokkal szemben, konténment hűtés és másodlagos visszatartás funkcióval, 0,5-1,37m vastag SCS konstrukció 16000m <sup>3</sup>   |
| tervezési nyomás                    | LOCA illetve főgőzvezeték törés 0,55 MPa   | LOCA illetve főgőzvezeték törés 0,51MPa   |
| próbanyomás                         | 0,65 MPa   | ASME BPVC NE-6000 and NC-6000 szerint   |
| szivárgás                           | <0,3% a tervezési nyomáson   | <0,1% a tervezési nyomáson  |
| a konténment rendszerei             | sprinkler - nincs<br>szellőző-rendszer, baleseti konténment hűtőrendszer (spray és zsompon keresztüli hűtés), amelynek berendezései a konténmenten kívül vannak<br>~2000m <sup>3</sup> IRWST tartály az aktív hűtéshez | külső passzív hűtés biztosítja a hőelvitelt és a túlnyomás-védelmet kezelői beavatkozás nélkül 3 napig, ha csak léghűtés van a konténment acél fal igénybevétele nem haladja meg a Service Level C megengedett értéket, két lefűvadási lehetőség<br>~16000m <sup>3</sup> tartály a védőépület tetején a konténment hűtéshez |
| gázkezelés                          | katalitikus rekombinátorok és gyújtók, 100% Zr reakcióba lép   | katalitikus rekombinátorok és gyújtók, 100% Zr reakcióba lép  |
| külső veszélyekkel szembeni védelem | biztonsági földrengés maximális vízszintes gyorsulása 0,25g, tartalék igazolása 1,4xDBE-re   | biztonsági földrengés maximális vízszintes gyorsulása 0,3g, tartalék igazolása 1,67xDBE-re  |
|                                     | nagy polgári repülőgép, védőépület   | nagy polgári repülőgép rázuhanásra tervezett a védőépület, amelyet 70%-ban árnyékol a segédépület   |
|                                     | 10kPa lökéshullám  | telephely-specifikus követelmény, (az egyéb külső veszélyek tornádó, hurrikán burkolhatják)   |
| esemény-kombinációk                 | SLB LOCA 0,48Mpa + DBE 0,25g   | S/MB LOCA + SSE 0,3g  |
| olvadék-kezelés                     | olvadék-csapda az IRWS-ből hűtve   | visszatartás a reaktor tartályban   |

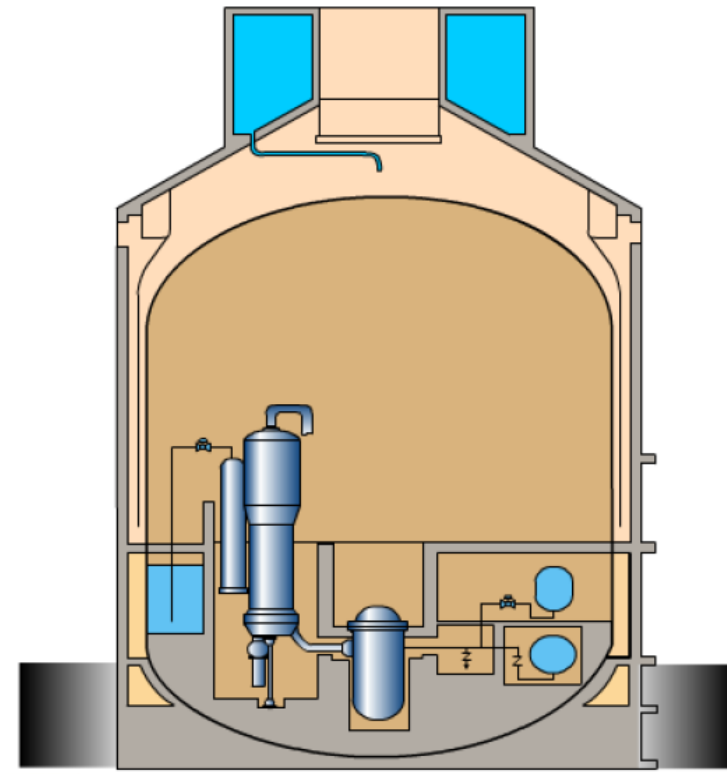
IRWST - in-containment refuelling water storage tank

SCS – steel-concrete-steel, acélcéllás vasbeton

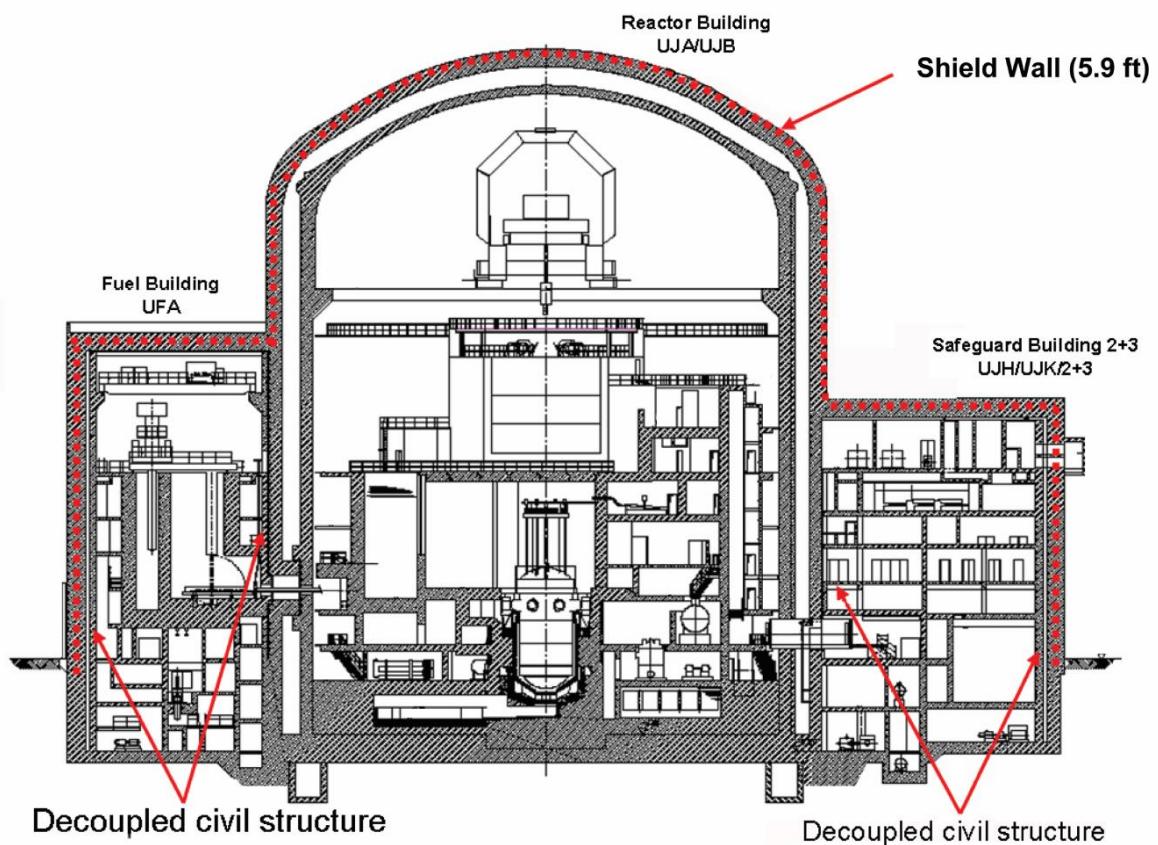
A két alaptípust reprezentálja az AP1000 (27. ábra) és az EPR (28. ábra) mellett az orosz atomerőmű konténmentjének terve is (29. ábra), amelynek alapadatait a 23. táblázat tartalmazza.

A kettős vasbeton konténmentek esetében a hermetizálást acél burkolattal oldják meg, amely például az orosz terv szerint 6 mm vastag C255 típusú szénacél lemezből készül. Ebből kifolyólag igen fontos eleme a hermetizáló burkolatnak a dekontaminálható, korrózióvédő bevonatolás (3a.4.6.1300.). Lásd még a [10] dokumentumot.

A hermetikus átvezetések, zsilipek a konténment nyomástartó kontúrja részét képezik, ezért ezek tervezésére a konténmenttel azonos követelmények érvényesek [2], [10].

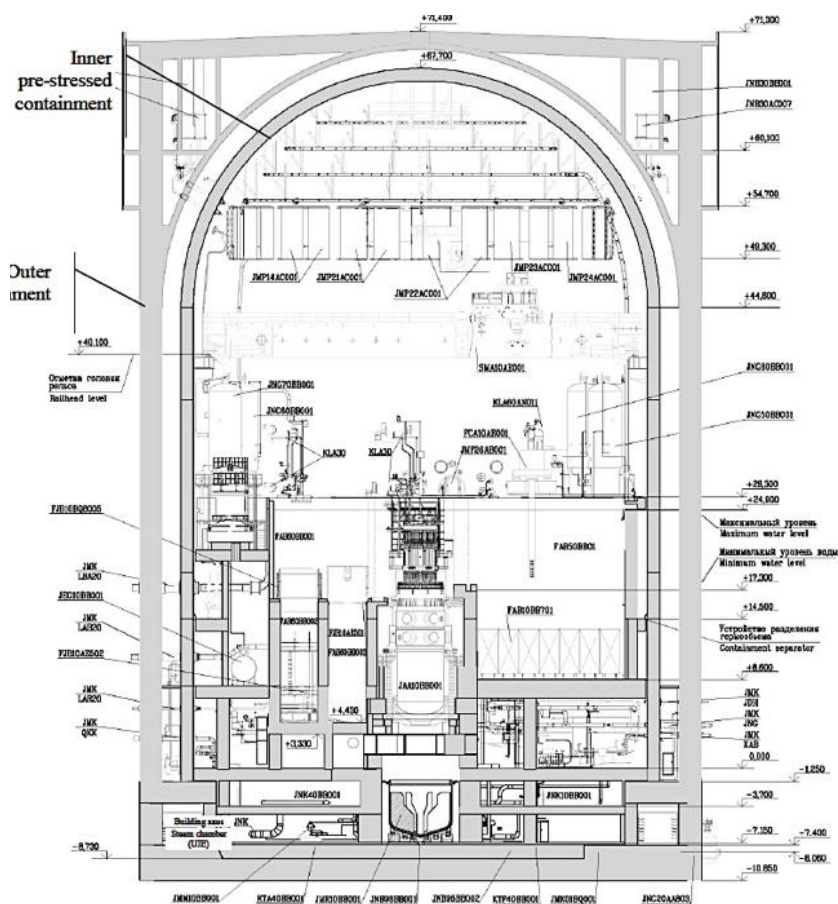


27. ábra Az AP1000 konténment sematikus rajza



28. ábra Az EPR konténmentje



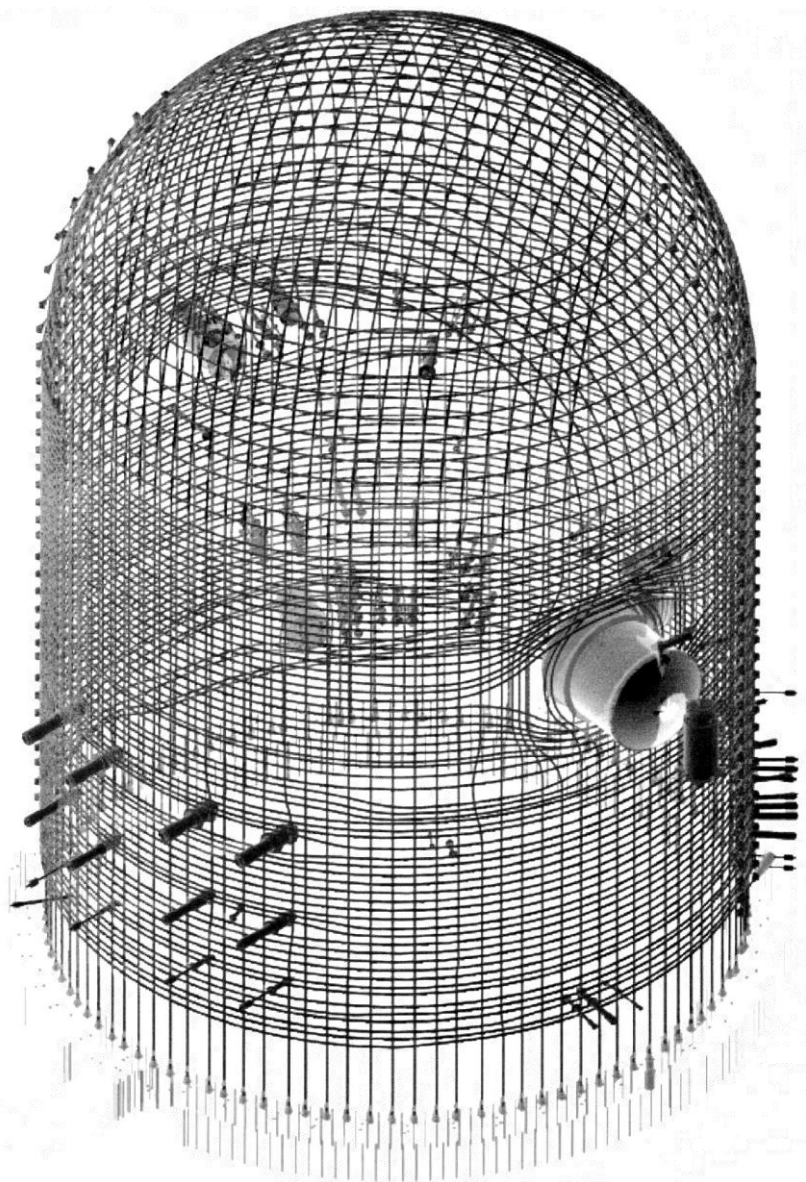


29. ábra Az orosz kettős konténment sematikus rajza

23. táblázat Az orosz terv szerint kettős konténment alapadatai

|  |      |      |
|--|------|------|
| <b>11.1 Parameters and dimensions of inner containment from pre-stressed ferroconcrete with inside steel lining:</b> |      |      |
| Excess design pressure, MPa  | 0.4  | 0.4  |
| Design temperature, C°   | 150  | 150  |
| Inside diameter, m   | 44.0 | 44.0 |
| Height (from inside), m  | 63.0 | 67.6 |
| Thickness:   |      |      |
| vertical wall, mm  | 1200 | 1200 |
| dome, mm   | 1000 | 1000 |
| <b>11.2 Parameters and dimensions of outer containment from monolithic ferroconcrete:</b>                            |      |      |
| Inside diameter, m   | 50.0 | 50.0 |
| Height (from inside), m  | 66.0 | 70.2 |
| Concrete thickness:  |      |      |
| vertical wall, mm  | 600  | 800  |
| dome, mm   | 600  | 600  |

A piacon lévő korszerű konténmentek (AP1000 kivételével) előfeszített szerkezetek. Az orosz tervezésű konténmentek feszítő pászmák hálóját a 30. ábra mutatja. A feszítést post-tensioning technikával, azaz a beton megkötése után hozzák létre. A feszítő pászmák és módszerek szigorú minősítési eljárás tárgyát képezik, mint például a VSL és a Freyssinet rendszer is rendelkezik ASTM és ETA minősítéssel (például a VSL "European Technical Approval No ETA-06/0006. VSL Post-Tensioning System. Post-Tensioning Kits for Pre-stressing of Structures. Valid from 31-07-2006 to 30-07-2011").



30. ábra Az orosz tervezésű konténment feszítő pászmáinak hálója

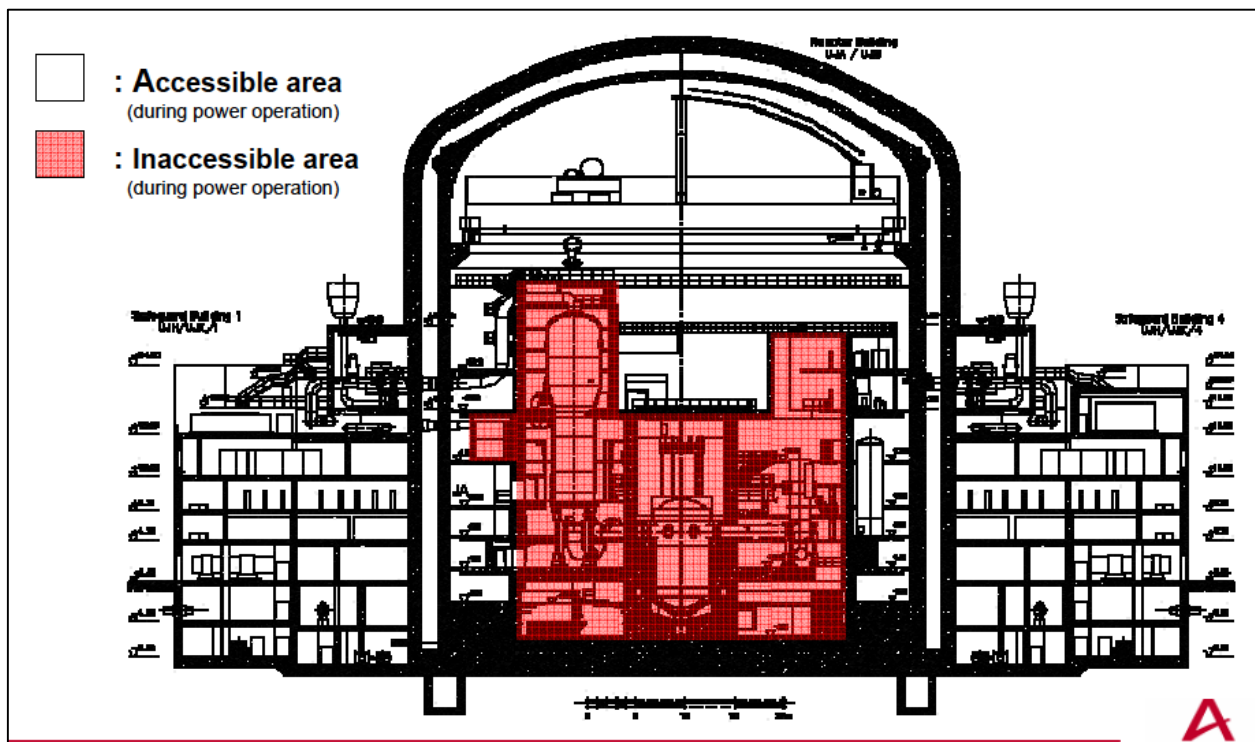
A referencia terv szerinti konténment feszítő pászmáinak anyagjellemzőit a 19. táblázatban láthatjuk.

## 11. ÉPÍTHETŐSÉG, SZERELHETŐSÉG, KISZOLGÁLHATÓSÁG

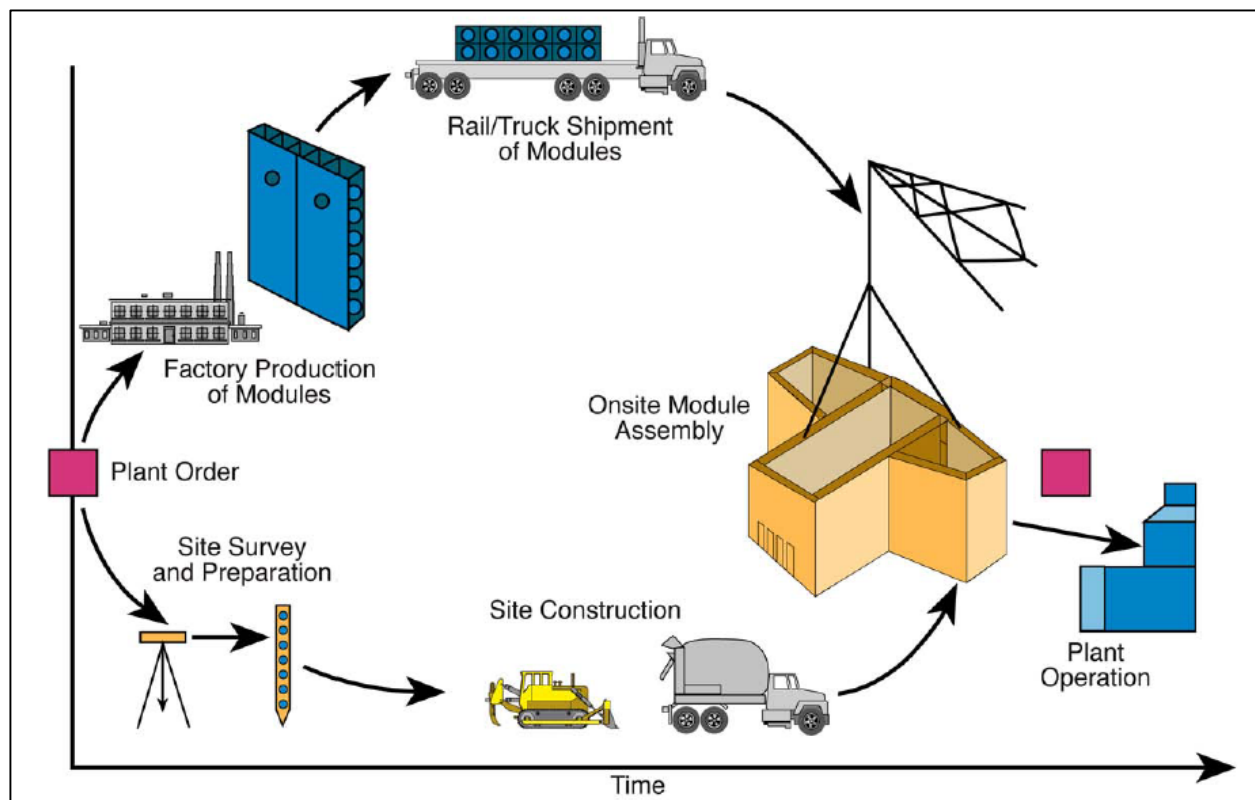
Az NBSZ 3a 3a.3.5.1100. fontos kitétele, hogy az atomerőművet úgy kell megtervezni, hogy az a diszpozíciós követelményeknek megfeleljen (lásd az erről szóló anyagot), s szükség esetén lehetőség legyen az üzemeltető személyzet bejutására a konténment egyes helyiségeibe a konténment zártságának folyamatos biztosítása mellett. Ezt illusztrálja a 0.

Az építhetőség, az építés-organizáció fontos szempontja a kiviteli tervezésnek, mivel ettől jelentős mértékben függ az építési idő. Ennek egy bevált módja az acéllás építkezés, amikor a falburkolat és a beton vasalás egy előre legyártható, helyszínen helyre daruzható, kiönthető és végleg maradó szendvics szerkezetet képez (32. ábra).

Ilyen technikát alkalmaztak már a Paksi Atomerőmű építésekor is (33. ábra).



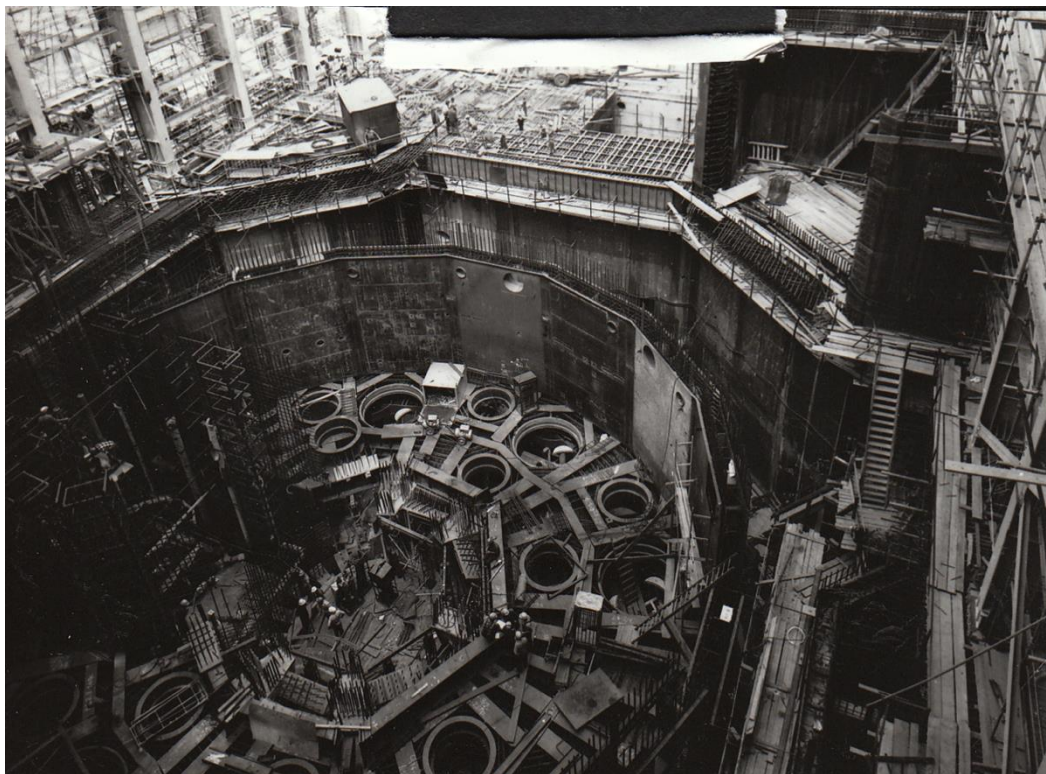
31. ábra Az EPR üzem közben kiszolgálható térrészei



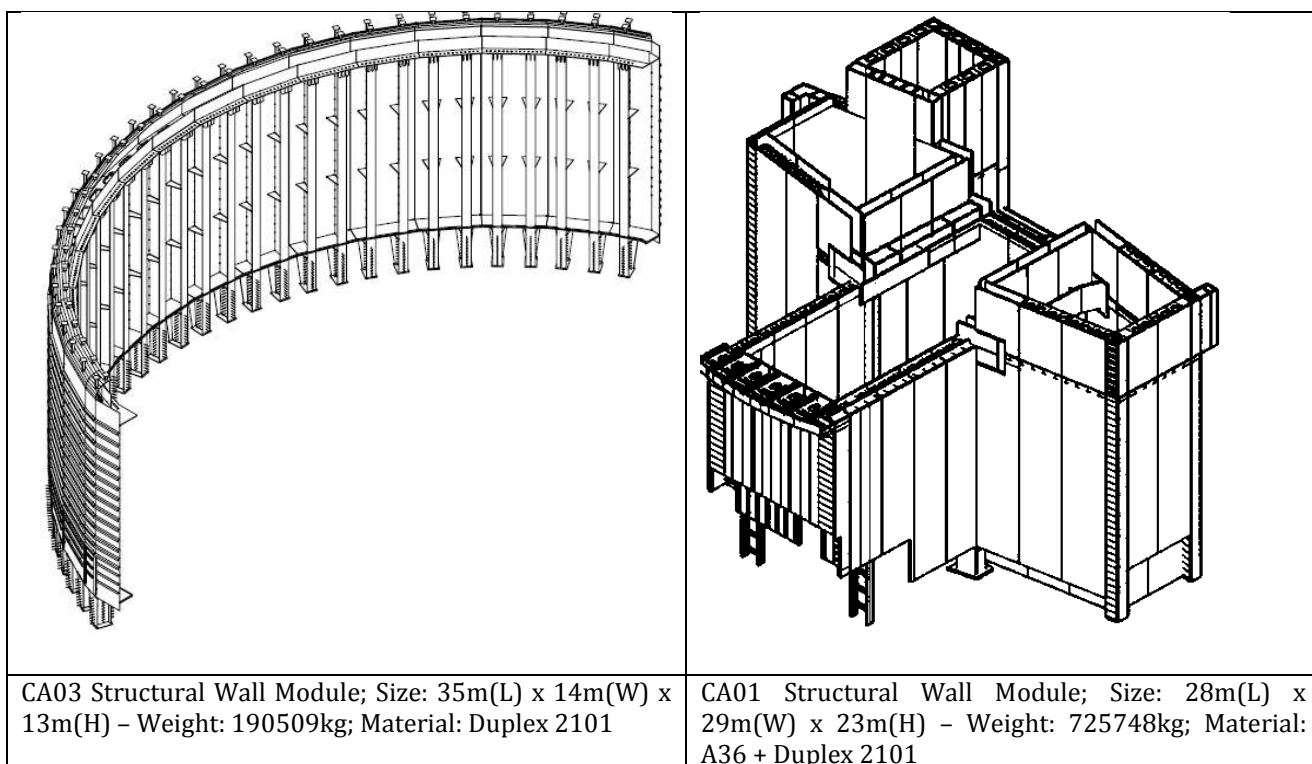
32. ábra Az acélcéls építkezés folyamata

Fontos szerepe van ennek a megoldásnak az AP1000 védőépülete esetében, ahol nem csak zsaluzatként, hanem lényegében egy, a repülőgép rázuhanással szemben ellenálló szendvics-szerkezetet képez a burkolat (34. ábra). Ilyen felfogásban kezelik az orosz tervezők a burkolatot a mostani tervekben (Balti EBJ).





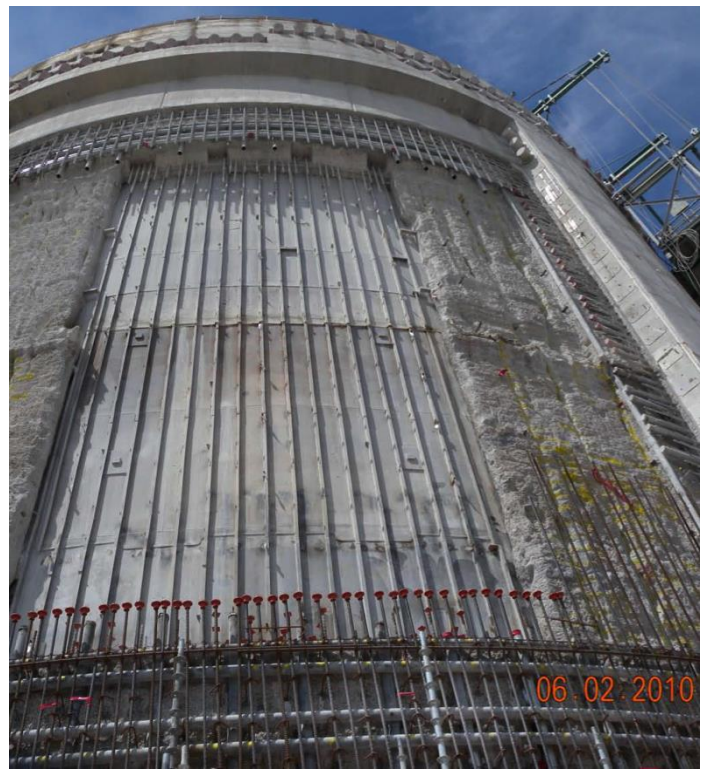
33. ábra A burkolattal kialakított acélcellák a Paksi Atomerőmű építésénél



34. ábra AP1000 acélcéls modulok

A konténmenten belüli térkialakításnak a biztonsági szempontokon túl, mint a belső térkialakítás, segítse elő a nyomáskiegyenlítődést, a lokális anyag-felhalmozódást pedig akadályozza meg, kell felelni azon követelményeknek is, hogy a konténmenten belüli szerkezetek, rendszerek vizsgálhatók és karbantarthatók legyenek. Ez érvényes a konténment zsilipjeire is, különös tekintettel a gőzfejlesztő cserékre (lásd a Crystal River 3. blokk konténmentjének sérülését, amikor gőzfejlesztő csere miatt a konténmentet megbontották (35. ábra) <https://www.duke-energy.com/news/releases/2013020501.asp> ).





35. ábra Crystal River 3. blokk konténmentjének sérülése

## 12. IRODALOM

- [1] Hessheimer, M. F., Dameron, R. A. (2006), Containment Integrity Research at Sandia National Laboratories, NUREG/CR-6906, SAND2006-2274P, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6906/>
- [2] IAEA, Safety Standards Series No. NS-G-1.10, Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, Safety Guide, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004
- [3] *FIB* State of the Art - Concrete Containments, Detailed Information on Some Typical Recent Containments, A N N E X 2, Detailed presentation of several typical recent containment, March 2001
- [4] DR. FARKAS GYÖRGY, FESZÍTETT TARTÓSZERKEZETEK, MSc ELŐADÁSOK VÁZLATA [http://www.hsz.bme.hu/hsz/oktatas/feltoltesek/BMEEOHSMC07/feszitett\\_jegyzet\\_pdf.pdf](http://www.hsz.bme.hu/hsz/oktatas/feltoltesek/BMEEOHSMC07/feszitett_jegyzet_pdf.pdf)
- [5] OPB-88/97, NP-001-97 GENERAL REGULATIONS ON ENSURING SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS (PNAE G- 01 011-97)
- [6] PiN AE 5.6, ПиН АЭ 5.6, Norms of structural design of nuclear power plants with reactors of different types, Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа, SKU: PROC101262, <http://www.russianguost.com/p-20737-pin-ae-56.aspx>
- [7] NP-031-01, НП-031-01, Design norms for antiseismic atomic power stations, Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций, SKU: PROC100890, <http://www.russianguost.com/p-20103-np-031-01.aspx>
- [8] Fire Safety of Buildings and Structures: Snip 21-01-97
- [9] НП 010-98 Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций, Москва, 1998, <http://meganorm.ru/Data2/1/4294848/4294848451.htm>
- [10] NUREG-0800, Standard Review Plan, Rev. 2 - April 1996, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, D.C. 20555;
- [11] U.S. NRC Regulatory Guide 1.136 Revision 3, Design Limits, Loading Combinations, Materials, Construction, and Testing of Concrete Containments, March 2007
- [12] UK-EPR, 2011a, The Pre-Construction Safety Report (PCSR), Public Version of UK EPR™ GDA Submission, <http://www.epr-reactor.co.uk/>
- [13] ASME BPVC Boiler & Pressure Vessel Code, Section III: Rules for Construction of Nuclear Facility Components, 2001, New York, Division 2, "Code for Concrete Reactor Vessel and Containments," Subsection CC, "Concrete Containment";
- [14] STUK, YVL B.7, Provisions for internal and external hazards at a nuclear facility, 15 November 2013
- [15] STUK, YVL A.11, Security of a nuclear facility, 15 November 2013
- [16] EUR, European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Volume 2 Chapter 1, Safety Requirements (Part 2)
- [17] Iqbal, N., Salley, M. H. (2004). NUREG-1805, Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001
- [18] Sollogoub, P. (2010) "External Human Induced Events NS-G-3.1" WORKSHOP Support for Site Evaluation According to IAEA Safety Standards and Latest International practices, 11-14 December 2010, Tehran, Iran, Lecture 12, International Seismic Safety Centre, SNI/IAEA
- [19] US NRC Regulatory Guide 1.76, Revision 1, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, March 2007
- [20] РБ-022-01, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕРЧА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Москва 2001
- [21] СНиП 2.01.07-85\*, НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ, МОСКВА, 2003
- [22] PNAE G-10-007-89, ПНАЭ Г-10-007-89, Design standards of reinforced concrete structures localizing safety systems of nuclear power plants, Нормы проектирования железобетонных сооружений локализирующих систем безопасности атомных станций, PROC101264, <http://www.russianguost.com/p-20739-pnae-g-10-007-89.aspx>
- [23] U.S. NRC Regulatory Guide 1.136, Revision 3 "Design Limits, Loading Combinations, Materials, Construction, and Testing of Concrete Containments.", March 2007
- [24] U.S. NRC Regulatory Guide 1.57, Revision 2, "Design Limits and Loading Combinations for Metal Primary Reactor Containment System Components", May 2013
- [25] NUREG/CR-6810, Overpressurization Test of 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, March 2003
- [26] NUREG/CR-6809, Posttest Analysis of the NUPEC/NRC 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model, March 2003
- [27] International Standard Problem No. 48, Containment Capacity, Synthesis Report, NEA/CSNI/R(2005)5/VOL1, 06-Sep-2005

- [28] Klamerus, E. W., Bohn, M. P., Wesley, D. A., Krishnaswamy C. N. (1996). "Containment Performance of Prototypical Reactor Containments Subjected to Severe Accident Conditions", NUREG/CR-6433, US NRC
- [29] NUREG-1150, "Severe Accident Risks: An Assessment for Five US Nuclear Power Plants", US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1990
- [30] Westinghouse, AP1000 European, Design Control Document, EPS-GW-GL-700, Revision 1, [https://www.ukap1000application.com/doc\\_pdf\\_library.aspx](https://www.ukap1000application.com/doc_pdf_library.aspx)
- [31] Paksi Atomerőmű konténment túlnyomás tanulmány, ABS Consulting, Risk Consulting Division, 2002. december, Jelentés szám: 415047-R-001
- [32] Nemzeti Jelentés a Paksi Atomerőmű Célzott Biztonsági Felülvizsgálatáról, OAH, 2011. december 29. Budapest
- [33] ASME BPVC, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," Subsection IWE, "Requirements for Class MC and Metallic Liners of Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Power Plants
- [34] ASME BPVC, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components." Subsection IWL, "Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Plants."
- [35] 10 CFR Part 50, Appendix J, "Primary Reactor Containment Leakage Testing for Water-Cooled Power Reactors"
- [36] US NRC, Degradation of Prestressing Tendon Systems in Prestressed Concrete Containment, Information Notice 99-10, Revision 1, USNRC, 1999.
- [37] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, In-service Examination and Testing Requirements for Concrete Containment Structures for CANDU Nuclear Power Plants, N287.7-08, CSA, Mississauga, Ontario, Canada, 2008.
- [38] US NRC, Regulatory Guide 1.90 Inservice Inspection of Prestressed Concrete, 2012.
- [39] US NRC, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, NUREG 1801, USNRC, 2010.
- [40] D. J. Naus, Concrete Component Aging and its Significance to Life Extension of Nuclear Power Plants, NUREG/CR-4652, Oak Ridge National Laboratory, 1986.
- [41] US NRC, A Summary of Aging Effects and Their Management in Reactor Spent Fuel Pools, Refueling Cavities, Tori, and Safety-Related Concrete Structure, NUREG/CR-7111, USNRC, 2012.
- [42] IAEA IGALL (2015), International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL) for Nuclear Power Plants. Supplement to IAEA Safety Reports Series No. 82, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL), IAEA, Vienna (2015), <http://gnssn.iaea.org/NSNI/PoS/IGALL/SitePages/Home.aspx?RootFolder=%2FNSNI%2FPoS%2FIGALL%2FShared%20Documents%2FIGALL%20folder&FolderCTID=0x012000BAE2AD2BC1B0FE4CAE10CF0A113FB57F&View={6478452E-E17F-4DE9-B095-3182CFB5BC2B}>
- [43] US NRC, Regulatory Guide 1.35.1, Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments, NRC, USNRC, 1990.