
SPECIÁLIS TERVEZÉSI KÖVETELMÉNYEK

(~~Specifikus veszélyeztető tényezők~~)

Külső és belső veszélyek

Katona Tamás János

2015.

Tartalom

I. rész	A veszélyekről általában.....	7
1.	Veszélyek.....	7
2.	A telephely alkalmasságát kizáró külső veszélyek	7
3.	Környezeti körülmények.....	10
4.	A veszély jellemzése determinisztikus módszerrel.....	10
5.	A tervezési alap meghatározása valószínűségi módszerrel.....	11
6.	A külső veszélyek figyelembe vétele a tervezési alapon.....	11
6.1.	A tervezési alapba tartozó külső veszélyek.....	11
6.2.	A tervezési alapba tartozás kérdésének eldöntése	12
6.3.	Mérlegelés gyakoriság alapján	13
6.4.	A külső veszély jellegének mérlegelése	14
6.5.	Kiküszöbölhető külső veszélyek.....	15
6.6.	Másodlagos veszélyek.....	15
7.	A tervezési alapba tartozó belső veszélyek.....	16
7.1.	A veszélyek és a kezdeti események viszonya	17
7.2.	A veszélyek és a konstrukció viszonya.....	17
8.	Az események/körülmények/terhek kombinációja	18
8.1.	Függő és független események	18
8.2.	A burkoló elv	21
9.	A tervezési alap kiterjesztése	23
10.	Tervezés veszélyekre és az osztályba sorolás	24
11.	A bizonytalanságok kezelése	26
12.	A veszélyek kezelése a több-blokkos telephelyek esetén	28
13.	Több létesítménynek helyet adó telephely	30
14.	A baleset-kezelés eszközeinek tervezési alapja	31
15.	A kockázat szerinti szerinti differenciálás.....	31
II. rész	A természeti veszélyek.....	32
16.	Földrengés-veszély	32
16.1.	A földrengés-veszély jellemzői az alapközetben.....	33

16.2.	A szabadfelszíni megrázottság meghatározása	42
16.3.	A gyakorlati tervezés földrengés-inputja	45
17.	A hidrogeológiai, geotechnikai körülmények, veszélyek	48
17.1.	A lejtő instabilitás, erózió-, csuszamlás- és kúszásveszély	51
17.2.	A felszín beomlása, roskadása	51
17.3.	Talajfolyósodás.....	51
17.4.	A talaj roskadása.....	57
18.	Meteorológiai körülmények és veszélyek.....	57
18.1.	A használati feltételek meghatározása	58
18.2.	Meteorológiai szélsőségek	59
18.3.	Tornádó	61
18.4.	A referencia és a paksi tornádó veszély összehasonlítása	65
19.	Árvizek, hidrológiai veszélyek	65
20.	Villámlás	67
21.	Biológiai veszélyek.....	67
II. rész	Antropogén, technogén külső veszélyek	68
22.	Az antropogén, technogén veszélyek sajátosságai	68
23.	Az antropogén veszélyek a paksi és a referencia telephelyen	69
24.	Robbanások.....	71
25.	Repülő tárgy	73
26.	Veszélyes anyag kiszabadulása	74
27.	Repülőgép rázuhanás.....	74
27.1.	A tervezési alapba, illetve kiterjesztésébe tartozás attribútumai	74
27.2.	Effektív célfelület.....	75
27.3.	Repülőtér, gyakorlótér	75
27.4.	Légifolyosó	76
27.5.	Általános forgalom.....	76
27.6.	Terhelési görbék.....	77
28.	Tűzveszély	82
29.	A villamos hálózat elvesztése	82

30. Egyéb külső veszélyek	83
30.1. Elektromágneses hatások.....	83
30.2. Cyber-attack	83
III. rész Belső veszélyek.....	84
31. Belső veszélyek.....	84
31.1. A technológia meghibásodásából eredő veszélyek	84
32. Irodalom	86

Ábrák:

1. ábra Veszélyeztetettségi görbe (DoE Standard 1020 [6])	14
2. ábra Az EPR biztonsági rendszereinek és dízeleinek térbeli szeparációja	17
3. ábra A szél és a földrengés hatásának összehasonlítása	22
4. ábra A földrengés és a különböző repülőgépek rázuhanása által keltett válaszspektrumok.....	23
5. ábra A normáeloszlás jellemzői.....	27
6. ábra Az eloszlások típusai és a paraméterek egymáshoz való viszonya	27
7. ábra Az átlag, medián és a 84% percentilis viszonya különböző eloszlásoknál.....	27
8. ábra Kétblokkos atomerőmű esetén a külső és belső eseményeinek logikai kapcsolatai	28
9. ábra Kétblokkos atomerőmű blokk-szintű eseményfája LOCA-t feltételezve	29
10. ábra Egy külső hatás eseményfája két blokkos telephelyen [15]	30
11. ábra A valószínűségi földrengés-veszély elemzés lépései.....	33
12. ábra Az észlelt földrengések mérete és gyakorisága	34
13. ábra Forrásterület modellek a Pannon medencére	35
14. ábra A SHARE zóna és vető modellje.....	36
15. ábra Logikai fa a földrengés-veszély valószínűségi elemzéséhez	37
16. ábra A logikai fa egyes ágain kapott veszélyeztetettségi görbék	38
17. ábra Előzetes földrengés veszélyeztetettségi görbe a paksi telephelyre.....	39
18. ábra Az 1995-ben meghatározott alapkőzeti vízszintes és függőleges UHRS.....	39
19. ábra Alapkőzeti válaszspektrumok a 10 ⁻⁵ /év meghaladási gyakoriságnál	40
20. ábra A 10 ⁻⁵ /év maximális vízszintes gyorsulás magnitúdó-távolság deagregációja.....	41
21. ábra Az alapkőzetet fedő talajrétegek módosító hatásának számítása	42
22. ábra A fedőrétegek tulajdonságai	43
23. ábra Az alakváltozás-függő nyirási rugalmassági modulusz és a csillapítás	43
24. ábra A talajrétegek nemlineáris viselkedésének hatása	44
25. ábra A talaj nemlineáris erősítése (a) és hatása a válaszspektrumokra (b).....	44
26. ábra Szabványos válaszspektrumok (laza talaj).....	45
27. ábra EUR szabványos spektrum.....	45

28. ábra	A balti és a Paksi Atomerőmű atomerőmű földrengés tervezési alapja	46
29. ábra	A paksi és egy orosz referencia tervezési alapjába tartozó válaszspektrum.....	47
30. ábra	A balti és a paksi telephely talajmechanikai jellemzői.....	49
31. ábra	A holocén (a) és a pannon (b) felszín felszín	50
32. ábra	A szemcsés vízzel telített talaj viselkedése földrengés esetén.....	52
33. ábra	A ciklikus feszültség arány értelmezése	52
34. ábra	A pórusnyomás alakulása a mélység és a megrázottság függvényében	53
35. ábra	A talajfolyósodás elemzésére kidolgozott logikai fa [55].....	54
36. ábra	A talajfolyósodással szembeni biztonsági tényező éves maghaladási gyakorisága	54
37. ábra	Példa az épületek alatti inhomogenitásokra.....	55
38. ábra	Mértékadó süllyedés-térkép	56
39. ábra	Széllökés veszélyeztetettségi görbék a paksi telephelyre	60
40. ábra	A széllökések és a tornádók gyakorisága az USA nem tornádó-veszélyes területeire	63
41. ábra	Jégmentes nagyvízszintek (NV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm	66
42. ábra	Felhő-felhő és felhő-föld villámok száma 2008-2012 között Paks 10×10 km-es körzetében.....	67
43. ábra	A robbanás terhelési görbéje	72
44. ábra	Az effektív célfelület meghatározása.....	75
45. ábra	Repülőgép rázuhanás terhelési görbe (dimenziók erő-MN versus idő-milisec)	77
46. ábra	Az EPR tervezésénél alkalmazott terhelés diagrammok	78
47. ábra	A balti atomerőmű tervezésénél alkalmazott terhelési diagram.....	78
48. ábra	Repülőgép rázuhanási jellemzők a PiN AE-5.6 szerint.....	79
49. ábra	Egy 7 tonnás vadászgép terhelési görbéje 200 m/s sebesség esetén	79
50. ábra	A hard missile hatás-típusai.....	81
51. ábra	Jellemző geometriai méretek nagy polgári repülőgép rázuhanásánál (EPR)	81

Táblázatok:

1. táblázat	A felszínen permanens elmozdulást okozni képes vető kritériumai.....	9
2. táblázat	Elsődleges és másodlagos veszélyek és hatásaik.....	16
3. táblázat	A terhek a vasbeton konténment tervezésénél (ASME Section III, Table CC-3230-1)	18
4. táblázat	A konténment teherkombinációi (ASME Section III Table CC-3230-1).....	19
5. táblázat	Teherkombinációk az EUR szerint.....	20
6. táblázat	Külső veszélyek potenciális forrásai és hatásai	21
7. táblázat	Külső veszélyek hatásának jellemzői és következményei	22
8. táblázat	A követelmények differenciálása gépészeti rendszerelemek földrengésre való tervezésnél	25
9. táblázat	A tervezési alapba tartozó veszélyek a létesítmény potenciális kockázata szerint	31
10. táblázat	A talajfolyósodás-veszély vizsgálatokban alkalmazott empirikus módszerek.....	53
11. táblázat	A talajfolyósodás hatásai.....	55
12. táblázat	A talajsüllyedés számítás módszerei	56
13. táblázat	A tervezési alapba tartozó meteorológiai körülmények	58
14. táblázat	Példa a tervezésnél figyelembe veendő meteorológiai körülményekre.....	59
15. táblázat	A paksi telephely és a referenciák meteorológiai szélsőségeinek jellemzői.....	59
16. táblázat	Példa: Tíz év alatt regisztrált szélleőkés maximális sebességek.....	60
17. táblázat	A Fujita-skála szerinti maximális sebességek.....	61
18. táblázat	A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzői az USA-ban.....	62
19. táblázat	A tornádó keltette repülő tárgyak jellemzői	64
20. táblázat	Tervezési alap és terhek szél és tornádó esetén a DoE-1020 szabvány alapján	64
21. táblázat	A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzői (Paks2, Balti EBJ, US NRC)	65
22. táblázat	Az ember okozta események és hatások lehetséges összefüggése	68
23. táblázat	A vizsgált ipari és katona tevékenységek és következményeik.....	70
24. táblázat	A közlekedés, szállítás eseményei és következményeik	70
25. táblázat	A robbanások hatás-mechanizmusai.....	71
26. táblázat	A robbanás várható következménye a túlnyomás függvényében	71
27. táblázat	A repülőgép rázuhanás szűrési kritériuma a távolság függvényében	76
28. táblázat	Mértékadó adatok egy orosz dokumentum és az aktuális ismereteink szerint.....	80
29. táblázat	A 3. kategóriába tartozó repülőgépek adatai.....	80
30. táblázat	Paks2 esetében TAK-ként kezelt repülőgép rázuhanás – gépadatok.....	80
31. táblázat	A belső veszélyek, okaik és a kezelési módjuk.....	85

I. rész A veszélyekről általában

1. VESZÉLYEK

A *veszély* egy adott területen, adott időtartamon belül, meghatározott körülmények között bekövetkező, a biztonság ellen ható, kedvezőtlen, nem kívánatos, esetenként pusztító, romboló hatású esemény bekövetkezésének lehetősége. A veszély a természetben, a technológiai folyamatokban is állandóan jelenlévő lehetőség. A veszély a kár kialakulásának lehetősége valamilyen okkal, mint földrengés veszély, árvíz-veszély, tornádó veszély. Amikor a veszéllyel már nem lehetőségként, hanem annak megvalósulásával szembesülünk, akkor már eseményként, természeti jelenségként nevezzük meg, mint földrengés, árvíz. A veszélyt előidéző okokat veszélyforrásnak is nevezik.

A veszélyek önmagukban nem kezdeti események, hanem kezdeti eseményeket, esetleg egyidejűleg több kezdeti esemény létrejöttét eredményező lehetőségek. A veszélyek lényegében terheket és körülményeket jelentenek a tervezés szempontjából, amelyek egy vagy többszörös meghibásodásokat okozhatnak, s így kezdeti eseményeket válthatnak ki. A veszélyek által kiváltott kezdeti események valószínűsége származtatott mennyiség, azt a külső esemény bekövetkezésének valószínűségéből, és a technológiai rendszerelemek sérülékenységeiből lehet levezetni, azok hibái és az egyes meghibásodási módokat leíró sérülési feltételes valószínűségekkal lehet meghatározni.

A veszélyek kezelése nem csak tervezési, hanem telepítési kérdés is. Megfelelő telephelyet kiválasztva elkerülhetjük a lehetséges természeti és emberi tevékenységből eredő veszélyek legtöbbjét. Vannak olyan veszélyek, amelyek kategorikusan kizárják a telephely alkalmasságát (felszínre kifutó permanens elmozdulást okozó szerkezet).

Az el nem kerülhető veszélyekkel szemben kell tervezési megoldásokkal megvédeni a létesítményt és felkészülni az esemény bekövetkezésének következményeire. Ezen veszélyek meghatározása és jellemzése a telephely vizsgálat és értékelés célja.

Vannak olyan veszélyek, amelyekkel szemben magát a telephelyet célszerű megvédeni műszaki megoldásokkal, mint például az árvizekkel szembeni védelem felöltéssel, gátakkal. Műszaki megoldásokkal a telephely jellemzői is befolyásolhatók, megváltoztathatók a veszély csökkentése vagy kiküszöbölése érdekében, például a talajfolyósodás veszélye kizárható talajstabilizációval. Ilyen esetekben e módosított körülményeket kell figyelembe venni a létesítmény tervezési alapjának meghatározása során. Az ilyen módosító intézkedések után a veszély kizárására olyan kritériumokat kell megfogalmazni, ami determinisztikus vagy valószínűségi felfogásban a veszély kizárásának elégséges feltételét megadja (NBSZ 3a.3.4.1100.).

Különleges elbírálást igényel az atomerőmű/létesítmény háborús vagy terrorista veszélyeztetettsége, illetve az ilyen veszélyekkel szembeni védelem megtervezése. A támadás által kiváltott hatások, illetve kezdeti események átfednek a tervezési alapba tartozó külső és belső veszélyek hatásaival és az általuk okozott kezdeti eseményekkel (robbanás, ütközés, stb.), de lehet olyan támadás, amelynek hatásmechanizmusa különleges és az ellene való védelem úgyszintén különleges eszközöket igényel. .

2. A TELEPHELY ALKALMASSÁGÁT KIZÁRÓ KÜLSŐ VESZÉLYEK

A telephely akkor tekinthető alkalmasnak, ha léteznek kipróbált műszaki megoldások arra, hogy a nukleáris létesítmény védett legyen a telephelyre jellemző, a tervezés során figyelembe veendő veszélyek hatásától. A létesítési engedélyezési eljárásban pedig igazolható, hogy a nukleáris létesítmény lehetséges radioaktív kibocsátásainak hatásai a jogszabályokban előírt korlátok alatt maradnak, valamint a

nukleárisbaleset-elhárítási intézkedések megvalósítását kizáró telephelyi körülmények nincsenek (NBSZ 7. kötet 7.3.7.0100. és 7.2.1.1400. bekezdés).

Kizáró körülménynek, veszélynek tekintendő az olyan aktív szerkezet a telephely közvetlen környezetében, amelyen kipattanhat olyan méretű földrengés, amely a felszínen permanens elmozdulást hoz létre. Az ilyen vető megnevezése a NAÜ SSG-9 [1] és az NRC terminológia szerint „capable fault”, ami nem azonos az aktív vető fogalmával, hanem annak egy osztályát képviseli. A meghatározás alapvető kritériuma, hogy a földtörténeti negyedidőszakban voltak-e ilyen földmozgások. Ezen belül a vizsgált időintervallum függ attól is, hogy milyen aktivitású területen van a telephely. A korábbi magyar szabályozásban (62/1997. (XI. 26.) IKIM rendelet, amelyet az NBSZ 7. kötet váltott ki) úgy rendelkezett, hogy „Telephely nem jelölhető ki olyan törésszakaszon, ahol az utolsó százezer évben felszíni elmozdulás volt.” 11. § (2). Az NBSZ 7. kötet a vizsgált időszakot mérlegelés tárgyává teszi. A 10 CFR PART 100—REACTOR SITE CRITERIA [2], Appendix A „Seismic and Geologic Siting Criteria for Nuclear Power Plants” úgy tekinti, hogy kapabilis az a vető, amelyen az elmúlt 35000 (újabbán 50000) év alatt legalább egyszer, vagy az elmúlt 500000 év alatt ismétlődően előfordult olyan rengés, amely a felszínen permanens elmozdulást hozott létre. Az NRC 10 CFR 100 Appendix A azt a megállapítást teszi, ha a telephelyen azonosított vető szerkezeti kapcsolatban van Negyedidőszak előtti, azaz öreg szerkezetekkel, s ha más evidencia nincs, a vetőt nem kell kapabilisnak tekinteni. Az orosz NP-032-01 [3] szabályozás nem ismeri a capable-fault fogalmát, hanem az elmúlt 1 millió évben 0,5 m elmozdulást produkáló vetőt aktívnek minősíti, s ebben az esetben, illetve, ha a telephelyen a maximális hihető rengés intenzitása kilences fokozatú az MSK-64 skála szerint. A kritériumok összehasonlítására lásd az 1. táblázatot. A táblázatban az NBSZ 7. kötet megfogalmazásainak stílusát javítottuk. *Megállapítható, hogy az NBSZ 3a 7.5.2.0700. bekezdése¹ konkretizálja, meglehetősen eltérve például az NRC felfogásától a mértékadó időszakot, s átméntve az 62/1997. (XI. 26.) IKIM rendelet meghaladott követelményét.* Az NRC, a NAÜ és az orosz norma szövegét eredetiben idézzük.

Tekintettel arra, hogy a telephelyek alatt és környezetében a vetők jelenkori aktivitására utaló jelek takartak lehetnek vagy eltűnhetnek az erózió következtében, az NRC 1. táblázatban hivatkozott előírása megengedi, hogy a vető mentén, a telephelytől távolabbi területeken lehet a kutatást folytatni. Így rendelkezik az NBSZ 7. kötet is. Lényegében ez, illetve a földrengés-adatbázis minél hosszabb időszakra való kiterjesztése adja a fontosságát a paleoszeizmikus vizsgálatoknak, a szeizmitik kutatásának.

A felfogás a felszíni elmozdulások kizáró jellegét illetően változik, hiszen ha a legnagyobb polgári légi jármű rázuhanására tervezünk egy atomerőművet, akkor az az atomerőmű biztonságos marad a néhány centiméter felszíni elmozdulás esetén is, de különösen az 1 millió év alatt akkumulálódó fél méteres elmozdulás esetén (lásd az orosz kritériumot).

Az NBSZ 7. kötet szerint nem jelölhető ki telephely karszton vagy felhagyott, beomlás-veszélyes bányaterületen, lásd az NBSZ 7. kötet „7.3.2. Geotechnikai veszélyeztető tényezők” című fejezetét.

Az orosz szabályozás a kizáró körülmények mellett kedvezőtlen, de a tervezésnél kezelhető veszélyeket, körülményeket is definiál a telephely értékelésénél. Ilyenek például²:

- az MSK-64 szerint 7 foknál nagyobb földrengés intenzitás,
- aktív vulkán közelsége,
- szökőár és katasztrofális árvízveszély,
- hidrotechnikai létesítmények sérülése következtében elárasztás-veszélyes területek,
- olyan területek, ahol a függőleges, illetve vízszintes elmozdulás sebessége 10, illetve 50 mm/év,
- karszt területek, instabil lejtők, csúszásveszélyes területek,
- talajvizes területek (3 m mélyen legalább 10 m vastagságú réteg 10m/24 óra filtrációs tényezővel),
- 20 MPa-nál kisebb rugalmassági moduluszú talajok.

¹ Megállapította: 357/2014. (XII. 29.) Korm. rendelet 1. § (18), 8. melléklet 19. Hatályos: 2015. I. 1-től.

² A földrengés-veszélyt és a talaj minőségét tekintve, az orosz szabályozás szerint, a paksi egy elég rossz telephely.

1. táblázat A felszínen permanens elmozdulást okozni képes vető kritériumai

NBSZ 7. kötet, 7.3.1.0900.679	NAÜ SSG-9 [1], 8.4 bekezdés	NRC 10 CFR 100 [2] Appendix A	NP-032-01 orosz norma [3]
a) az adatok ismétlődő jelleggel mozgásra, szignifikáns deformációkra vagy diszlokációkra, vagy mindháromra utalnak olyan időintervallumban, amely alapján nem kizárható, hogy a következő mozgás a felszínre vagy a felszín közelébe kifut; b) szerkezeti kapcsolat létezik egy ismert, felszínre kifutó vető által okozott elmozdulás vetődés szempontjából a veszélyes törésvonallal, amelynek mozgása kiválthatja a telephely környezetében lévő törésvonal mozgását; c) a szeizmogén szerkezetről feltehető, hogy a maximális lehetséges földrengés elegendően nagy és olyan félszekmélységű, hogy feltételezhető - a telephely geodinamikai sajátosságai alapján - a felszínre kifutó vető által okozott elvetődés. 7.3.1.1000.680 A 7.3.1.0900. pont a) alpontjában meghatározottakat - a rövid ismétlődési időkre utaló geológiai és földrengés adatokkal jellemzett - nagyon aktív régiókban rövidebb, a kevésbé aktív területeken számottevően hosszabb időszakot kell vizsgálni.	(a) If it shows evidence of past movement or movements (such as significant deformations and/or dislocations) of a recurring nature within such a period that it is reasonable to conclude that further movements at or near the surface may occur. In highly active areas, where both earthquake data and geological data consistently reveal short earthquake recurrence intervals, periods of the order of tens of thousands of years (e.g. Upper Pleistocene-Holocene, i.e. the present) may be appropriate for the assessment of capable faults. In less active areas, it is likely that much longer periods (e.g. Pliocene-Quaternary, i.e. the present) are appropriate. (b) If a structural relationship with a known capable fault has been demonstrated such that movement of the one fault may cause movement of the other at or near the surface. (c) If the maximum potential magnitude associated with a seismogenic structure, as determined in Section 4, is sufficiently large and at such a depth that it is reasonable to conclude that, in the current tectonic setting of the plant, movement at or near the surface may occur."	(1) Movement at or near the ground surface at least once within the past 35,000 years or movement of a recurring nature within the past 500,000 years. (2) Macro-seismicity instrumentally determined with records of sufficient precision to demonstrate a direct relationship with the fault. (3) A structural relationship to a capable fault according to characteristics (1) or (2) of this paragraph such that movement on one could be reasonably expected to be accompanied by movement on the other. A Regulatory Guide 1.165 és 1.208 50000 évet és 500000 évet ír elő. Mind a három dokumentum azt tanácsolja, hogy „Notwithstanding the foregoing paragraphs, the association of a structure with geological structures that are at least pre-Quaternary, such as many of those found in the Central and eastern regions of the United States, in the absence of conflicting evidence will demonstrate that the structure is not a capable tectonic source within this definition.”	3.1. Не допускается размещать АС: – на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах; – на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимальных расчетных землетрясений (далее - МРЗ) более 9 баллов по шкале сейсмической активности Медведева-Шпонхойера-Карника (далее - MSK-64); Активный разлом - тектонический разлом, по которому за последние 1 млн. лет (четвертичный период) произошло относительное перемещение примыкающих блоков земной коры на 0,5 м и более. 3.1. It is not allowed to locate nuclear power plants: – on the sites directly situated on active faults; – on the sites whose seismicity is characterized by the maximum credible earthquake (MCE) intensity of more than 9 on Medvedev-Shponhoyer-Karnika seismic intensity scale (MSK-64); Active fault – tectonic fault along which relative displacement of the earth crust's adjacent blocks by 0,5 m and more took place during the last 1 bln. years (quaternary period).

3. KÖRNYEZETI KÖRÜLMÉNYEK

Külön kategóriát képeznek azok a külső és létesítményen belüli környezeti jellemzők, amelyek a tervezési alap részét képezik, de mint a tartós üzem körülményeit meghatározó paraméterek. Ilyenek a szezonális vagy tartós környezeti hőmérsékletek, átlagos szélsőségek, frissvízhűtésnél az átlagos és tartós, illetve szezonális vízhozamok, szintek és hőmérsékletek, létesítményen belüli körülmények (hőmérséklet, páratartalom, sugárzási szint). Ezeknek a paramétereknek nincs kötelezően közvetlen biztonsági relevanciájuk, ám meghatározzák mindazon rendszerek, rendszerelemek tervezését, minősítését és működését, amelyek a normálüzem fenntartásához, illetve a normál üzemállapotoktól való eltérések megakadályozásához szükségesek. Erről a tervezéshez feltétlenül szükséges adathalmazról, lévén, hogy biztonsági szempontból explicité nem relevánsak sem az NBSZ 3a, sem pedig az NBSZ 7. kötete nem szól³, jóllehet a mélységi védelem elve alapján mégis annak kell tekintenünk.

4. A VESZÉLY JELLEMZÉSE DETERMINISZTIKUS MÓDSZERREL

Determinisztikus módszernek tekinthető, ha valamilyen megfontolás alapján valamely eseményt vagy veszélyt a tervezési alap részének nyilvánítunk. Erre a legjobb példa a primerkörü csővezeték teljes keresztmetszetben történő prompt törése, s a hűtőközeg kétoldalú szabad kiáramlása, amelyet ab'ovo a tervezési alap részének tekintünk, függetlenül a törés kis valószínűségétől, s a feltételezett törési mód hipotetikus voltától⁴. Különleges eset a reaktor-tartály törése. Ezt, mint kezdeti eseményt megfelelő méretezéssel, különleges gyártási követelményekkel, illetve üzemidő alatti szigorú felügyelettel a tervezési alaphoz kizárják, s így az a súlyos baleset kategóriába tartozik. Mégis, a tartály-törés lehetőségének implicit figyelembe vételét jelenti az, hogy már a terv szintjén intézkedések történnek a tartály védelmében (például a hideg állapotban történő túlnyomás elkerülésére szolgáló tervezési megoldások).

A legnagyobb polgári légi jármű erőműre való rázuhanását egyre több országban, így hazánkban is a tervezési alap kiterjesztéseként kezelik, függetlenül a véletlen rázuhanás kis – az általánosan alkalmazott 10^{-7} /év szűrési szint alatti – valószínűségére. A szűrési szintnél nagyobb gyakoriságú rázuhanás hatásait pedig a tervezési alap részeként kezelik.

A veszélyek tervezési alapba tartozásának determinisztikus elemzés alapján történő mérlegelése az alábbi lépésekben történik:

1. Minden hatás-, vagy eseménytípusra, úgymint robbanás, tűz, toxikus gázfelhő kibocsátás, nagy energiájú repülő tárgy, kiválasztjuk a telephelyhez legközelebb és legnagyobb potenciállal rendelkező lehetséges forrást.
2. Meghatározzuk a várható hatást és annak terjedését, csillapodását a távolsággal, illetve a hatás jellemzőit (nyomáshullám nagysága, robbanás-szél, koncentrációk, a repülő tárgy mozgási energiája, stb.) a telephelyen. Megállapítjuk, hogy a hatás a telephelyen a biztonsági funkciók és a kezelők szempontjából semleges vagy tűrhető. Ennek módja a szűrés, amely történhet
 - i) távolsági elven, vizsgálva, hogy a telephelyen az adott mértékkel jellemezhető hatás (például a toxikus anyag koncentrációja) befolyásolhatja-e a biztonságot,
 - ii) a hatás jellege, kifejlődése, időbeli lefutása szerint, milyen a jelenség időbeli kialakulása, mód van-e az előrejelzésre, felkészülésre, a biztonságra gyakorolt hatások megelőzését, kivédését szolgáló védelmi intézkedésekre.

³ Kivétel az üzemi földrendezés, de az is azért, mert „hagyománya” van.

⁴ Az ausztenites primerkörü csővezetékek a belső nyomás hatására ridegen, azonnal teljes keresztmetszetben, s előzetes szivárgás nélkül aligha tudnak eltörni. Ez adja az úgynevezett leak-before-break elemzések alapját.

3. A biztonság szempontjából relevánsnak bizonyuló a veszély hatását jellemezzük (például a rázuhanó repülőgép sebessége, tömege, tömeg- és merevség-eloszlása, a szállított üzemanyag mennyisége, milyensége, a rázuhanás szöge).

Fentiek alapján, immár a tervezés előkészítéseként megállapítjuk, hogy az adott forrásból származó hatást, más forrásból származó nagyobb hatás burkolja-e.

Az is mérlegelés tárgyát képezi, hogy egy adott veszély kiküszöbölésére vannak-e megfelelő, kipróbált műszaki megoldások, mint például a talajfolyósodás-veszély esetén a talajstabilizáció, vagy védművekkel módosíthatók-e a telephelyi körülmények, mint például a telephely gáttal történő védelme. A létesítmény tervezési alapja tartalmazza a veszély jellemzését, illetve a védművek vagy intézkedések tervezéséhez szükséges adatokat, követelményeket is, illetve a módosított telephelyi viszonyokat.

Determinisztikus módszerrel vizsgálható és értékelhető több, a telephely megfelelőségét kategorikusan kizáró veszély is, mint például a telephely közeli bányák, vagy a felszínre kifutó elvetődést okozó törésvonalak veszélye, amelyek esetében a biztonsági szabályozások minimális távolságokat írnak elő, s ennek teljesülése determinisztikus módon ellenőrizhető.

5. A TERVEZÉSI ALAP MEGHATÁROZÁSA VALÓSZÍNŰSÉGI MÓDSZERREL

A tervezési alap meghatározása valószínűségi módszerrel lényegében a determinisztikus módszernél felsorolt lépésekből áll, azaz

- a veszély forrásainak azonosítása,
- a hatás terjedésének meghatározása a forrástól a telephelyig,
- a telephelyi hatás jellemzése.

A lényeges különbség abban rejlik, hogy míg a determinisztikus elemzéseknél az előfordulási statisztikák alapján, mint a repülőgép lezuhanás gyakorisága, a veszély meghatározásának aleatorikus bizonytalanságát kezeljük, de nem kezeljük a források azonosításánál, a hatás terjedésnek leírásában, s a telephelyi hatás értékelésében meglévő, a tudásunk hiányosságaiból, a modelljeink esetlegességéből eredő episztemikus bizonytalanságokat. Ezt majd a földrengés-veszély elemzésének demonstráljuk.

6. A KÜLSŐ VESZÉLYEK FIGYELEMBE VÉTELE A TERVEZÉSI ALAPBAN

6.1. A TERVEZÉSI ALAPBA TARTOZÓ KÜLSŐ VESZÉLYEK

A külső veszélyek lehetnek

- természeti eredetű veszélyek, mint az áradások, a földrengés és kapcsolódó jelenségek, a geotechnikai veszélyek, extrém meteorológiai körülmények, jelenségek, biológiai veszélyek, villámlás;
- és emberi tevékenységből eredő veszélyek, mint a közlekedés, szállítás vagy ipari tevékenységből (telephelyen kívüli vagy telephelyi, de a létesítményen kívüli) eredő repülő tárgy ütközése, robbanás, tűz, toxikus gázfelhő, elektromágneses interferencia, hálózat elvesztése, stb.

Különleges helyzet alakul ki, ha a fizikai értelemben vett telephelyen más nukleáris létesítmény is található. A szomszédos létesítmény üzeméből eredő technogén veszélyeket ugyan úgy kell kezelni, mintha az adott létesítmény szokványos lenne. A külső veszélyek sajátos esete, amikor a szomszédos létesítmény nukleáris balesete veszélyezteti a tárgyi létesítményt. Ezt elvben kiszűrhetjük, ha érvényes rá a technogén veszélyek szűrési kritériuma (10^{-7} /év).

Bár az NBSZ 3a kötete (3a.2.2.4200., 3a.2.2.4300.), s az NBSZ 7. kötete is felsorolja a leglényegesebb külső veszélyeket, amelyeket vizsgálni és értékelni kell, majd a tervezésnél figyelembe kell venni, úgymint:

- a) szélsőséges szélterhelés,
- b) szélsőséges külső hőmérsékletek,
- c) szélsőséges csapadékviszonyok,
- d) villámcsapás,
- e) jeges és jégmentes árvíz valamint alacsony vízszint,
- f) fel- és alvízi létesítmények sérülésének veszélye,
- g) szél által mozgatott repülő tárgyak,
- h) szélsőséges hűtővíz-hőmérsékletek és jegesedés,
- i) ~~a telephely földtani alkalmasságának igazolásánál figyelembe vett földtani adottságok (különösen a~~⁵ ~~földrengés és földrengés által kiváltott másodlagos jelenségek (például a talajfolyósodás) veszélye,~~
- j) katonai és polgári repülőgép becsapódása,
- k) telephelyhez közeli szállítási, ipari és bányászati tevékenységek,
- l) a kapcsolódó külső távvezeték-hálózat zavarai, beleértve annak tartós és teljes üzemképtelenségét,
- m) olyan, a telephelyen vagy annak szomszédságában lévő létesítmények, amelyek tüzet, robbanást vagy egyéb veszélyt jelenthetnek az atomerőműre,⁶
- n) külső tűzhatás,
- o) elektromágneses interferencia, valamint
- p) biológiai eredetű veszélyek.

Minden ilyen felsorolást példaként kell kezelni, mert minden telephely egyedi, s a követelmény pedig az, hogy minden, akár arra az egyetlen telephelyre jellemző veszélyt is számításba kell venni, ha annak hatása lehet a nukleáris biztonságra. Csiszolásra szorulnak például az NBSZ 3a 3a.2.2.2300. bekezdéséhez hasonló megfogalmazások, mint „A külső és belső eredetű veszélyeztető tényezők, így különösen tűz, elárasztás, földrengés, elektromágneses interferencia, légszennyezés által kiváltott esemény alatt és azt követően ...”

A tervezési alap meghatározásánál nem csak az egyes veszélyeket, hanem azok minden reális kombinációját figyelembe kell venni.

6.2. A TERVEZÉSI ALAPBA TARTOZÁS KÉRDÉSÉNEK ELDÖNTÉSE

Az, hogy a lehetséges események, veszélyek közül melyeket kell a tervezés alapján figyelembe venni, lehet egy a priori elhatározás, előírás, vagy determinisztikus és/vagy valószínűségi megfontolásokon, eljárásokon alapuló döntés kérdése.

A tervezési alapba, vagy annak kiterjesztésébe tartoznak azok a külső veszélyek, amelyek figyelembe vételét, függetlenül a valószínűségüktől, a biztonsági szabályzatok előírják. Így a legnagyobb polgári légi

⁵ A telephely földtani alkalmasságát az úgynevezett capable-fault léte kizárja. Azt nem vesszük figyelembe a tervezésnél.

⁶ Helyesen: „tüz-, robbanást-vagy egyéb veszély, amely a a telephelyen vagy annak szomszédságában lévő létesítmények üzemeltetése, üzemzavarai, balesetei okoznak”

jármű atomerőműre való rázuhanását posztuláljuk, lényegében a 2001. szeptember 11-i tragédia tanulságaként.

6.3. MÉRLEGELÉS GYAKORISÁG ALAPJÁN

A tervezési alapba valószínűségi elven is besorolhatók kezdeti események. Ez történhet kétféleképpen:

1. a priori valószínűségi szűrési kritériumokat specifikálhatunk a kezdeti eseményekre valamilyen megfontolások alapján,
2. levezethetjük a tervezési alapba tartozás valószínűségi kritériumait a megfelelőség létesítményre meghatározott valószínűségi kritériumokból, mint a zónasérülés vagy a nagy kibocsátás gyakorisága.

Az első esetben – ilyen módszer szerint szabályoz több ország, így Magyarország is – explicite előírják például, hogy a tervezési alapba tartozzon minden 10^{-5} /év gyakoriságnál nagyobb gyakoriságú belső meghibásodás. Nyilvánvaló, hogy az a priori valószínűségi kritériumok mögött vagy létesítmény-szintű valószínűségi kritériumok, vagy valamilyen tapasztalati megfontolások vannak.

A gyakorlatban a valószínűségi szűrési szint (p_{scr}) a hatósági korlátokat meghaladó kibocsátások megengedett valószínűségéből (vagy éves gyakoriságából) (p_{lr}) származtatható, ami általában nem nagyobb, mint 10^{-7} /év (esetleg egyes régebbi tervezésű atomerőművek esetében 10^{-6} /év). A számításhoz még szükség van annak feltételes valószínűségére (p_{fr}), hogy egy bizonyos hatásra a létesítmény úgy sérül, hogy annak következménye a hatósági korlátot meghaladó kibocsátás lesz. Ezt a feltételes valószínűséget konzervatív felső becsléssel lehet meghatározni. A nemzetközi gyakorlatban, első közelítésben $p_{fr}=0,1$ feltételezéssel élnek.

$$p_{scr}p_{fr} < p_{lr} \quad (1)$$

azaz legyen a szűrési valószínűség akkora, hogy a kiszűrt esemény bekövetkeztekor a meg nem engedett kibocsátás valószínűsége az előírt, vagy annál kisebb legyen.

Magának a korai nagy kibocsátásnak a valószínűségi kritériuma abból követelményből ered, hogy az átlagos individuális fatalitás az atomerőmű környezetében legyen kisebb, mint egy tized százaléka annak a kockázatnak, amilyen a kitettsége a népesség egyedeinek összességében. Ezt a WASH-1400 (NUREG 75/014 [4]) report keretében vezették le. Az USA akkori adatai alapján az individuális a rákos fatalitás 2×10^{-3} /év, amiből következik hogy a rákos fatalitás valószínűsége reaktoronként és évenként kisebb legyen, mint 2×10^{-6} . Az individuális korai fatalitás átlagos valószínűsége reaktoronként és évenként pedig legyen kisebb, mint 5×10^{-7} (NUREG-1150 [5], p. 12-3). Az NBSZ 3a szerint ezt a követelményt az atomerőmű akkor teljesíti, ha a zónasérülési gyakorisága $<10^{-5}$ /év, a nagy korai kibocsátás gyakorisága $<10^{-7}$ /év.

A telephely alkalmasságát kategorikusan kizáró veszélyek esetében is, mint például a felszínre kifutó permanens elvetődést okozó földrengés veszélye, alkalmazhatók a valószínűségi módszerek a tervezés alapjából történő kizárás megalapozására. Elvben ilyen veszélyek bekövetkezésének valószínűsége zérus. Ugyanakkor, e veszélyek értékelése önmagában is valószínűségi módszerrel történik, azaz a veszély kizárása azzal történik, hogy megállapítjuk annak kis valószínűségét. Az ekkor alkalmazott szűrési szint úgy állapítható meg, hogy feltételezzük, a létesítmény az esemény bekövetkezésekor elkerülhetetlenül sérül, azaz $p_{fr}=1$, akkor a p_{lr} a szűrési szint.

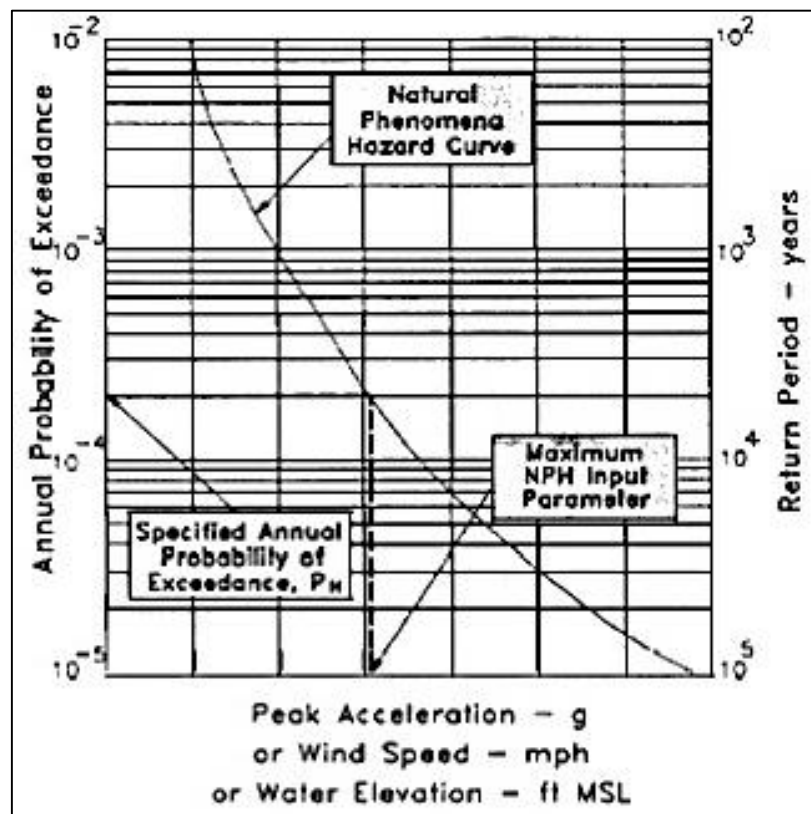
A veszélyt, illetve a veszélyeztetettséget azzal a valószínűség-eloszlással jellemezhetjük, amely megadja, milyen valószínűséggel fordulhat elő egy adott paraméterrel jellemezhető esemény egy adott helyen és időintervallum alatt. Ez a paraméter jellemzi az esemény méretét, ami egyben meghatározza a következmények mértékét.

A tervezési alapon figyelembe vett karakterisztikus érték, például szélsőérték, az az érték, amelyet adott idő alatt (például 10000 év) alatt a szélsőérték csak egy megadott valószínűséggel haladhat meg (probability of exceedance). *Bekövetkezési gyakoriság* egyenlő azzal az átlagos éves gyakorisággal, p , mellyel az adott kockázati paraméter egy bizonyos intervallumban bekövetkezik, vagy egy szintet meghalad, illetve a T_R visszatérési idővel lehet definiálni. Az $1/T_R$ reciproka a P_E éves meghaladási valószínűséggel egyenlő. Az üzemidőre vonatkoztatott meghaladási valószínűség P_E (probability of exceedance), pedig a következő képlet szerint számítható ki,

$$P_E = 1 - (1 - p)^n \approx 1 - e^{-\frac{n}{T}} \quad (2)$$

ahol n az üzemidő években. Ha az éves gyakoriság $p=10^{-2}$, akkor 50 évre a meghaladási valószínűség 0,1, ha pedig $p=10^{-4}$, akkor a meghaladási valószínűség 0,005, a visszatérési idő pedig $T_R \approx 10000$ év.

Az a méret, illetve jellemző paraméter és a gyakoriság függvénykapcsolata a veszélyeztetettségi görbe, ami az a adott mérték meghaladásának valószínűségi eloszlásfüggvénye, ($H(.)=1-P(.)$) (lásd NBSZ 7. kötet 7.2.1.0600. bekezdését).



1. ábra Veszélyeztetettségi görbe (DoE Standard 1020 [6])

6.4. A KÜLSŐ VESZÉLY JELLEGÉNEK MÉRLEGELÉSE

A veszélyeket jellegüknél fogva még kategorizálni lehet az alábbiak szerint⁷:

- nincs lehetőség az előrejelzésre, hirtelen bekövetkező jelenség, mint a földrengés,
- lassan kifejlődő jelenség, prognosztizálható jelenség, van idő intézkedni, mint a szélsőséges hőmérsékletek, időjárási extrémumok,
- valami más hatás burkolja, külön nem kell figyelembe venni – ez általános a tervezési gyakorlatban

⁷ A veszély jellegének megfelelően három kategóriát állapít meg a PN-064-05 [83] orosz norma.

- védelmi intézkedést vagy műszaki és adminisztratív intézkedést igényel (szándékos károkozás, terror).

Egyes, valószínűségi értelemben lehetséges esemény, vagy extrém érték megvalósulásához számos egyéb észlehető körülménynek kell előállni (például extrém csapadék a vízgyűjtő területen), illetve az esemény megvalósulásához megfelelő időre van szükség, így mód van az esemény előrejelzésére, sőt a felkészülésre. Ezért a tervezési alap meghatározásakor feltétlenül meg kell adni a gyakoriságon és a hatást leíró paramétereken túl a veszélyes jelenség kifejlődésének idejét, a hatás tartósságát, az előrejelezhetőségét és a monitorozhatóságát. Ennek megfelelően kell a műszaki megoldásokat és adminisztratív intézkedéseket meghatározni (NBSZ 7. kötet 7.2.1.1500.). Az NBSZ 3a kötet 3a.3.6.2900. úgy rendelkezik, hogy „A védelem biztosítható adminisztratív eszközökkel is, azaz a veszélyt jelentő emberi tevékenység korlátozásával, de a védelem műszaki megoldásait ezekkel szemben előnyben kell részesíteni, amennyiben ilyen megoldások ésszerűen megvalósíthatók.”

Az előfordulás gyakoriságán túl a külső veszélyek tervezési alapba tartozásának eldöntéséhez, illetve a tervben való kezeléséhez vizsgálni kell

- az esemény előre jelezhetőségét, a felkészülés és műszaki vagy adminisztratív beavatkozás lehetőségét,
- a kedvezőtlen esemény-kombinációkat,
- a veszélyek másodlagos következményeit,
- a személyzet cselekvőképességére gyakorolt hatásokat (pánik),
- a külső támogatás szükségességét és bevonhatóságát,
- a több létesítménynek helyet adó telephelyen a létesítmények kölcsönhatásait.

6.5. KIKÜSZÖBÖLHETŐ KÜLSŐ VESZÉLYEK

Vannak olyan veszélyek, amelyek műszaki intézkedésekkel, védelmekkel kiküszöbölhetők, mint az árvízveszély védművekkel, a talajfolyósodás-veszély talajcserével, talajstabilizációval, mélyalapozással. A telephely tulajdonságainak ilyen megváltoztatásával a veszélyre jellemző gyakoriságokat szignifikánsan – a tervezési alap valószínűségi kritériumához képest legalább egy nagyságrenddel /TAK2 szintig/ – csökkenteni kell, vagy determinisztikus értelemben a veszélyt nagy biztonsággal ki kell zárni (NBSZ 7. kötet 7.2.1.1700.).

6.6. MÁSODLAGOS VESZÉLYEK

A veszélyeknek lehetnek olyan következményei, kísérő jelenségei, amelyek önmagukban is jelentős károsító hatással bírnak. Így a létesítmény tervezésénél a tervezési alapba tartozó veszélyek primer hatásai, mint a földrengés által okozott talajmozgás, mellett figyelembe kell venni a lehetséges másodlagos veszélyeket és hatásait. A 2. táblázat szemlélteti egyes elsődleges veszélyek által kiváltott másodlagos veszélyeket és a primer s másodlagos hatásokat. A másodlagos hatások vizsgálatáról és a tervezésnél való figyelembe vételéről az NBSZ 7. kötet 7.3.2.0500., az NBSZ 3a pedig például a 3a.3.6.1000. bekezdés vagy a belső veszélyek vonatkozásában a 3a.2.2.4700. c) bekezdés)

A másodlagos hatások figyelembe vétele a tervezésnél attól függ, milyen késleltetéssel követi a másodlagos hatás az elsődlegest. Két eset lehetséges:

- A másodlagos hatás nem szuperponálódik, hanem kíséri az elsődleges. Ekkor a tervezés abból a feltételezésből indul ki, hogy az elsődleges hatásra megtervezett, minősített szerkezetek és komponensek teljes mértékben megőrzik integritásukat és működőképességüket és így éri őket a másodlagos veszély hatása. Erre példa a talajfolyósodás által okozott talajsüllyedés, ami akár több óra késleltetéssel követi a földrengés vibrációs hatását. A Fukushima Dai-ichi Atomerőművet a szökőár a rengést több, mint fél órával követte. Ilyen esetben az esemény utáni

állapotot már a kezelő személyzet intézkedései megváltoztathatják, amit előre a tervezésnél nem, vagy csak korlátozott mértékben lehet figyelembe venni.

- A másodlagos hatás szinte egyidejű az elsődlegessel, mint a repülőgép rázuhanásnál az elsődleges hatásokkal egy időben keletkező, de azoknál jóval hosszabb ideig ható tűz.

2. táblázat Elsődleges és másodlagos veszélyek és hatásaik

veszély / elsődleges hatás	másodlagos veszély
földrengés: talajmozgás általi „vibrációs” hatás	szökőár
	tűz
	áradás, elárasztás
	robbanás
	talajfolyósodás
	földcsuszamlás
	talajsüllyedés
repülőgép rázuhanás: ütközés penetráció/leválás, stb. kollapszus	tűz
	robbanás
	vibrációs hatás
	nehéz teher leesése (polárdaru)
	elárasztás
szél, tornádó: szélnyomás	repülő tárgy

7. A TERVEZÉSI ALAPBA TARTOZÓ BELSŐ VESZÉLYEK

Belső veszélyek a létesítmény üzemeltetéséből, az üzemeltetési, karbantartási folyamatokban előforduló meghibásodások vagy mulasztás következtében eredhetnek, mint például a tűz, az elárasztás, a nehéz teher leejtése, a nagy energiájú csőtörések (ütközés, közeg-sugár, ostromozás), illetve a repeszek, repülő tárgyak. A belső veszélyek a hatás-mechanizmus (hő, mechanikai terhek) tekintetében hasonlítanak a külső ipari, katonai szállítási veszélyek terheihez, csak a források és a céltárgyak térnek el a külső veszélyek forrásaitól, céltárgyaitól.

Az NBSZ 3a 3a.2.2.4500. bekezdése felsorol számos belső eseményt, amelyet az atomerőmű tervezésénél figyelembe kell venni. Ezen felsorolás meghatározza a TA1-3 üzemállapotokat és tranzienseket, amelyek nem tekinthetők belső veszélyeknek, de a TA3 alatt, s különösen a TA4 alatt nagyenergiájú rendszerek törése szerepel, amelyek – azon túl, hogy hűtőközeg-vesztéssel járnak – veszélyt jelentenek a környezetükben lévő rendszerek számára (csőostorozás, nagyenergiájú kiáramló közeg, elárasztás, stb.).

Tipikusan a belső veszélyek kategóriájába tartoznak az NBSZ 3a 3a.2.2.4700. bekezdésben felsoroltak, mint:

- nehéz teher leejtése,
- tűz, robbanás és belső elárasztás hatásai, amelyek a technológiai rendszerek meghibásodása vagy a blokki tevékenységek során következnek be,
- repülő tárgyak, beleértve a turbina elszabaduló részeit,
- meghibásodott rendszerekből kikerülő veszélyes közeg, rezgés, törött csővezeték ostromozó mozgása, folyadéksugár hatásai.

A tervezési alapba tartozást tekintve egyes belső veszélyeket a bekövetkezés valószínűségétől függetlenül posztuláljuk, mint a nagy és kis csőtöréseket, illetve ezek következményeként fennálló veszélyeket.

A lehetséges belső veszélyeket az üzemi meghibásodások (turbinalapát-törés, csőtörések, kábel, kenő vagy üzemanyag-tüzek, stb.) és az üzemeltetési/karbantartási műveletek közben bekövetkező balesetek (nehéz teher leejtése) elemzése alapján azonosítjuk és jellemezzük, alkalmazva a fenteikben bevezetett fogalmakat, mint a hatást jellemző paraméter, meghaladási gyakoriság és veszélyeztetettségi görbe. Meghatározzuk továbbá a potenciális céltárgyakat, illetve azok sérülésének biztonsági következményeit, s a potenciális hatás alapján döntünk arról, hogy az adott veszélyt a tervezés alapban figyelembe vesszük-e. Ennek során általában kombinálni kell a valószínűségi/statisztikus és a determinisztikus módszereket, s figyelembe kell venni a veszély és a konstrukció viszonyát (lásd a 7.2 fejezetet).

Nyilvánvaló, hogy a tervezőnek nem a veszélyeztetett rendszereket, potenciális céltárgyakat kell módosítani belső veszélyekkel szembeni védelem érdekében, hanem megfelelő térkialakítással és tervezői megoldásokkal, mint például elmozdulás korlátozók alkalmazása, kell magát a hatást kiküszöbölni.

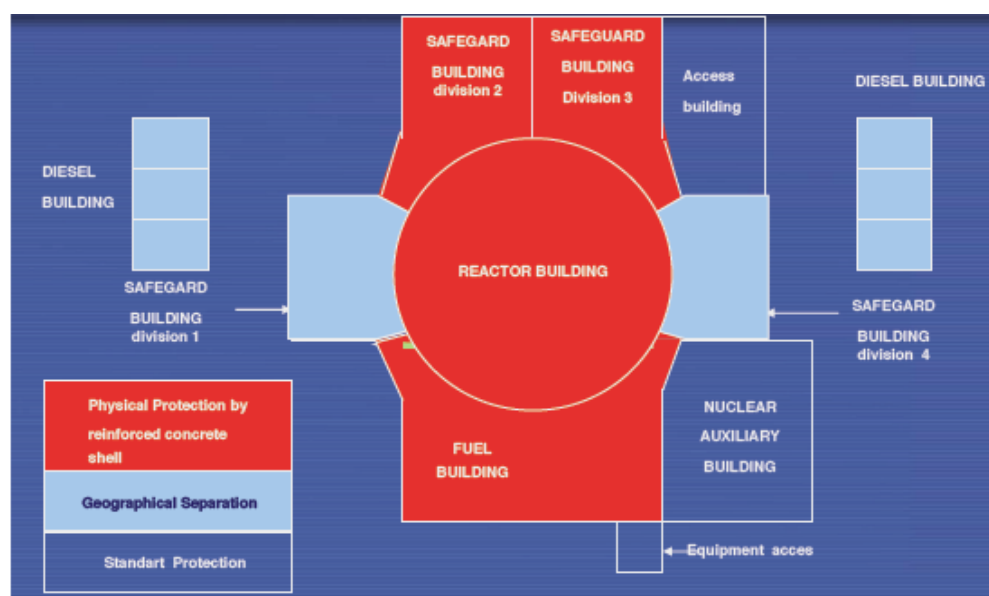
7.1. A VESZÉLYEK ÉS A KEZDETI ESEMÉNYEK VISZONYA

A rendszertervezés és a biztonsági elemzések szempontjából fontos, hogy definiáljuk a tervezési alap számára azokat feltételezhető kezdeti eseményeket, amelyek a veszélyek hatásának következményeként előállhatnak. Ezek a kezdeti események lényegében azonosak lehetnek a technológiai rendszerek, rendszerelemek meghibásodásából származókkal, de a kezdeti és peremfeltételek, az üzemzavar-kezeléséhez szükséges rendszerek rendelkezésre állása tekintetében különbözhetnek azoktól a közös okú meghibásodások okán, amely különösen jellemző az egész telephelyet érintő külső veszélyek következményeire, mint például a földrengés.

Egyes veszélyekre, mint például a tűz a tervezés nem valamely kezdeti eseményt követő folyamatok/szekvenciák nyomán történik, hanem a megfelelő ipari kódok és szabványok szerint.

7.2. A VESZÉLYEK ÉS A KONSTRUKCIÓ VISZONYA

A veszélyek biztonsági relevanciája teljességgel nem ítéhető meg a konstrukciótól függetlenül. Például a repülőgép rázuhanást vagy külső veszélyből (tornádó, robbanás) származó repülő tárgyat tekintve, az épületek telephelyen való elrendezése befolyásolja a céltárgy, azaz a biztonság szempontjából fontos szerkezetek, rendszerek találati felületét, lásd az EPR épületeinek, s ezzel együtt a biztonsági rendszerek térbeli szeparációját, amelyet a 2. ábra szemléltet.



2. ábra Az EPR biztonsági rendszereinek és dízeleinek térbeli szeparációja

Hasonlóképpen a turbina, illetve a turbina-épület konténmenthez viszonyított orientációja befolyásolja annak lehetőségét, hogy a turbina-repesz eltalálhat-e vitális szerkezetet vagy komponenst.

A belső veszélyek, mint például a nagyenergiájú csőtörés, majd annak hatásai (törött csővég ostromozása) a tervezés során a diszpozíció megfelelő kialakítása révén kikerülhetnek a tervezési alapból.

A telephely tulajdonságainak megváltoztatása, mint például a talajstabilizáció a konstrukció, azaz az alapozás technikájának része, miáltal a talajfolyósodás-veszély kizárható. Az árvíz-veszélyt tekintve hasonló az értelme a telephely feltöltésének.

8. AZ ESEMÉNYEK/KÖRÜLMÉNYEK/TERHEK KOMBINÁCIÓJA

8.1. FÜGGŐ ÉS FÜGGETLEN ESEMÉNYEK

Függő események azok, amelyeknél az egyik esemény bekövetkezése feltétele a másik esemény bekövetkezésének (földrengés, földrengés következtében kialakuló talajfolyósodás, vagy földrengés által okozott károk miatti tüzek, elárasztások). *Független események* azok, amelyeknél az egyik esemény bekövetkezésétől a másik esemény bekövetkezésének valószínűsége nem függ. Ha két esemény független, akkor annak feltételes valószínűsége, hogy az A esemény bekövetkezik, ha a B esemény már bekövetkezett egyenlő az A esemény bekövetkezésének valószínűségével. Két véletlen esemény egyidejű (időben átfedő) bekövetkezésének valószínűsége egy év alatt, P:

$$P = P_1 P_2 (t_1 + t_2) / Y \quad (3)$$

ahol P_1 és P_2 az események bekövetkezésének éves valószínűsége,
 t_1 és t_2 az egyik, illetve a másik esemény jellemző időtartama,
 Y az év időtartama ugyanabban az egységben kifejezve, mint t_1 és t_2 .

A gyakoriság/valószínűség szerinti szűrést ebben az esetben a kombinációra kell alkalmazni.

A terheket megfelelő kombinációkban kell figyelembe venni a tervezésnél. Erre egy példát mutat 1. táblázat. Példaként lehet a konténment tervezését tekinteni, amelynél irányadó lehet a NAÜ NS-G-1.10 [7] útmutatója, illetve az orosz PNAE G-10-007-89 [8] szabvány. A terhekre, teherkombinációkra és megengedett értékekre vonatkozó USA NRC követelményeket a vasbeton konténmentre a Regulatory Guide 1.136⁸ [9] az acél konténmentre pedig a Regulatory Guide 1.57⁹ [10] tartalmazza, amelyek lényegében az ASME megfelelő fejezeteire építenek. Így a vasbeton konténment esetében az ASME Section III Table CC-3230-1 specifikálja a terheket (3. táblázat). Az egyidejű hatások kezelésére pedig a 1. táblázat mutat példát a teherkombinációk formájában, megadva egyúttal a kombinációs tényezőket is.

3. 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 üzem 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

⁸ <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/reg-guides/power-reactors/rg/01-136/01-136.pdf>

⁹ <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1232/ML12325A043.pdf>

4. táblázat A konténment teherkombinációi (ASME Section III Table CC-3230-1)

#	kategória	D	L	F	G	P _t	P _a	P _v	T _t	T _o	T _a	E _o	E _{ss}	W	W _t	R _o	R _a	R _i	H
Service																			
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			
Factored																			
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			
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/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/extrém	1,0	1,0	1,0	1,0		1,0				1,0		1,0				1,0	1,0	

Nyilvánvaló, hogy a szinte azonos idejű, ok-okozati viszonyban lévő hatások, mint a LOCA és a csőtörés dinamikus hatásai egy kombinációban vannak. Feltűnő, hogy a kis valószínűségű események közül az SSE, azaz a biztonsági földrengés és a LOCA egy terheléskombinációba kerül.

Az NBSZ 3a szellemiségéhez és terminológiájához a fenteiknél jóval közelebb áll az EUR teherkombinációs táblázata, amelyben a TAK állapotok, illetve terhek is nevesítve vannak (5. táblázat). A megfelelőségi kritériumok itt is szerepelnek, mint a NAÜ NS-G-1.10 dokumentumban megadott teherkombinációs táblázatban.

5. táblázat Teherkombinációk 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	X
ADS Actuation Pressure					X			(1)	(1)						(1)	(1)
ADS Actuation Dynamic Load					X					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 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 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

8.2. A BURKOLÓ ELV

A tervezési alap meghatározásánál célszerű alkalmazni a burkoló elvet, amely egy általános tervezési elv. Lényegében arról van szó, hogy az azonos mechanizmusú hatások közül – például nehéz terhek leesése egy adott földemre az összes lehetséges emelési műveletet, eszközt és terhet tekintve, vagy különböző okokból, forrásokból bekövetkező robbanások – kiválasztjuk a tervezéshez a mértékadót.

A 6. táblázat táblázat mutatja, hogy különböző külső veszélyforrásból származó hatások között milyen mértékű átfedés van.

Amennyiben számos forrásból azonos hatás várható, a következmények súlyosságát, s nem csak a hatás primer jellemzőit is figyelembe kell venni, s az adott helyen a legsúlyosabbat kell mértékadónak tekinteni (0).

A burkoló elv alkalmazásánál körültekintően kell eljárni, hisz például

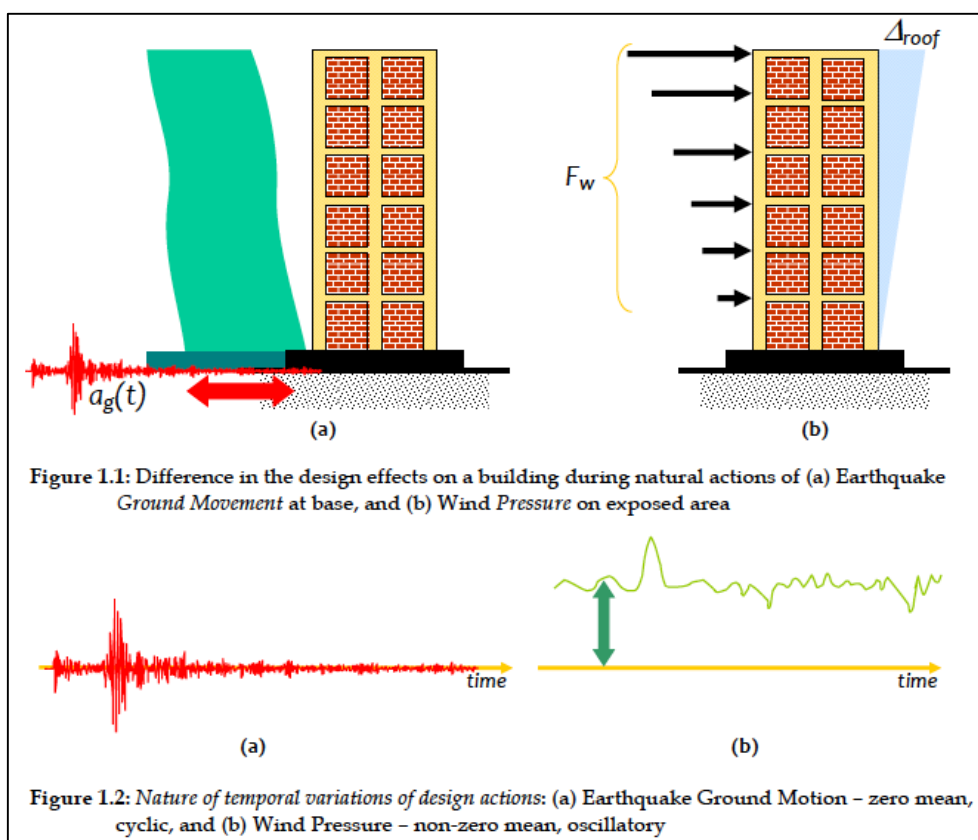
- míg a szélnyomás, vagy az örvények az épületen magán hatnak, addig a földrengés az épület alapján keresztül hat, 3. ábra [11],
- a konténmentre rázuhanó repülőgép által létrehozott rezgés válaszspektruma különbözik a földrengés válaszspektrumától, 4. ábra [12].

6. táblázat Külső veszélyek potenciális forrásai és hatásai

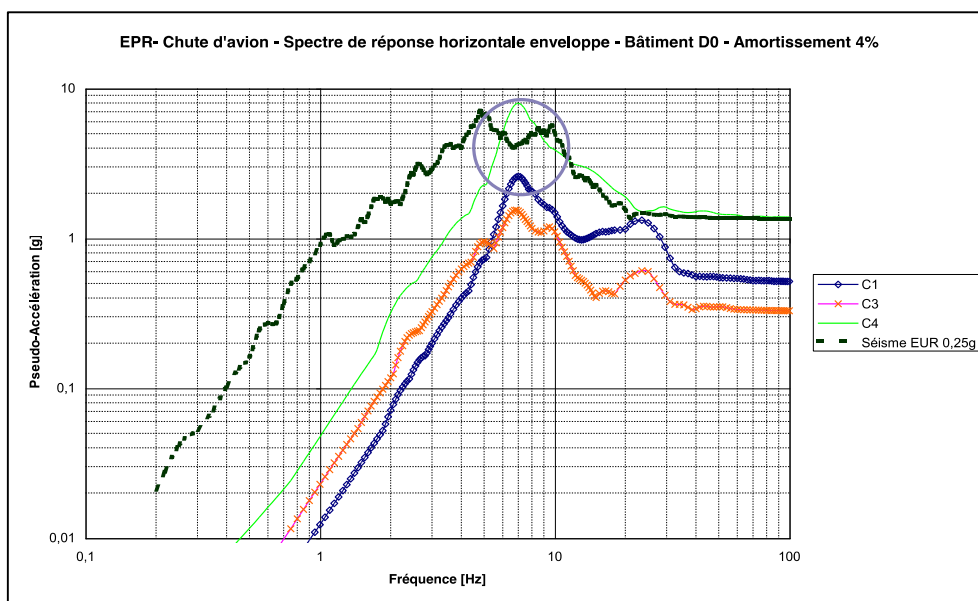
potenciális forrás	a forrás jellemzői, figyelembe veendő körülmények	hatás, amely kezdeti eseményhez vezet
stacionárius		
ipari objektumok, bányák, katonai objektumok	a veszélyes anyag mennyisége, a baleset gyakorisága, a távolság, topografikus és meteorológia körülmények	robbanás, tűz, füst robbanóképes közeg, fojtó, mérgező gázok kibocsátása repeszek, repülő tárgyak, elektromágneses kölcsönhatás, örvényáram a talajban, talajrezgés, süllyedés, beomlás
erdők	terület, faállomány, minőség	tűz, füst
mobil		
katonai, polgári légiközlekedés	baleseti gyakoriság, légifolyosó jellemzői (ha van), a légi jármű jellemzői, rázuhanás jellemzői (sebesség, szög), a céltárgy jellemzői	ütközés, robbanás, tűz, füst,
repülőterek, gyakorlóterek	távolság a telephelytől, műveleti gyakoriság, baleseti gyakoriság távolság	fojtó, mérgező gázok kibocsátása
közúti közlekedés, szállítás	baleseti gyakoriság, forgalom, szállított anyagok mennyisége, milyensége, terjedési, hígulási, azaz meteorológiai és topografikus körülmények	robbanás tűz, füst robbanóképes közeg, fojtó, mérgező gázok kibocsátása repeszek, repülő tárgyak
vízi szállítás		

7. táblázat Külső veszélyek hatásának jellemzői és következményei

a veszély	hatás	a hatás jellemzői	következmény
robbanás	nyomás-hullám	nyomás-idő függvény	szerkezetek mechanikus sérülése, összeomlása, vibrációs hatás, sebesülések és halálesetek
repsz	ütközés	tömeg, anyag, sebesség, alak, beesési szög, célfelület	
földrengés	talajrezgés	akcelerogramma, válaszspektrum	
tűz (külső)	hő	hőmennyiség, hőáram, időtartam	korlátozott kiszolgálhatóság, szellőzés blokkolása, sebesülések és halálesetek
	füst szikrák	égéstermék milyensége, mennyisége, terjedés, hígulás	
fojtó, toxikus gázok	mérgezés, kémiai reakció	mennyiség, koncentráció, terjedés	korlátozott kiszolgálhatóság, egészség-károsodás, halálestetek, fokozott korrózió
korrozív gázok			
talajfolyósodás	épület süllyedés, instabilitás	a megfolyósodott réteg vastagsága, süllyedés, relatív süllyedés mértéke	épületek, vonalas szerkezetek mechanikai sérülése, stabilitás-vesztés, elárasztások



3. ábra A szél és a földrengés hatásának összehasonlítása



4. ábra A földrengés és a különböző repülőgépek rázuhanása által keltett válaszspektrumok

A nagy polgári repülőgép erőműre történő rázuhanása egy olyan veszély, amely hatását tekintve burkolja a terrorista támadások nagy osztályát, s nyilvánvalóan burkolja a polgári légi járművek véletlen rázuhanásának eseteit is, eltekintve attól, hogy a tervezésnél TA4 vagy TAK1 követelményeket érvényesítünk. A szándékosságtól és a pilóta képzettségétől némileg függ a rázuhanás szöge és sebessége.

9. A TERVEZÉSI ALAP KITERJESZTÉSE

A tervezési alap kiterjesztése a tervezési alapon túli baleseti folyamatoknak egy determinisztikus és valószínűségi alapon kiválasztott része, amelybe összetett (többszörös meghibásodás) és jelentős zónasérüléssel járó folyamatok is tartoznak (3a.2.1.1900., 3a.2.2.6300.). Ilyenek a következők:

- Azok a kombinált kezdeti események, amelyek egy, a tervezési alapon figyelembe vett esemény, és egy ettől független esemény vagy körülmény együttállásával jönnek létre, s az így lezajló folyamat következményei a tervezési alapon specifikálnál súlyosabbak.
- Egymástól nem független események bekövetkezése, amelyet a terv elveiben kezelt. Ilyen lehet például földrengés és földrengés következtében fellépő csőtörésből hűtőközeg-vesztés.
- A tervezési alap kiterjesztésébe kerülhet egy egyszeri esemény, mint például a katonai vagy nagy polgári légijármű rázuhanása az atomerőműre (3a.2.2.6300. q)).

A tervezési alap kiterjesztését képezi például a katonai és polgári repülőgép becsapódása, vagy a Paksi Atomerőmű esetében a földrengést követő talajfolyósodás.

Korszerű atomerőművek esetében a tervezési alap kiterjesztésénél a megfelelőség kritériumai lehetnek az alábbiak (3a.2.4.0700.):

- legyen kisebb, mint 10^{-7} /év a végső hőelnyelőbe történő hőelvitel teljes elvesztésének gyakorisága, vagy
- a nagy kibocsátással járó esemenyláncok kumulált gyakorisága ne haladja meg a 10^{-6} /év értéket (a szabotázsztól eltekintve),
- az atomreaktortól vett 800 m távolságon túl ne legyen szükség korai veszélyhelyzeti intézkedésekre, azaz a lakosság sürgős kimenekítésére.

A nagy polgári légi jármű és a katonai replőgép rázuhanása esetén (3a.3.6.3100.) a TAK1 követelmény vagy a zónában és a pihentető medence integritásának és hűtésének megvalósítása, vagy a konténment

gátfunkció megmaradása (3a.3.6.3300.) Az EUR [13] szerint két gát megmaradásával kell ebben az esetben számítani, a burkolat és a primerkör integritásával¹⁰.

Nyilvánvaló, hogy a komplex eseménysorozatok akkor tartozhatnak a tervezési alap TAK1 kiterjesztésébe, ha azokra valóban meghatározhatók és ésszerűen megvalósíthatók a megelőző vagy a következményeket enyhítő, előre megtervezett intézkedések és ennek eszközei¹¹.

Nem tekintjük a tervezési alap kiterjesztésének azt az esetet, amikor egy adott veszély, például földrengés, a tervezési alapon figyelembe vettnél *némileg kisebb* valószínűségű eseményként, s így a mértékadó karakterisztikus értékét meghaladó értékekkel realizálódik, azaz az úgynevezett cliff-edge esetet. Ezeket a tervezési alapon belül kell kezelni a jelenséget kizáró, tartalékokkal való tervezéssel.

A tervezési alap kiterjesztése egyfelől konstrukciós megoldások kidolgozását, műszaki eszközök megvalósítását követeli meg (hidrogén-kezelés, konténment leeresztés, reaktor-tartály hűtés, stb.), másfelől baleset-kezelési eljárások kidolgozását jelenti.

A gyakorlati tervezést tekintve arra van szükség, hogy meghatározzuk a komplex üzemzavarok kezelésére szolgáló (blokki és telephelyi) rendszerek, létesítmények tervezési alapját. Ebből a szempontból a tervezési alap kiterjesztése, bár önálló fogalom, de szerepe ugyanaz, mint a tervezési alapnak, csak az egyes tervezési követelmények tekintetében lehetnek eltérések a tervezési alap esetében követettéktől. A tervezés egyedi specifikációk alapján történik, amelyek általában módosítják vagy helyettesítik a szabványok igénybevételekre és ellenállásra vonatkozó előírásait, és általában nem írják elő az egyszerű megvalósítás követelményét.

10. TERVEZÉS VESZÉLYEKRE ÉS AZ OSZTÁLYBA SOROLÁS

Ezen fejezet mottója, s az egész biztonsági, földrengés-biztonsági, tűzbiztonsági, stb. osztályokba sorolás alapja egy egyszerű magyar szólással kifejezhető: „Ágyúval nem lövünk verébre!”

A rendszereket, rendszerelemeket biztonság szerinti fontosságuk alapján osztályokba sorolják, amelyet az NBSZ 3a 3A.2.2. fejezet alatti „II. Biztonsági osztályba sorolás” című alfejezet mutat be. Az osztályba sorolás azonban nem lenne több, mint szimpla dobozolás, ha az egyes osztályokhoz nem rendelnénk a fontosságnak megfelelően differenciált tervezési, gyártási, létesítési üzemeltetési és fenntartási követelményeket.

A legmagasabb minőségi szintet a reaktor-berendezés esetében követeljük meg, amely magában foglalja magát a reaktort, a reaktor hűtőkört és az ehhez kapcsolódó technológiákat, s amelyeket az ipar legmagasabb minőségi normái szerint kell megtervezni. Például, a reaktor-berendezés tervezéséhez az ASME BPVC Section III, Class 1 osztályra vonatkozó (NB-3600) szabványt alkalmazzák, míg a többi, biztonsági osztályba sorolt rendszert, rendszerelemet (gépésztechnológiai és tartószerkezetet) pedig a besorolásuknak megfelelően az ASME BPVC Section III, Class 2 (NC-3600), illetve 3 osztályra (ND-3600) vonatkozó szabványok szerint tervezik (ASME, 2007). A villamos és irányítástechnikai rendszerek, rendszerelemek esetében a legmagasabb biztonsági besorolásukat az Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 1E osztálynak megfelelő szabványok szerint tervezik (például IEEE Standard 603). Más szabványrendszerek, mint például az orosz PNAE, vagy a francia AFCEN nukleáris szabványsorozat esetében is létezik a nukleáris biztonsági előírásoknak megfelelő összerendelése a biztonsági osztálynak és az alkalmazható szabványnak. A biztonsági funkcióval nem rendelkező rendszereket, rendszerelemeket az általános ipari gyakorlatnak megfelelően kell megtervezni.

¹⁰ 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

¹¹ TAK2 esetre is vannak előre megtervezett, beépített eszközök, mint az olvadék-csapda.

A biztonsági osztályba sorolás mellett gyakorlat a földrengés-biztonsági kategorizálás, amelynek meg kell határoznia a tervezési alapba tartozó biztonsági földrengésre történő tervezést, illetve minősítést. Jól meggondolva a dolgot, a biztonsági relevancia szerinti minőségi csoportba, illetve biztonsági osztályba való besorolás mellett a külön földrengés-biztonsági kategorizálás értelmét veszíti. Egy momentum azonban mégis figyelmet érdemel a földrengés és más külső hatások vonatkozásában. Nevezetesen, a külső veszélyek hatásai olyan meghibásodásokat okozhatnak a biztonsági funkcióval nem rendelkező rendszerelemek esetében, amelyek biztonsági funkciók megvalósulását akadályozzák valamilyen kölcsönhatás miatt, mint például rádőlés, elárasztás. A veszélyeztető rendszerelemet úgy kell megtervezni, hogy a biztonsági funkciót veszélyeztető meghibásodás, például megcsúszás, felborulás ne történhessen meg.

A gépészeti rendszerelemekre a biztonsági és földrengés-biztonsági osztályba sorolás és a tervezési szabvány összerendelésére mutat példát a 8. táblázat.

A biztonsági relevancia szerinti osztályozás jelentősen fejlődött, mindenekelőtt a kockázat szerinti megfontolások alkalmazása irányában. Ez lehetővé teszi, hogy a determinisztikus szemléletben biztonsági szempontból fontosnak ítélt egyes szerkezetek, rendszerek, és komponensek hozzájárulása a létesítmény kockázatához elhanyagolható lehet, míg másoknak, amelyeket a determinisztikus módszer szerint biztonsági szempontból irrelevánsnak osztályozunk, lehet jelentős hozzájárulása a létesítmény kockázatához. Ilyenek például azok a nem biztonsági rendszerek, amelyek sérülése egy külső hatásra veszélyeztetheti valamely biztonsági rendszer működését, vagy azok, amelyek a mélységi védelem elvének megvalósításához elengedhetetlenek. Az ilyen szemléletű osztályozás azon túl, hogy általában is növeli a biztonság céljából tett tervezői intézkedések céltudatosságát és hatékonyságát, racionalizálja a ráfordításokat a biztonsághoz való hozzájárulás mértékében. Ez egy olyan pont, amikor tervezés és a biztonsági elemzés egymásra hatása megnyilvánul.

8. táblázat A követelmények differenciálása gépészeti rendszerelemek földrengésre való tervezésnél

	1. biztonsági osztály	2. biztonsági osztály	3. biztonsági osztály	nem biztonsági osztály
1. szeizmikus osztály, a földrengés alatt és után aktív biztonsági funkciója van	nyomástartás			nem értelmezhető
	ASME BPVC III, NB-3600	ASME BPVC III, NC-3600	ASME BPVC III, ND-3600	
	minősítés ASME QME-1-2007			
2. szeizmikus osztály, a földrengés alatt és után passzív biztonsági funkciója van	ASME BPVC III, NB-3600	ASME BPVC III, NC-3600	ASME BPVC III, ND-3600	
3. szeizmikus osztály, a kölcsönhatások miatt biztonsági funkciót veszélyeztet	nem értelmezhető			ipari szabványok szerint, a kölcsönhatás kizárása
nem besorolt	nem értelmezhető			ipari szabványok szerint

A racionális tervezési megoldásokra különösen a balesetkezelés speciális eszközeinek tervezésénél kell törekedni. Nyilvánvaló, hogy egy mobil hűtővíz betáplálást például a pihentető medence hűtésére egy súlyos földrengés után, főleg, ha az még flexibilis csővezetékkel is történik, nem a reaktor-berendezés esetében alkalmazott szabványok és kritériumok szerint kell megtervezni.

11. A BIZONYTALANSÁGOK KEZELÉSE

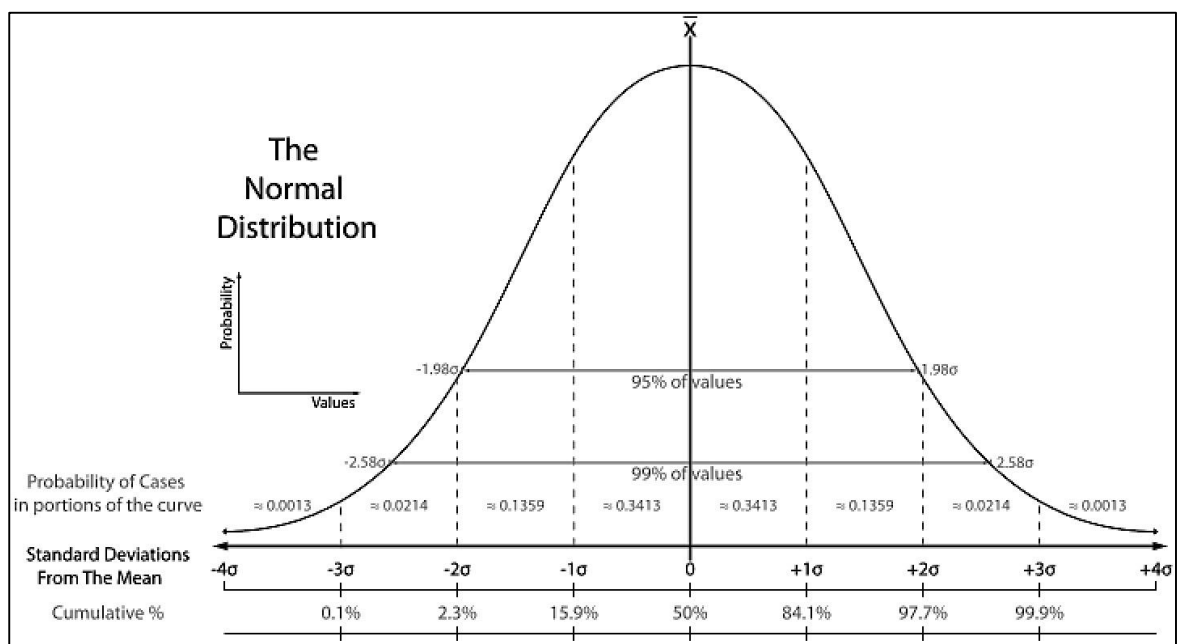
A tervezés alapját meghatározó események, körülmények és veszélyek jellemzése – eltekintve az előírásokban definiált, így lényegében determinisztikusan és teljesen egyértelműen meghatározott eseményektől és azok előírt jellemzőitől – nem mentes a bizonytalanságoktól. A bizonytalanság értékelése és figyelembe vétele kardinális kérdése a tervezési alap meghatározásának. A nukleáris energetika a fejlődése során, tekintettel a nukleáris rendszerek üzemeltetésének igen jelentős potenciális kockázatára, s a megélt súlyos üzemzavarok, balesetek tanulságaira, egyre kisebb valószínűségű eseményeket, veszélyeket definiál a tervezés alapján. Ezek jellemzésére bonyolult, sokszor csak közvetett eszközök állnak rendelkezésre, korlátozott a lehetőség vagy egyáltalán nincs mód ez eljárások empirikus validációra, verifikációra. A természeti veszélyek jellemzésének általános problémája, hogy a jelenség modellezése relatíve rövid historikus rekordokra, még rövidebb időtartamú műszeres adatgyűjtésre támaszkodik, s a megfigyeléseken kívül nincs mód empirikus igazolást nyerni. Eléggyé nyilvánvaló, hogy minél inkább a kisebb valószínűségek tartományába tolódik el valamely esemény, paraméter meghatározása, annál inkább a bizonytalanságok dominálják az értékét.

A bizonytalanság – természetét tekintve – kétféle okból lehet. egyfelől az adott természeti jelenség önmagában véletlen természetű, így valószínűségi módszerekkel (eloszlás- és sűrűségfüggvények, momentumok) jellemezhető. Ezt aleatorikus bizonytalanságnak hívják. Másfelől az adott jelenségre, veszélyre, annak törvényszerűségeire vonatkozó, ismereteink hiányosak, következésképp annak modellezésére nem rendelkezünk pontos, ellenőrizhető módszerekkel, a kísérleti ellenőrzés lehetősége korlátozott, az ellenőrzés lényegében csak post-event lehetséges, ezért jelentős szerepe van a szakértői vélekedésnek, így több egymásnak akár ellentmondó hipotézis is létezhet. Ezt episztemikus bizonytalanságnak nevezzük. Ez a bizonytalanság általánosságban az adott jelenségre vonatkozó ismereteink tökéletlenségét jelenti.

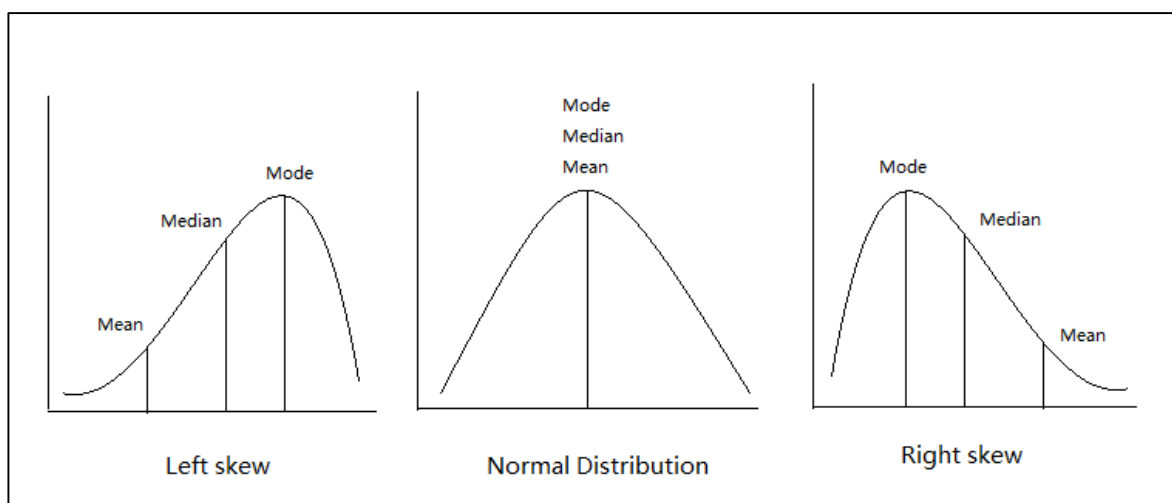
Az általános mérnöki gyakorlatban a bizonytalanságot konzervatív módon kezelik. A közös európai építési-tervezési szabványok a parciális biztonsági tényező mértezési eljárást alkalmazzák. Ez azt jelenti, hogy a bizonytalansággal rendelkező hatáshoz növelő, a határesetet kifejező jellemzőhöz (például szakítószilárdság) csökkentő tényezőt rendelünk. Ez azt jelenti, hogy például a tervezésnél figyelembe vett terhek, amelyek a tervezés alapjába tartozó események, veszélyek hatására érik a tartó vagy nyomástartó szerkezetet, karakterisztikus értékét az 5% felülmaradási kvantilissel határozzák meg (95% konfidenciával), s ebből egy biztonsági tényezővel megszorozva még származik a tervezési vagy mértékadó érték.

Az ilyen eljárás a telehelyi veszélyek jellemzésénél irracionális túlmértekezést eredményezhet, következésképp a tervezési alap meghatározásánál a bizonytalanságok szisztematikus elemzésére és figyelembe vételére van szükség. A bizonytalanság kezelésére speciális módszerek léteznek, mint például a földrengés veszély meghatározásánál a logikai fa alkalmazásával kezelhető az modellezésből és az adatok többféle értelmezéséből származó episztemikus bizonytalanság, míg az adatok véletlen jellegéből származó például Monte-Carlo szimulációval [14]. Ezeket a módszereket a 16. fejezetben a földrengés-veszély elemzése példáján mutatjuk be.

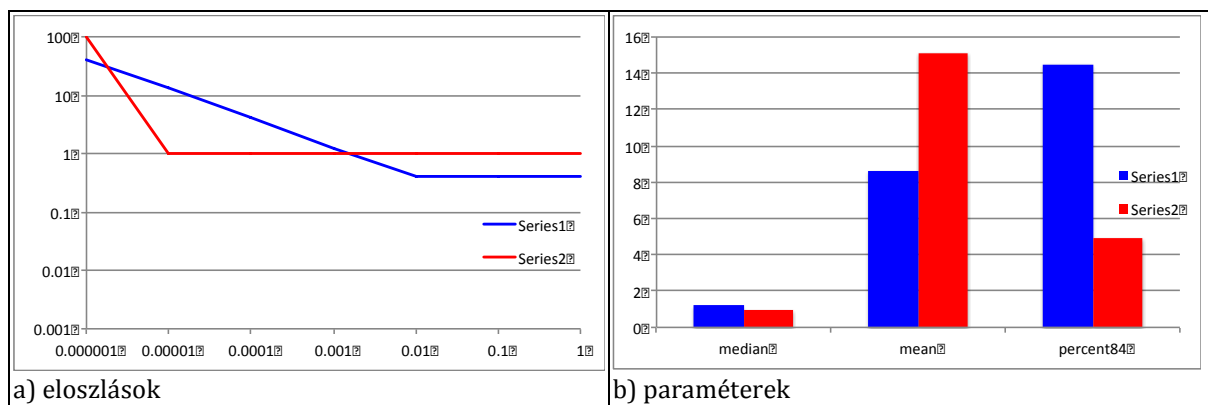
A karakterisztikus érték szokványos meghatározása sem lehet mindig követhető. Az átlagérték és a medián egy normál eloszlásnál azonos, s a 84%-os percentilis egy ésszerű konzervatív felülbecslésként fogható fel (5. ábra). Lognormális eloszlásra is lényegében ugyanez érvényes. A külső veszélyek esetén nem zárható ki a kis valószínűséggel bekövetkező rendkívüli értékek, amelyek miatt a sűrűségfüggvény erőteljesen ferdevé válik. Az erősen ferde eloszlások esetén az átlag és a medián viszonya eltérő (6. ábra). Ezt illusztrálja a 7. ábra.



5. ábra A normáloszlás jellemzői



6. ábra Az eloszlások típusai és a paraméterek egymáshoz való viszonya



7. ábra Az átlag, medián és a 84% percentilis viszonya különböző eloszlásoknál

12. A VESZÉLYEK KEZELÉSE A TÖBB-BLOKKOS TELEPHELYEK ESETÉN

A külső és belső veszélyeket külön értékelni kell a több-blokkos erőművek esetében. Így a külső veszélyek közül a telephelyet érinti, így minden blokkra egyidejűleg hatással van (3a.2.2.5500.) és közös okú meghibásodásokat okoz (3a.2.2.5600.):

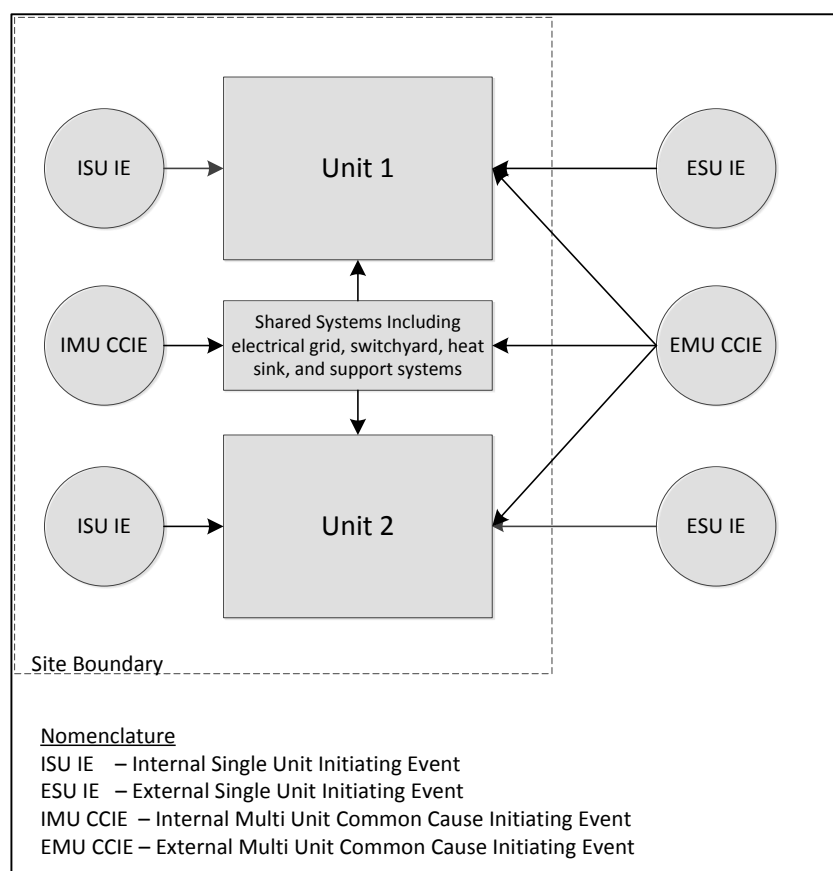
- földrengés,
- meteorológiai szélsőségek, extrém szél, extrém hőmérsékletek, csapadék, tornádó,
- az alállomást és a hálózatot érintő veszélyek, amelyek teljes feszültségkiesést eredményeznek.

Egyes, nem a teljes telephelyet érő veszélyek is okozhatnak több blokkot érintő hatásokat, ha ezek a hatások egyszerre több blokk térben nem elhatárolt, vagy rendszertechnikailag nem szeparált rendszereit érinthetik (3a.2.2.5700.). Az egy-egy blokkon bekövetkező belső események is okozhatnak veszélyt a szomszédos blokkokon, ha a térbeli elválasztás nem megfelelő.

A két blokk minden szerkezetére, rendszerére ható külső, illetve csak egy-egy blokkra ható külső vagy belső események logikai rendszerét illusztrálja a 8. ábra NAÜ most készülő EXTERNAL EVENT SITE SAFETY EVALUATION (EE-SSE) dokumentuma alapján [15].

Az NBSZ 3a számos több-blokkos atomerőműre vonatkozó biztonsági kritériumot tartalmaz. Ezek lényeges, de általános, verbális követelmények, amelyek a blokkok egymástól való indokolt mértékű függetlenségét (3a.2.1.3100.) írják elő, ám az indokolt mértéket nem specifikálják.

A telephelyet érintő, illetve több blokkra ható veszélyek esetén vizsgálni kell, hogy az üzemzavar/baleset elhárítás elegendő eszközzel és szakemberrel rendelkezik-e a több blokkon kialakuló rendellenes helyzet kezelésére.



8. ábra Kétflokkos atomerőmű esetén a külső és belső eseményeinek logikai kapcsolatai

A külső veszélyek értékelésénél, kétblokkos erőművet véve, az alábbi logika követhető:

Legyen például a teljes feszültségkiesés valószínűsége egy blokk esetében $F_{singl,LOP}$ technológiai hiba miatt, a telephelyet ért hatás miatt pedig $F_{ext,LOP}$, akkor nyilvánvaló, hogy a teljes feszültségkiesés valószínűsége az alábbi lesz:

$$F_{site\ LOP} = F_{ext,LOP} + 2F_{singl,LOP} \quad (4)$$

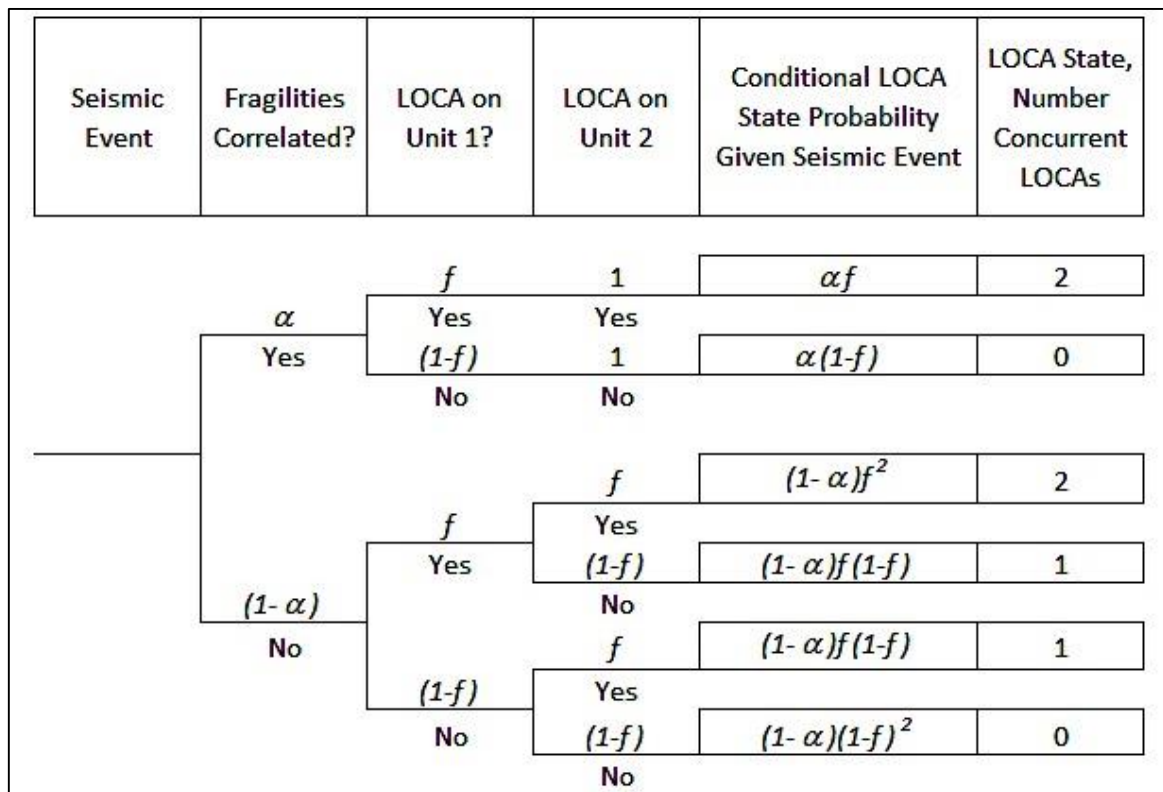
Tekintsük például földrengés következtében a LOCA bekövetkezésének gyakoriságát egy kétblokkos erőműben (9. ábra). A lehetséges kimenetek:

$$f_{k,LOCA_0} = \alpha(1 - f_k) + (1 - \alpha)(1 - f_k)^2 \quad (5)$$

$$f_{k,LOCA_1} = 2(1 - \alpha)(1 - f_k) \quad (6)$$

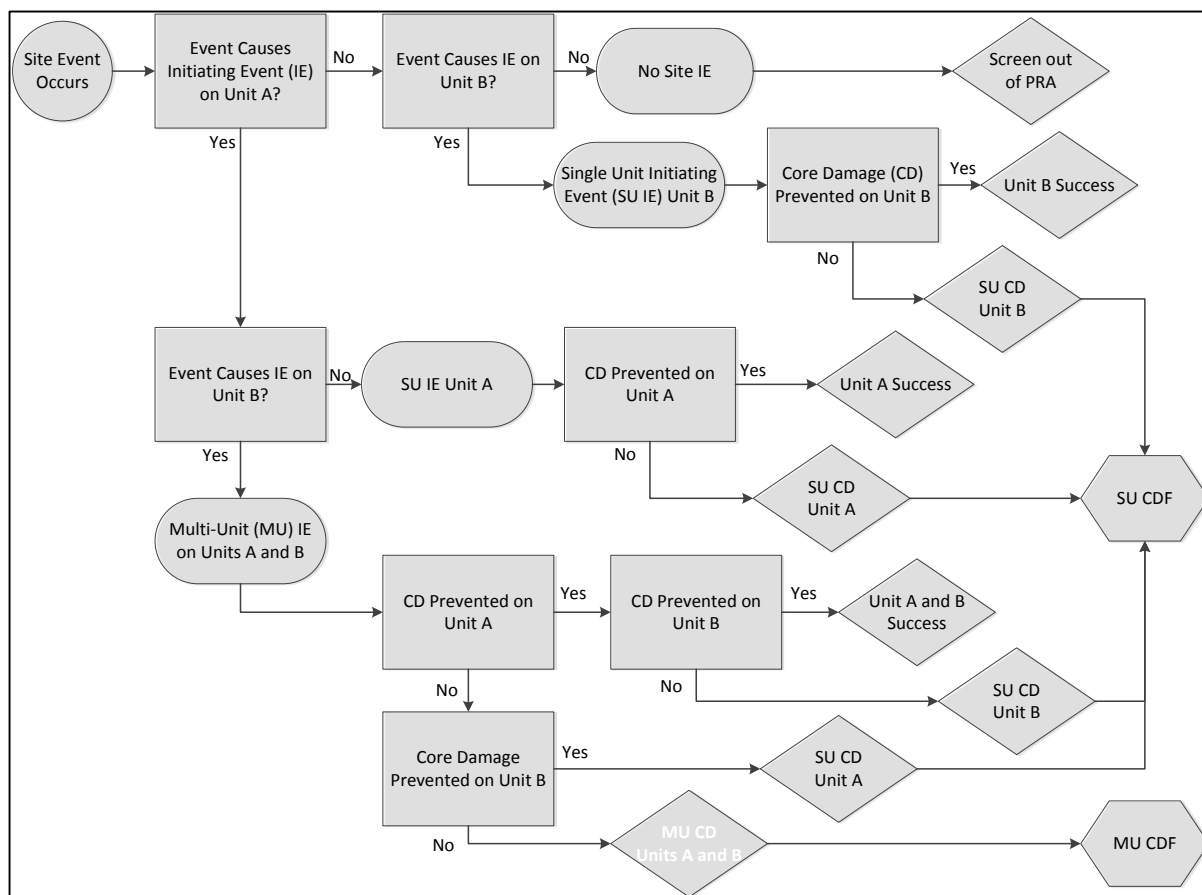
$$f_{k,LOCA_2} = \alpha f_k + (1 - \alpha)f_k^2 \quad (7)$$

ahol f_k az LB LOCA valószínűsége adott k PGA szintnél, az α pedig a szeizmikus közös okú hiba a két blokkra.



9. ábra Kétblokkos atomerőmű blokk-szintű eseményfája LOCA-t feltételezve

A külső esemény teljes esemény-diagramját két blokkra a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra Egy külső hatás eseményfája két blokkos telephelyen [15]

Nem gyakori esetnek számít, amikor egy telephelyen több, független nukleáris létesítmény is található. Ilyen a paksi telephely is, ahol új atomerőmű létesül, amely mintegy tíz évig együtt üzemel majd a régi atomerőművel és a kiégett üzemanyag átmeneti tárolójával.

13. TÖBB LÉTESÍTMÉNYNEK HELYET ADÓ TELEPHELY

Ez lényegileg eltér a fenn taglalt több-blokkos erőmű esetétől, mert nincs technológiai kapcsolat a létesítmények között. Ebben az esetben az új létesítmény szempontjából a meglévők külső ipari objektumok, amelyek hagyományos (nem nukleáris) balesetei (robbanás, tűz, toxikus gázfelhő, stb.) veszélyeztethetik az új létesítményt. Ezen veszélyek hatásait figyelembe kell venni a tervezésnél, hacsak a veszély gyakorisága nem kisebb, mint a 10^{-7} /év valószínűségi szűrés szint, vagy távolsági alapon ki nem szűrhetők. Tudott dolog, ahogy az NBSZ 3 3.2.4.0900.262 bekezdésében szerepel, a nagy vagy korai kibocsátással járó súlyos baleseti eseményláncok összegzett gyakorisága, minden kiinduló üzemiállapotra és hatásra összegezve – kivéve a szabotázs esetét, valamint a földrengést – nem haladhatja meg a 10^{-5} /év értéket, de minden ésszerű átalakítás, beavatkozás alkalmazásával közelíteni kell a 10^{-6} /év értékhez. Ez azt jelenti, hogy a Paksi Atomerőmű 1-4 blokk korai, nagy kibocsátással járó balesetei nem szűrhetők ki az új blokkok tervezési alapjából, kivéve, ha a hatás távolsági eleven kiszűrhető. Különös eset a földrengés, ami az egész telephelyet érinti és vezethet súlyos eseményláncokhoz minden létesítményben.

14. A BALESET-KEZELÉS ESZKÖZEINEK TERVEZÉSI ALAPJA

Valójában a tervezés kiterjed a súlyos balesetekre is, s nem csak a baleset-kezelés eljárásait tekintve, hanem műszaki megoldások vonatkozásában is. Ilyenek például a zónaolvadék-felfogására és hűtésére alkalmazott műszaki megoldások, illetve a zóna, a reaktortartály és a pihentető medence hűtésére szolgáló (előre megtervezett) „provizórikus” hűtővíz és energia-ellátó eszközök és csatlakozási pontjaik. Ezek tervezési alapját, hasonlóan a tervezési alap kiterjesztést képező komplex üzemzavarok kezelésére szolgáló rendszerekhez, rendszerelemekhez a funkcionális követelmények, a súlyos baleset körülményei és egyedi – elemzésekből, tesztekéből levezetett – karakterisztikus értékek, paraméter intervallumok adják.

A tervezés egyedi specifikációk alapján történik, amelyek általában módosítják vagy helyettesítik a szabványok igénybevételekre és ellenállásra vonatkozó előírásait. Nagyon leegyszerűsítve a dolgot, bármilyen műszaki eszköz vagy megoldás jó, ha betölti a balesetkezelési, következmény-csökkentő funkcióját, mégha a folyamat, igénybevétel hatására maga az eszköz teljes mértékben tönkremegy. Így az eszközök tervezésénél a megfelelőség kritériumai legritkább esetben lehetnek valamely szabvány megengedett értékei.

15. A KOCKÁZAT SZERINTI SZERINTI DIFFERENCIÁLÁS

A tervezési alap és kiterjesztésének meghatározásánál célszerű különbséget tenni a nukleáris létesítmények között, azok potenciális kockázata szerint. Ez a biztonság vagy a potenciális kockázat szerinti fokozatosság vagy differenciálás elvének alkalmazása az adott területen. A potenciális kockázat megítélhető a reaktor termikus teljesítménye, a tárolt aktivitás mennyisége szerint, illetve 2. vagy 3. szintű PSA elemzéssel. A potenciális kockázat szerint minőségi kategorizálásnak megfelelően kell meghatározni a veszélyek tervezési alapba tartozásának valószínűségi kritériumát, ahogy az a 9. táblázatban látható a magyar szabályozás szerint (OAH, 2012).

9. táblázat A tervezési alapba tartozó veszélyek a létesítmény potenciális kockázata szerint

A létesítmény		A tervezési alapba tartozó külső természeti hatás meghaladási valószínűsége a teljes üzemidőre
Atomerőmű (és speciális kísérleti reaktor*)		0,005
Kiegészítő üzemanyag átmeneti tárolója		0,005
Kutató, oktató reaktor; hőteljesítmény MW	1-10	0,05
	0,1-1	0,05
	≤0,1	0,1

* például nagynyomású kísérleti hurok magában foglaló kutató reaktor

Egy létesítményen belül, a különböző szerkezetek, rendszerek, és komponensek hozzájárulása az adott létesítmény biztonságához jelentősen eltérő, ami kifejeződik a biztonsági osztályba sorolásban.

II. rész A természeti veszélyek

16. FÖLDRENGÉS-VESZÉLY

Az elmúlt évtizedekben jelentős műszaki fejlődés és módszertani változás következett be a nukleáris létesítmények földrengéskockázatának meghatározása terén. A veszélyeztetettség elemzésében, értékelésében meglévő bizonytalanságok adekvát kezelését a mértékadó szabályozási rendszerekben megkövetelik (lásd US NRC 10CFR100.23 [2]). Ezért egyre nagyobb teret nyert a veszélyeztetettség valószínűségi módszerrel való meghatározása a determinisztikus helyett, ahogy ezt a paradigma-váltást a NAÜ, a tárgyban egymást váltva kiadott NG-G-3.3 [16] SSG-9 [1] dokumentumai is bizonyítják.

A földrengésveszély meghatározásának valószínűségi módszere jól kezeli a bizonytalanságokat, melyek az egész eljárást végigkísérik. A földrengést létrehozó folyamatok inherens véletlenszerűsége mellett kardinális fontosságú lett a modellezés bizonytalanságának, a tudáshiányból fakadó, episztemikus bizonytalanságnak figyelembe vétele és integrálása az elemzésben. A tudáshiányból eredő bizonytalanság, a különböző lehetséges szeizmológiai és szeizmotektonikai modellek kezelésére a logikai fa struktúra terjedt el.

Ebben a folyamatban mérőföldkőnek tekinthető az 1997-ben megjelent NUREG/CR-6372 [17], aminek az alapját képező vizsgálatokat az motiválta, hogy a földrengés-veszély valószínűségi alapon történő meghatározására szolgáló metodikák azonos területre konzekvensen eltérő veszélyeztetettséget produkáltak. Sem az iparág, sem a hatóság nem tekintette elfogadhatónak, hogy kompetens szakemberek, azonos tudásbázison, szignifikánsan eltérő eredményre juthatnak. A NUREG/CR-6372 lényegében a veszélyeztetettség vizsgálatában meglévő módszertani eltéréseket rendezi, s az elemzések négy progresszív szintjét definiálja. A szintek a felhasznált információ-források teljességét, az elemzés komplexitását, de leginkább a diverz szakértői vélemények szisztematikus integrálását, annak módját, a szakmai közösség konszenzusának teljességét minősítik. Ennek legfelső fokát jelenti a négyes szintű PSHA, amely leglényegesebb, az alatta lévő szintektől eltérő eleme, s egyben gyengéje és erőssége is, a szakértői vélemények tudományos módszerrel történő integrálása. A módszertant a NUREG/CR-6728 [18] dokumentum teszi teljessé, amely a veszélyeztetettség elemzésével azonos módon kezeli a telephelyi választ és ad útmutatást a tervezés alapját képező biztonsági földrengés (SSE) válaszspektrumának meghatározásához. A SSHAC módszert az USA-ban, a maga teljességében (4. szint) eddig csak a Yucca Mountain nagyaktivitású radioaktív hulladéktároló telephelyvizsgálatánál alkalmazták. A fukushimai baleset nyomán módszertani és alkalmazás-fejlesztés indul az USA-ban [19]. A SSHAC metodikát, illetve annak negyedik szintjét Európában a svájci atomerőmű telephelyek újraértékelésénél alkalmazták a földrengés PSA alapját képező veszélyeztetettségi görbe előállítására céljából. A projekt mind a négy svájci telephelyre olyan veszélyeztetettségi görbét eredményezett, amely felülmúlta a korábban a földrengés PSA-ban alkalmazottat, s amely alkalmazásával a földrengés PSA eredménye uralja a zónaolvasás valószínűségét (lásd például [20]).

A tudományos fejlődés és módszertani haladás tükröződik a NAÜ e tárgyra vonatkozó dokumentumaiban is. Az 1979-ben kiadott 50-SG-S1 még teljes egészében a determinisztikus módszerre épült. A 2002-ben kiadott NS-G-3.3 jelzetű NAÜ irányelv már részletesebben foglalkozik a valószínűségi módszer ismertetésével, nagyobb figyelmet szentel a bizonytalanságok meghatározásának és a szeizmológiai adatbázis (mikroszeizmikus monitorozás, paleoszeizmológiai vizsgálatok) minél teljesebb körű összeállításának. Ez a tendencia egyértelműen manifesztálódik a NAÜ SSG-9 jelű dokumentumban, amely az NS-G-3.3 irányelvet váltotta fel.

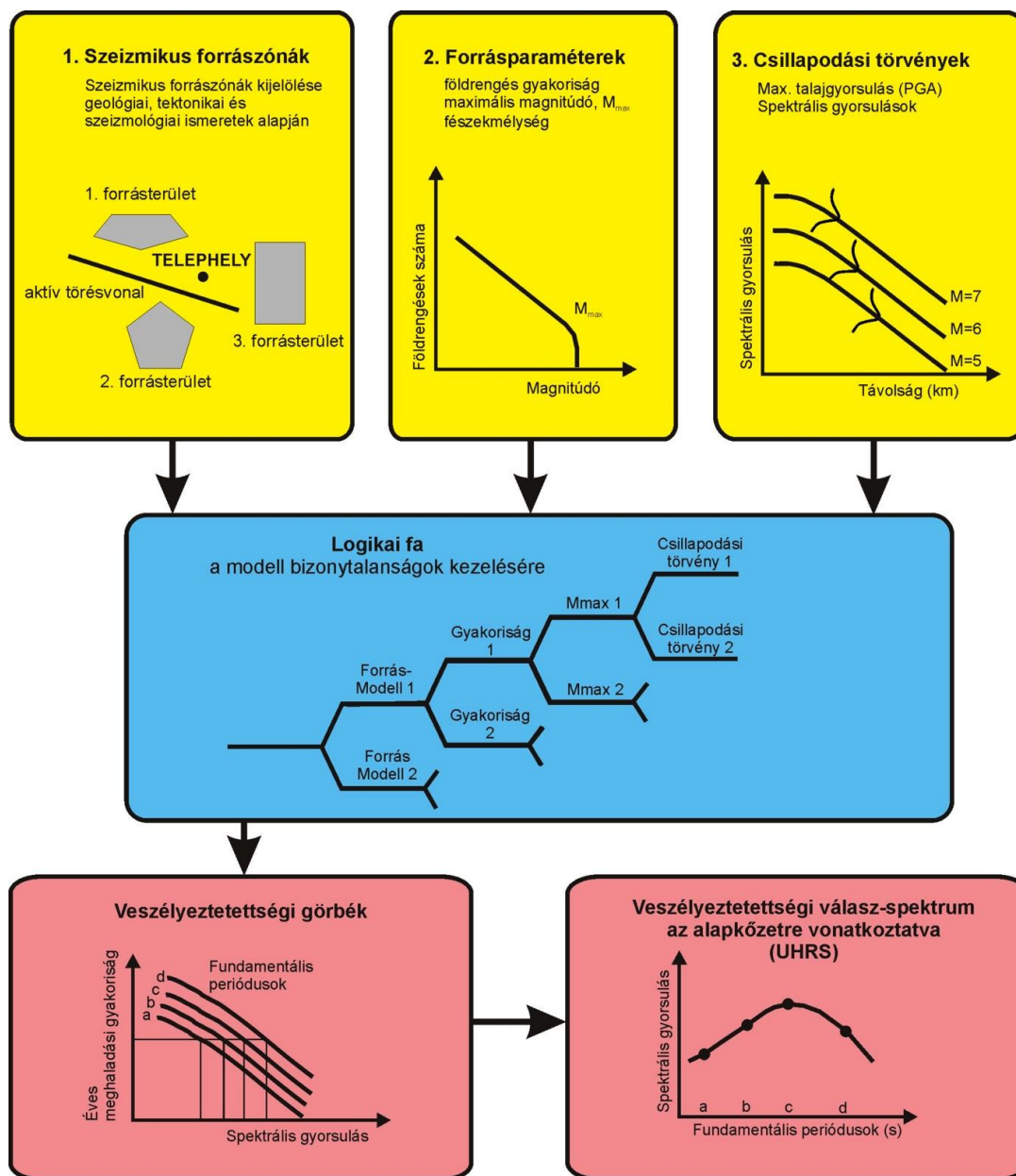
Az NBSZ 7. kötetének tárgyi fejezetei a NAÜ SSG-9 [1] alapján, s az US NRC tárgyi Regulatory Guide-jai, különösen pedig a Regulatory Guide 1.208 [21] alapján készült.

16.1. A FÖLDRENGÉS-VESZÉLY JELLEMZŐI AZ ALAPKÖZETEN

A földrengésveszély meghatározásának valószínűségi módszere öt alapvető lépésből áll (lásd például [22] és [23]):

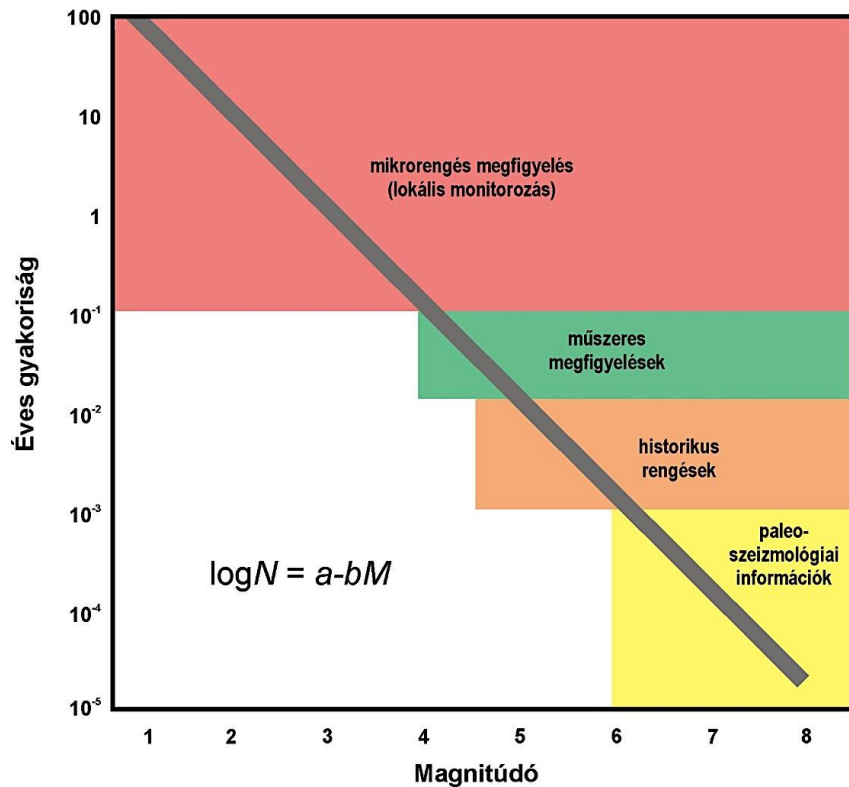
1. lépés: szeizmikus források, forrásterületek kijelölése
2. lépés: szeizmikus források aktivitásának jellemzése
3. lépés: földrengés hatások távolság szerinti csillapodásának meghatározása
4. lépés: matematikai modell a földrengésveszély számításához
5. lépés: az eredmények megjelenítése, a bizonytalanságok kezelése

Az eljárás sémáját a 11. ábra mutatja be. Mindegyik lépés jelentős episztemikus és aleatorikus bizonytalansággal terhelt.



11. ábra A valószínűségi földrengés-veszély elemzés lépései

A forrásterületek kijelölése a szerizmitás és a tektonikai adatok ismeretében, igen sokféle megfigyelés (például feszültség- és mozgás-vizsgálat, mikroszeizmikus aktivitás) szintézisére épül. A megfigyelések bizonytalanságát jellemzi például a szeizmitás adatok érzékenysége: a $<10^{-3}/\text{év}$ tartományban a paleo-rengések, a $10^{-3}\div 10^{-2}/\text{év}$ tartományban a történelmi rengések, a $10^{-2}\div 10^{-1}/\text{év}$ tartományban a műszeresen megfigyelt rengések, a $>10^{-1}/\text{év}$ tartományban a telephely specifikus mikroszeizmikus monitorozás adatai állnak rendelkezésre, ahogy azt a 12. ábra mutatja.



12. ábra Az észlelt földrengések mérete és gyakorisága

Földrengés forrása lehet ismert vagy feltételezett vető, vagy egy terület. Azonos adatbázison többféle interpretáció létezhet. Erre példát 13. ábra mutat a Pannon medencére (lásd [22] és [24]). A legfrissebb, Europa szintű zónatérképeket (14. ábrát) az EU SHARE projekt keretében dolgozták ki (<http://www.efehr.org:8080/jetspeed/portal/hazard.psm1>).

A forrásterület távolsága a telephelytől, valamint a törési felület és a létrejövő földrengés magnitúdójának viszonya meghatározza a földrengések távolságtól (r) és magnitúdótól (m) függő feltételes valószínűségi eloszlás függvényét: $f_{R(i)M(i)}(r;m)$.

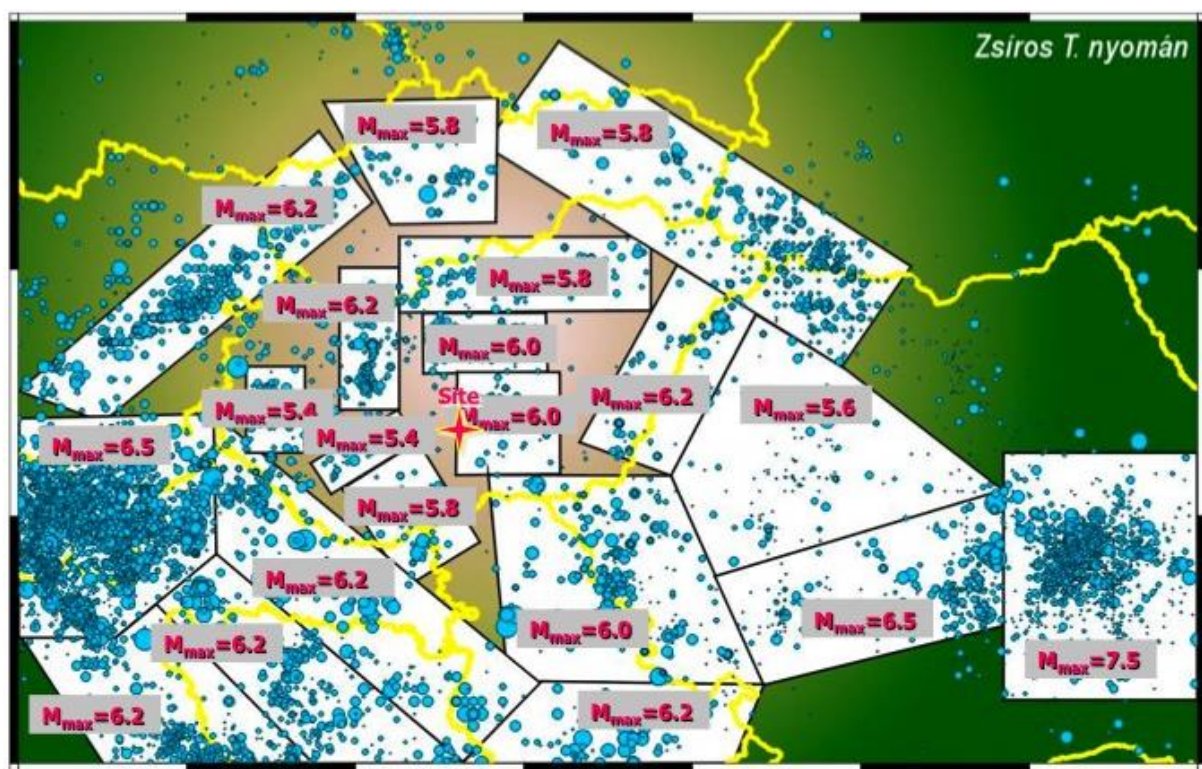
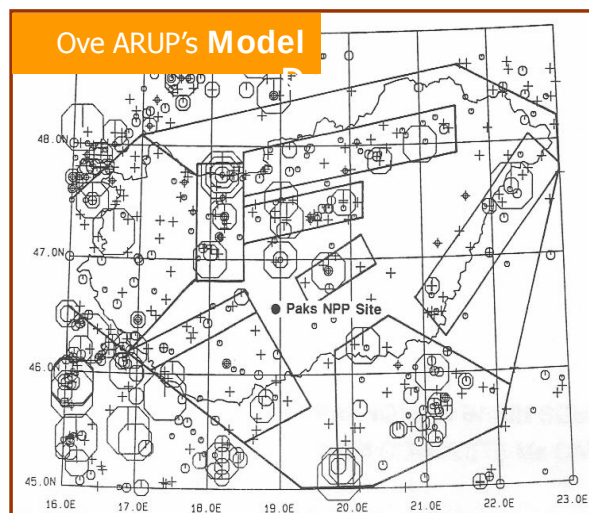
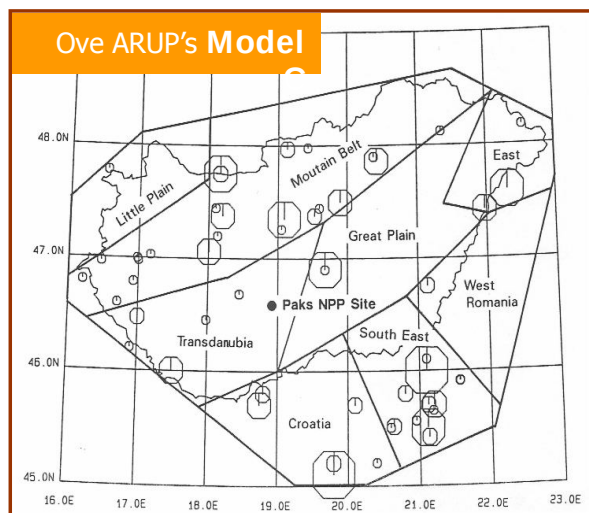
A szeizmikus források aktivitását meg kell határozni, azaz az átlagos, éves földrengés gyakoriságot (v_i), valamint ennek magnitúdótól függő $f_{M(i)}(m)$ eloszlását. Azt is meg kell adni, hogy az egyes forrásokban milyen maximális magnitúdójú rengés keletkezhet, ahogy azt a 13. ábra alsó részlete is mutatja.

A 3. lépésben olyan egyenletet, vagy algoritmust kell megadni, amely a földrengés hatás A amplitúdójának (például csúcsgyorsulás, spektrális gyorsulás) távolság szerinti gyengülését határozza meg, adott m magnitúdójú rengés esetén. A csillapodási egyenlet annak valószínűségét adja meg, hogy A nagyobb, mint a^* , adott magnitúdó (M) és távolság (R) esetében, azaz $G_{A|M,R}(a^*; m, r) = P[A > a^* | m, r]$.

A modell, amely megadja, hogy a kérdéses telephelyen milyen éves valószínűséggel haladja meg a talajmozgás amplitúdója a^* -ot a következő (lásd a (8) egyenletet):

$$H(a^*) = \sum_i v_i \int_r \int_m G_{A|M,R}(a^*; m, r) f_{M(i)}(m) f_{R(i)M(i)}(r, m) dm dr \quad (8)$$

ahol a $H(a^*)$ az olyan földrengések éves száma, az összes i forrásra összegezve, amely a telephelyen $A > a^*$ amplitúdójú talajmozgást hoz létre. A magnitúdó szerinti integrálás az adott zónára becsült maximális magnitúdóig történik. Az elmélet arra épül, hogy a rengések méretben és térben független események, s időben Poisson folyamatok, bár ez utóbbi nem szigorú feltétel.



13. ábra Forrásterület modellek a Pannon medencére

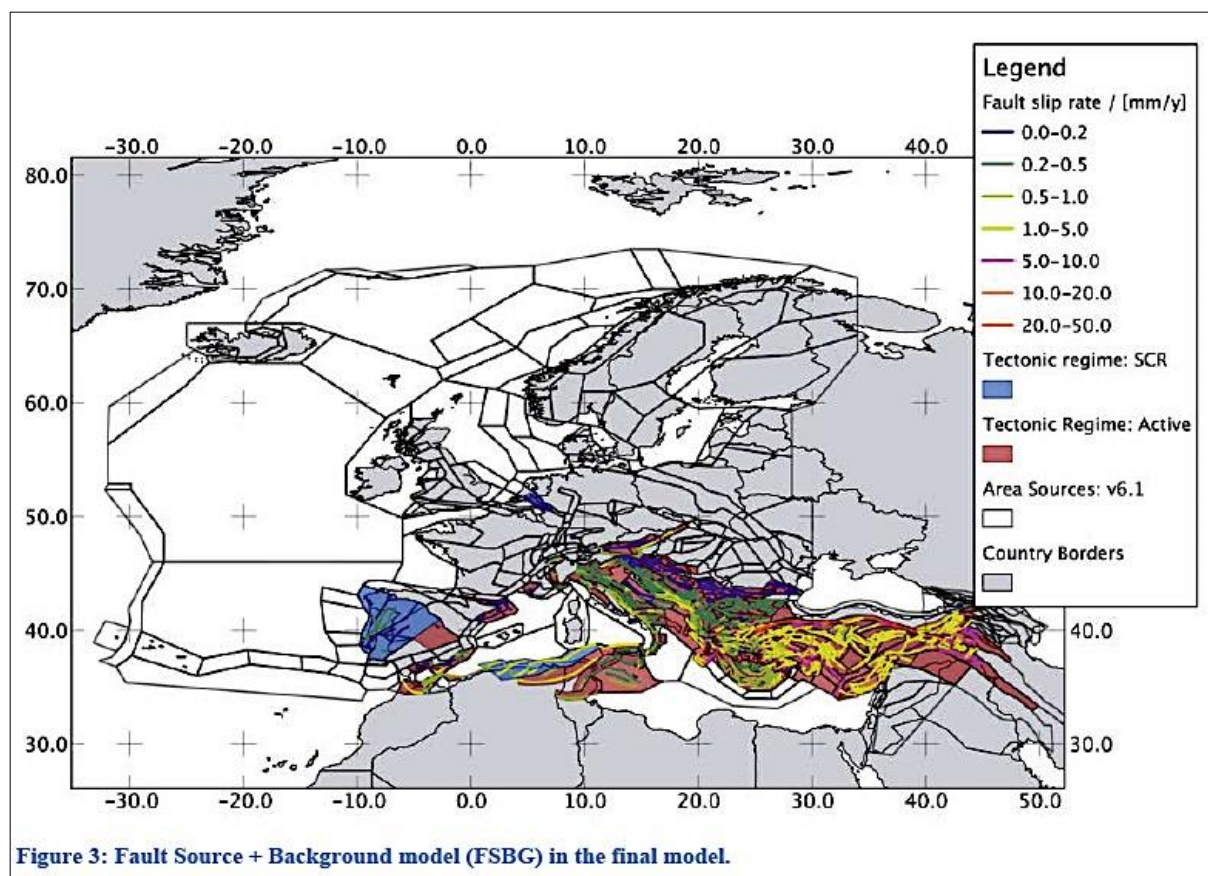
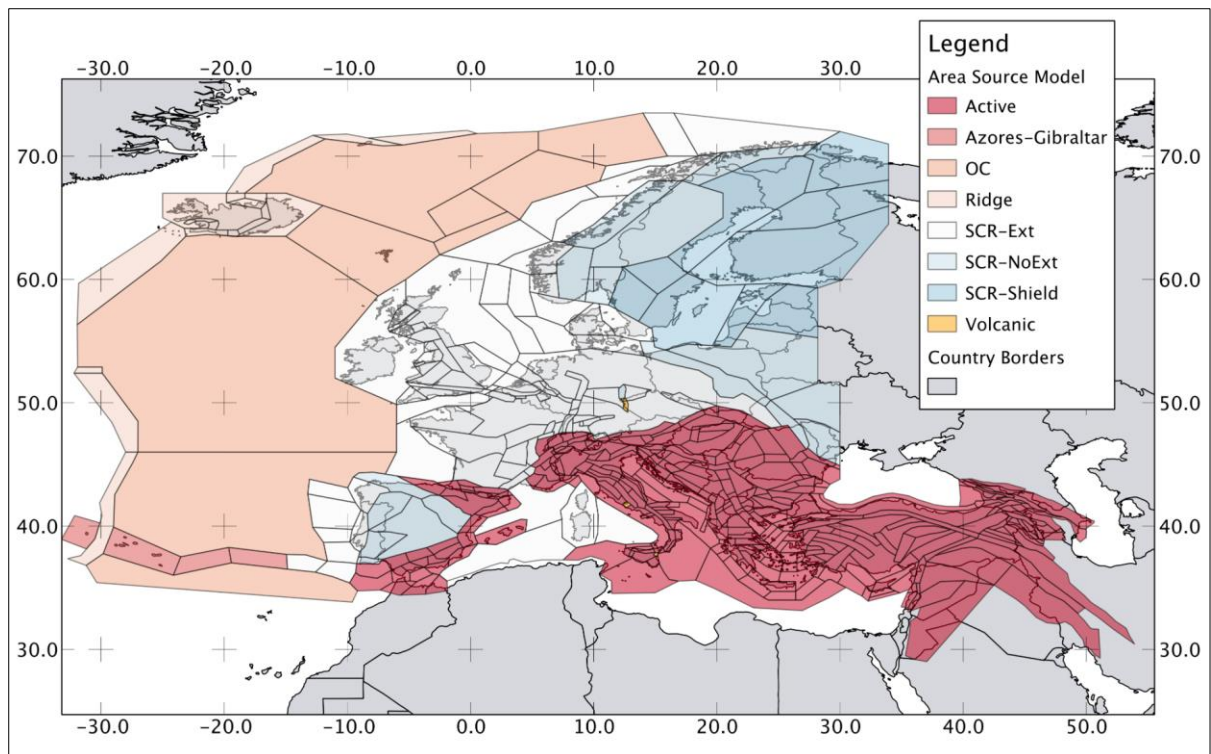
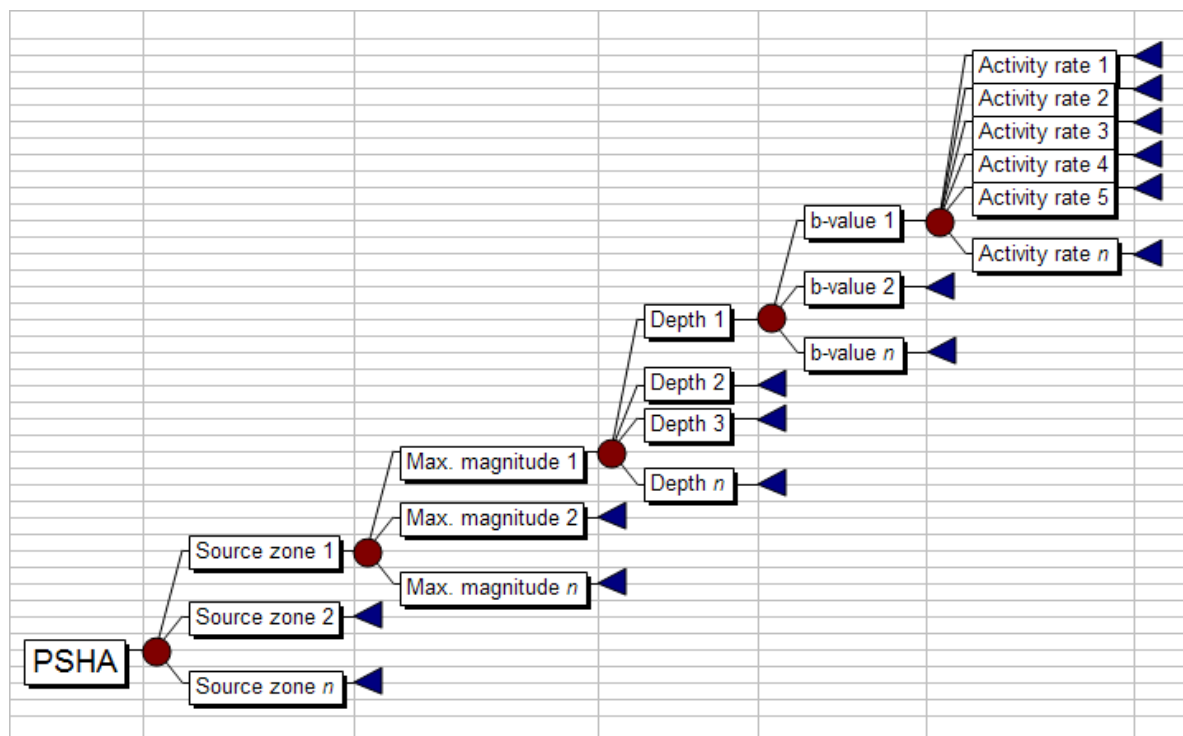


Figure 3: Fault Source + Background model (FSBG) in the final model.

A földrengés-veszélyt meghatározó természeti folyamatokról hiányos a tudásunk, a megfigyelések viszonylag rövid időt fednek le (tíz-húsz évszázad historikus és egy évszázad műszeres adatgyűjtés), s nincs lehetőség kísérleti bizonyosságot szerezni. Így hiányosak az ismereteink az eljárás mindhárom inputját illetően:

- a törésekről, vetőkről szerzett tudásunk nem teljes, a geológiai szerkezetek szeizmogenikus potenciáljának megítélése nem egyértelmű, következésképp a szeizmotektonikus modellezés több lehetséges eredményre is vezethet;
- a földrengés gyakoriság modell sem egyértelmű, a gyakoriság-eloszlás paramétereire és a maximális magnitúdóra, azonos megfigyelések alapján több értéket is fel lehet venni;
- a földrengés hatásának távolság szerinti csillapodási függvénye konkrét megfigyelések statisztikus feldolgozásán alapul, de a mintaszám lehet igen kicsi az olyan területeken, ahol kevés az erős rengés, s az adott – sokszor pontatlanul ismert – terjedési feltételek és távolságok mellett meghatározott csillapítási függvényeket kell egy, esetleg e terjedési feltételektől, távolságoktól eltérő terjedésre, illetve közegre alkalmazni.

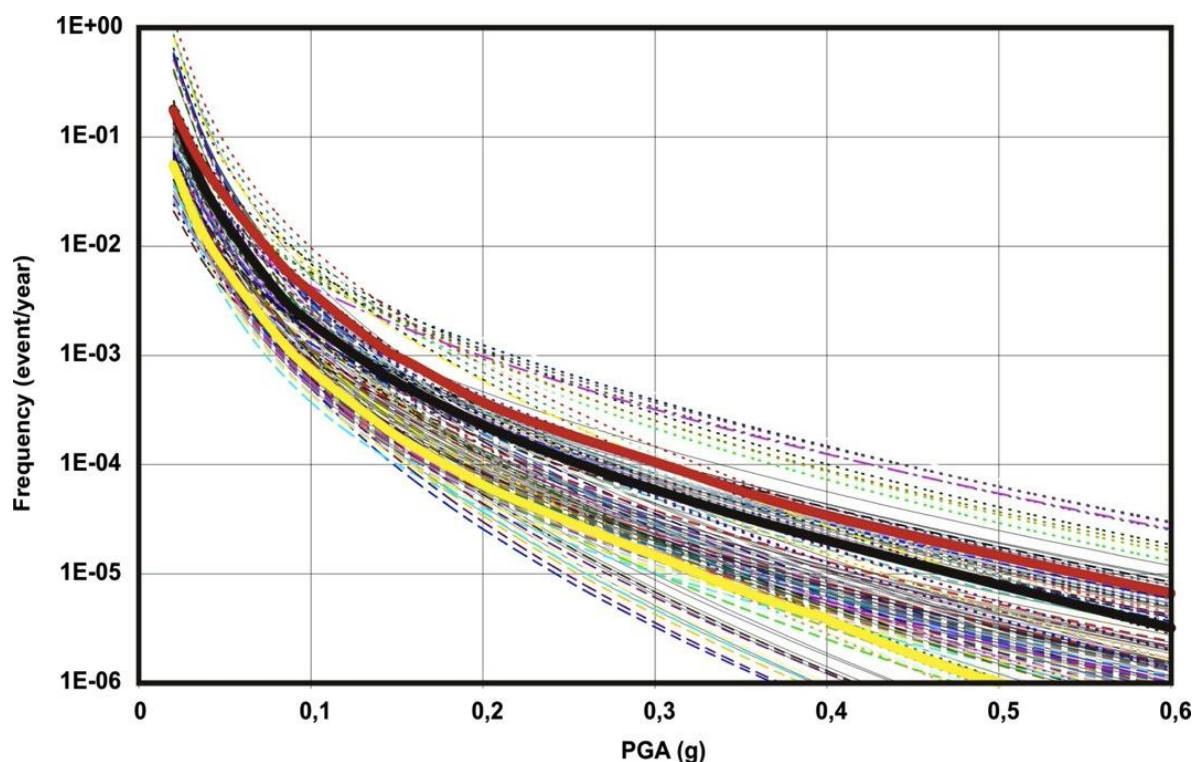
A tudáshiányból fakadóan az input modellek, feltételek és lehetséges értékek egész sora létezhet szakértők, iskolák felfogásától, szakmai konvencióktól függően. A különböző lehetséges szeizmológiai és szeizmotektonikai modellek kezelésére szolgál a logikai fa. A logikai fának annyi ága van, ahány forrászóna-modell létezik. Az elágazástól jobbra a forrászóna jellemzői vannak, olyan sorrendben, ahogy azok egymástól függenek. Például, ha a legnagyobb magnitúdó becslése a forrászóna kijelöléstől jobbra helyezkedik el a logikai fán. Amennyiben az egyes jellemzőkre többféle modell is létezik, azok szerint újabb elágazások vannak. Az egyes ágakhoz szakértői becslés alapján egy relatív súlyt rendelünk, amely az adott opció plauzibilitásának mértéke. Elágazásokkal leképezhető például, ha az eloszlások episztemikus bizonytalanságát intervallumokkal, p-dobozokkal modellezzük. A logikai fa felépítését a 15. ábra szemlélteti.



15. ábra Logikai fa a földrengés-veszély valószínűségi elemzéséhez

A logikai fa alkalmas arra is, hogy az aleatorikus bizonytalanságot figyelembe vegyük. Az egyes paraméterek eloszlását modellezhetjük a percentilisekkel, amelyek elágazásokat képeznek.

A számításokat a logikai fa minden lehetséges útvonalán végig kell futtatni. Az eredmény egy veszélyeztetettségű görbe sereg (16. ábra), melyben minden egyes görbéhez tartozik valamilyen, egynél kisebb súly. A fizikai folyamatok belső véletlenszerűségei a (8) egyenlet integrálása során egy veszélyeztetettségű görbében összegződnek. Az egyes útvonal legvégén kapott görbe súlya nem más, mint az útvonal menti ágak súlyainak (valószínűségeinek) szorzata. A földrengésveszélyt végül e görbesereg statisztikai jellemzőivel (mean, medián, percentilisek) adjuk meg. A mean és a medián görbék a számított meghaladási valószínűségek középértékét jelzik, míg a fraktálok és ezek eltérései az episztemikus bizonytalanság mértékét mutatják.



16. ábra A logikai fa egyes ágain kapott veszélyeztetettségű görbék

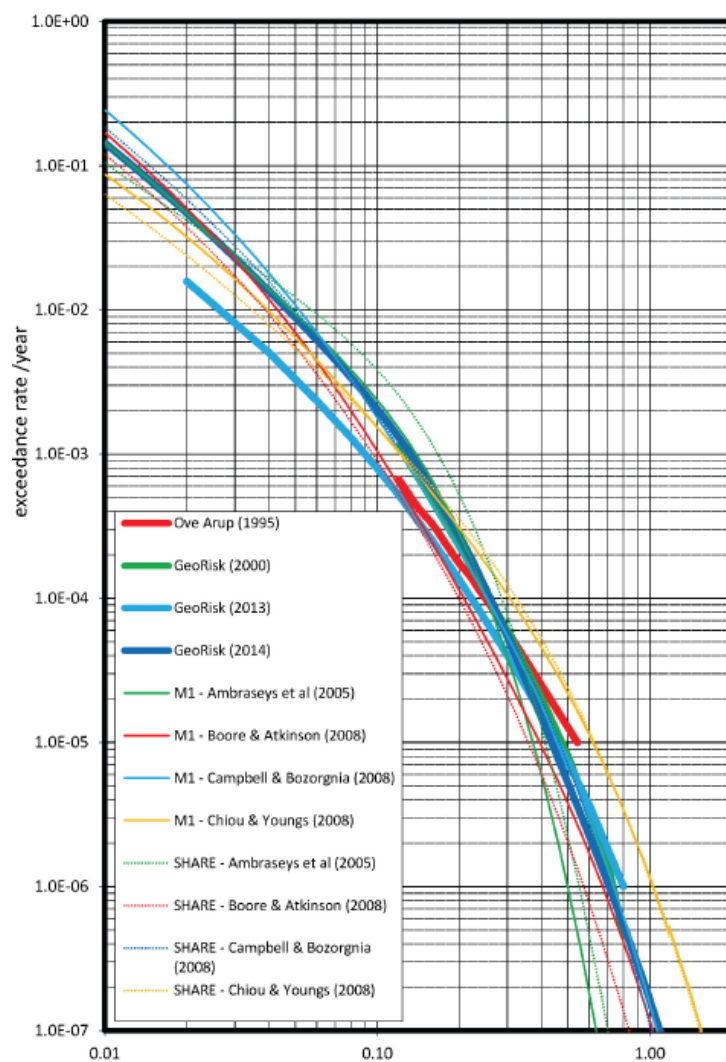
Az alkalmazási tapasztalatok néhány komoly tanulságra figyelmeztetnek, amelyet a szakirodalom igen intenzíven diszkutál (lásd például [20]; [25]÷[30]):

- az elérhető, megszerezhető empirikus ismereteket nem célszerű szakértői véleménnyel pótolni,
- a szakértői vélemények szintézisének módszerétől (expert elicitation módszerétől) jelentősen függ mind a veszélyeztetettség megítélése, mind pedig annak bizonytalansága,
- a szakértői vélemények szintézise és kezelése révén a telephelyi veszélyt megítélők felelőssége nem megállapítható, s nem is tiszta.

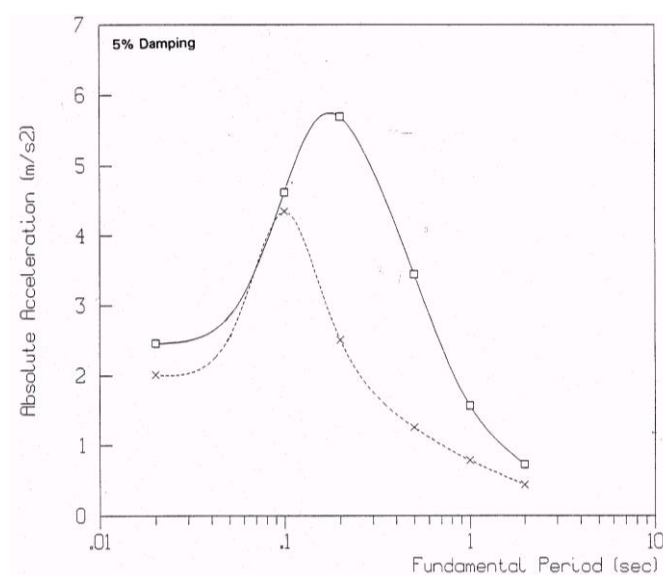
Az elemzés végeredménye a veszélyeztetettségű görbe és az Uniform-Hazard-Response-Spectra (UHRS), azaz olyan válaszspektrum, amelynek minden amplitúdó-értéke azonos meghaladási valószínűséggel jellemezhető.

A [31]÷[44] munkák képezik a paksi telephely földrengés-veszély értékelésének aktuális irodalmát.

Az 17. ábrán látható a paksi telephelyre a földrengés-veszélyeztetettségű görbe az aktuális ismeretek szerint, amelyet a most folyó telephelyvizsgálat eredményei alapján pontosítunk. A Paksi Atomerőmű tervezési alapját jelentő (alapköveti, ami esetünkben a Pannon felszín) UHRS a 18. ábrán látható.

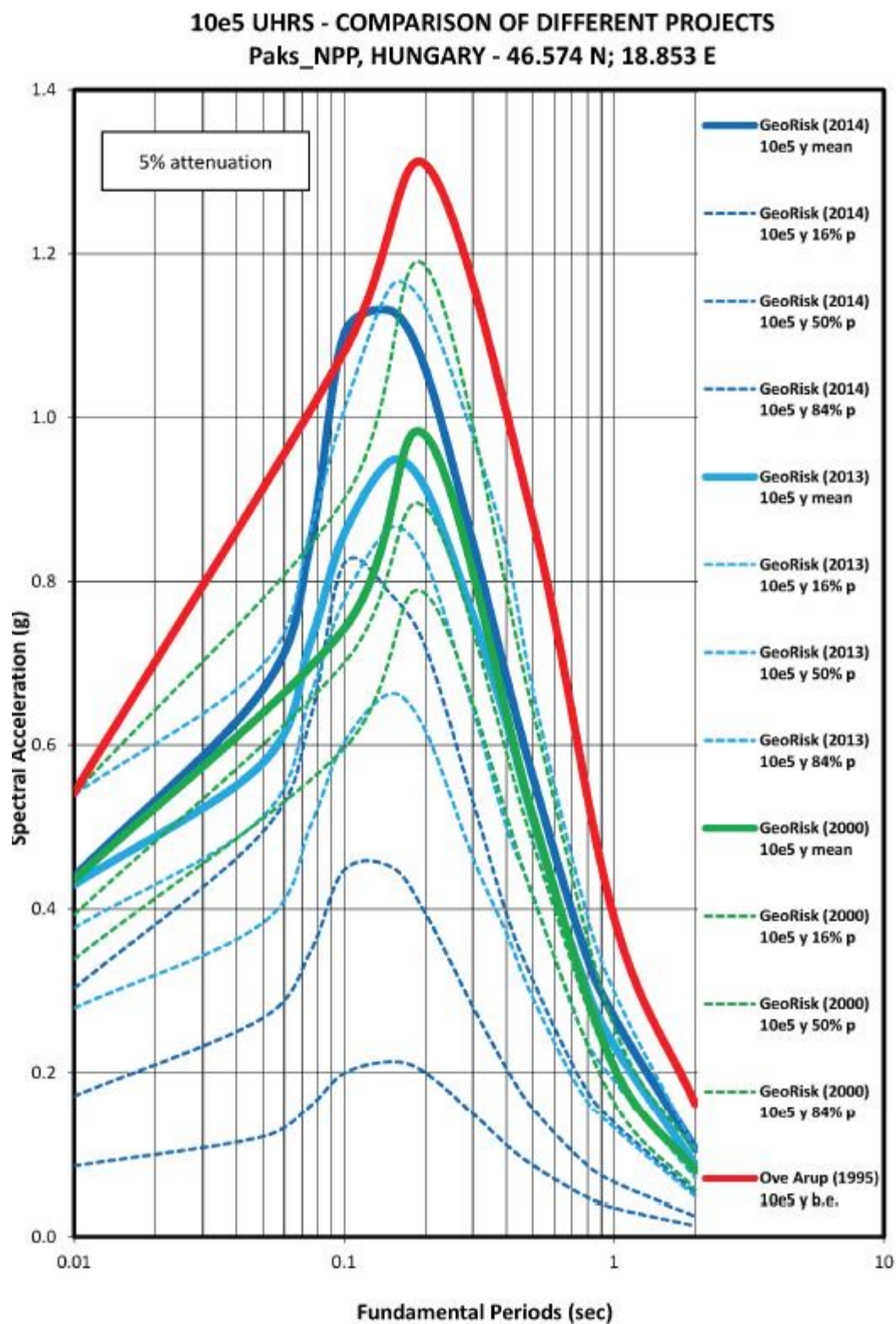


17. ábra Előzetes földrengés veszélyeztetettségi görbe a paksi telephelyre
(vízszintes tengelyen maximális vízszintes gyorsulás, g)



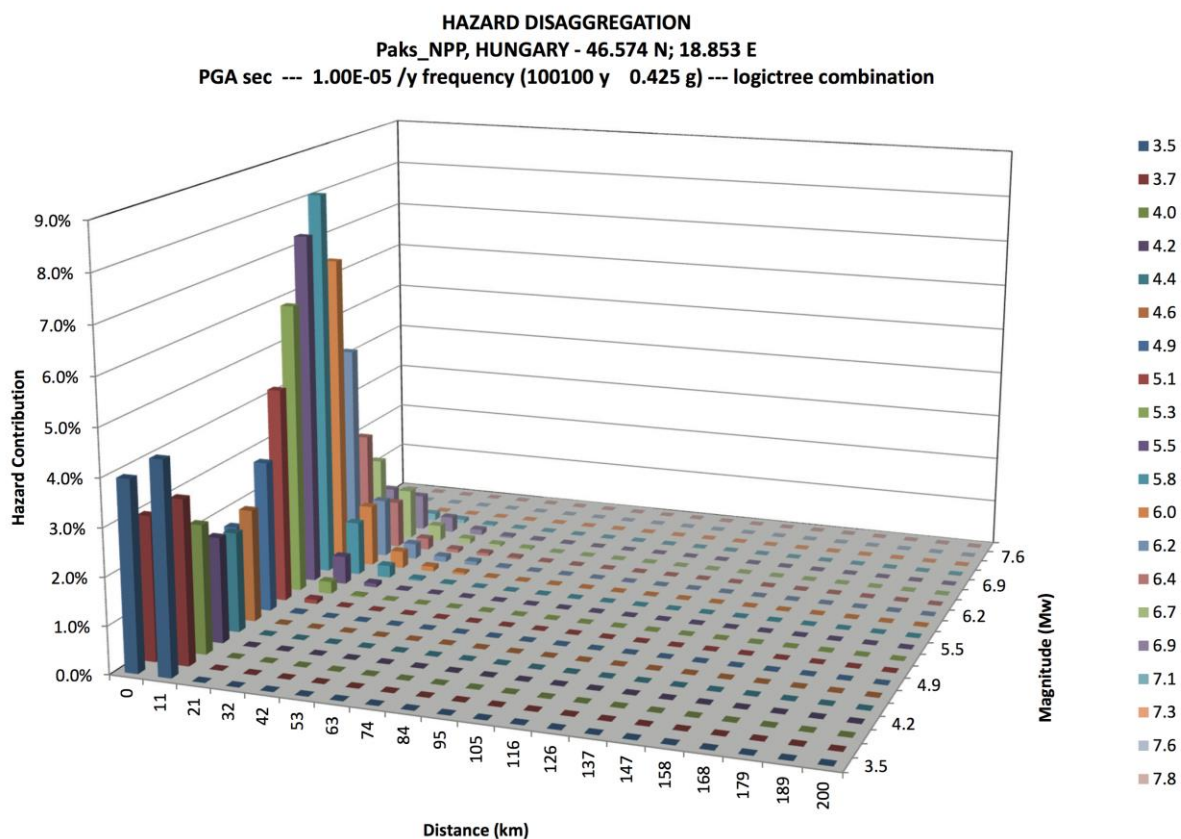
18. ábra Az 1995-ben meghatározott alapköveti vízszintes és függőleges UHRS

A 19. ábra a 10⁻⁵/év gyakoriságú és különböző konfidencia szinten meghatározott alapkőzeti válaszspektrumokat mutatja, amelyeket az 1995-től 2014 végéig kidolgozott modellek és metodikák szerint határoztak meg.



19. ábra Alapkőzeti válaszspektrumok a 10⁻⁵/év meghaladási gyakoriságnál

A valószínűségi földrengésveszély-elemzés fontos lépése annak vizsgálata, hogy milyen méretű és milyen távolságban keletkező rengések határozzák meg a telephely szeizmitását. Erre abban az esetben van szükség, ha valamely elemzés, mint például a talajfolyósodás-elemzés explicite magnitúdót igényel input adatként. Az eljárás, amivel a domináns kontributorokat meghatározzuk, a deaggregáció, amelyet adott meghaladási valószínűségi szinten a maximális vízszintes gyorsulásra vagy bármely spektrális gyorsulás-amplitúdóra el lehet végezni. Például a 10⁻⁵/év meghaladási gyakoriságnál vett maximális vízszintes gyorsulást alapvetően a ~6-os magnitúdójú ~10 km távolságban keletkező rengések alakítják ki (20. ábra).

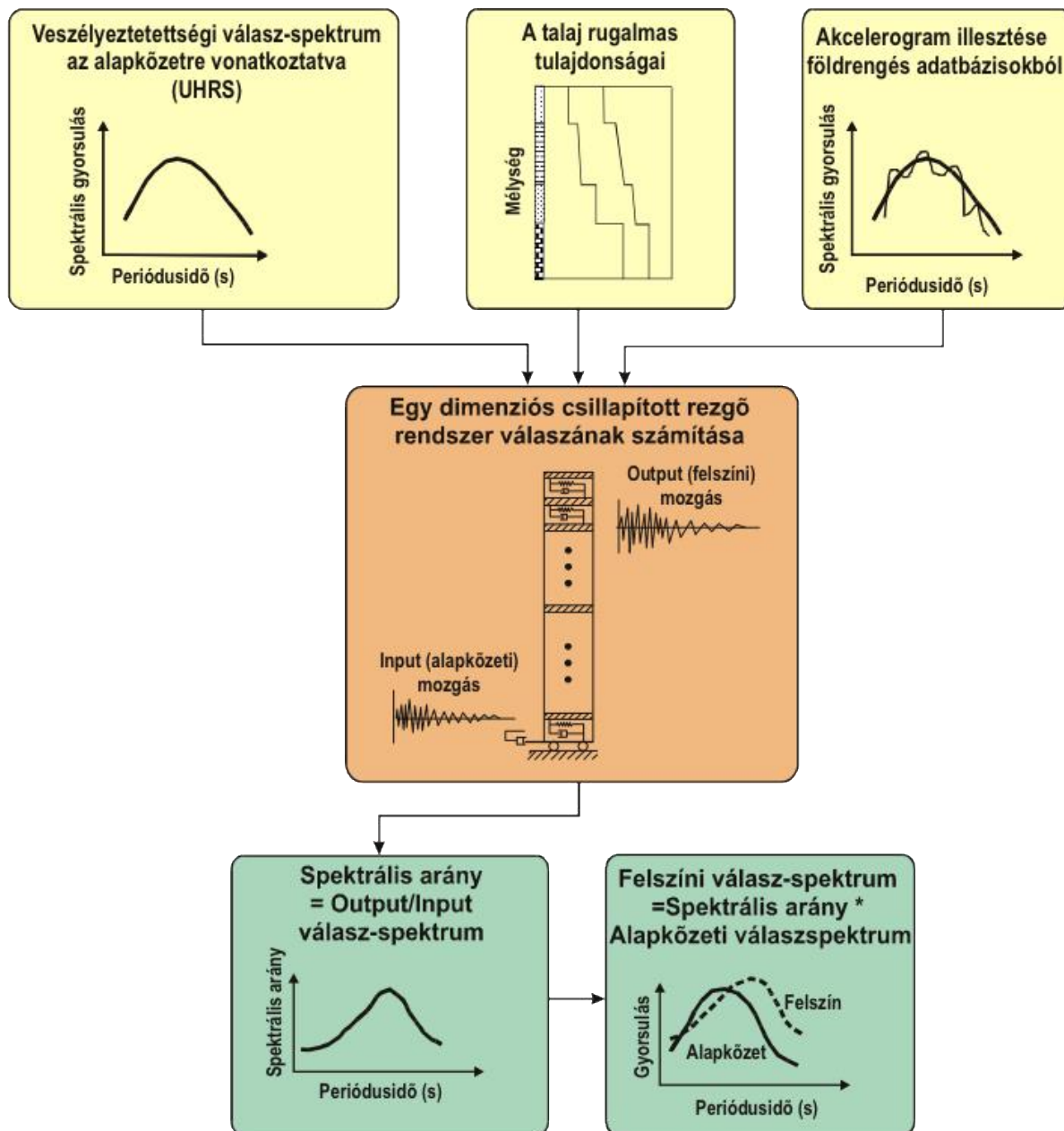


20. ábra A 10⁻⁵/év maximális vízszintes gyorsulás magnitúdó-távolság deaggregációja

16.2. A SZABADFELSZÍNI MEGRÁZOTTSÁG MEGHATÁROZÁSA

Az alapkőzetre kiszámolt UHRS-ből meg kell határozni a felszíni válaszspektrumokat az alapkőzetet borító fedőréteg átvitelének figyelembe vételével.

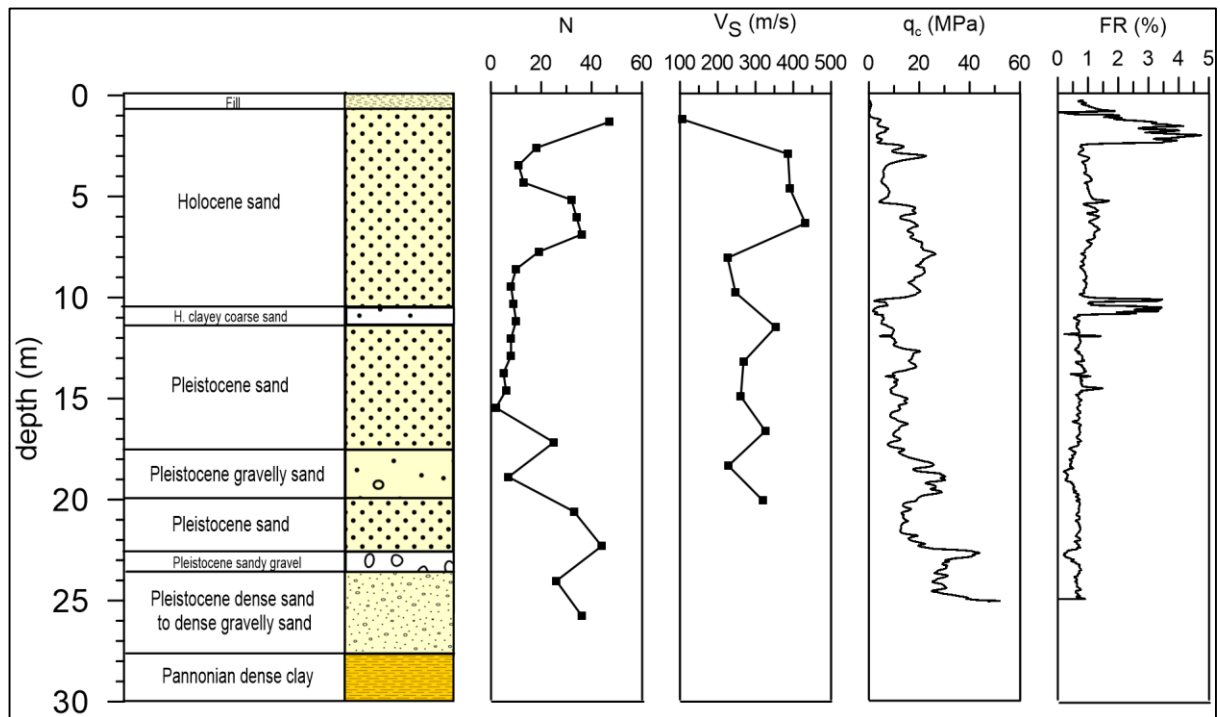
Ennek menetét a 21. ábrán látható séma szemlélteti.



21. ábra Az alapkőzetet fedő talajrétegek módosító hatásának számítása

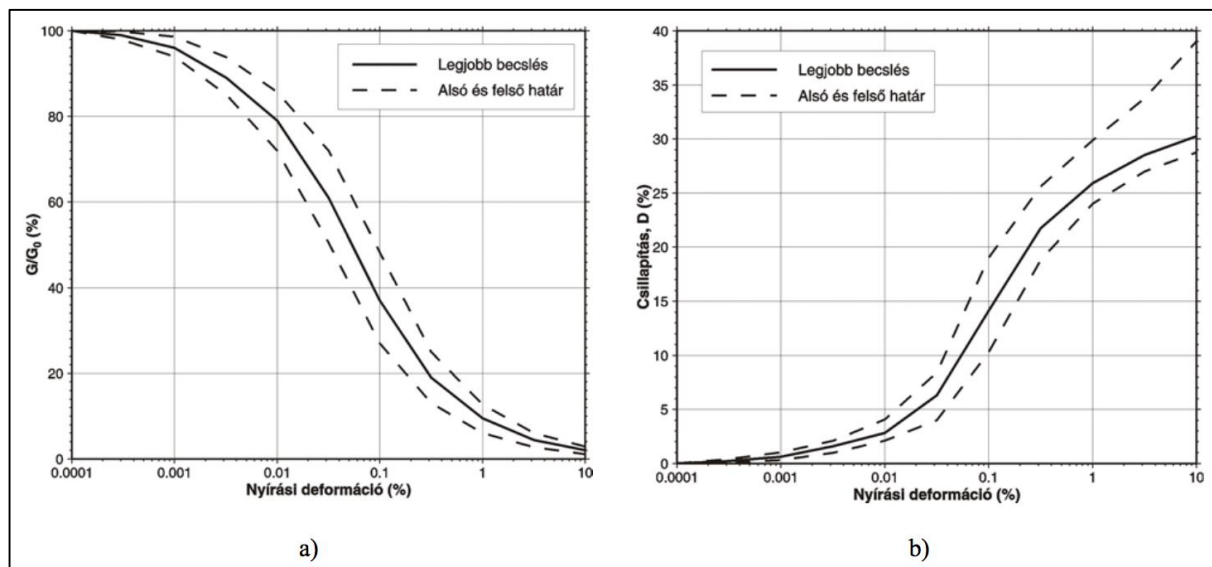
A fedőréteg leírását és tulajdonságait mutatja a 22. ábra.

A talaj dinamikai tulajdonságai, mint a nyírási rugalmassági modulus és a csillapítás alakváltozás-függővé válnak a földrengés hatására bekövetkező nagy alakváltozások mellett. Ezt a 23. ábra szemlélteti.



22. ábra A fedőrétegek tulajdonságai

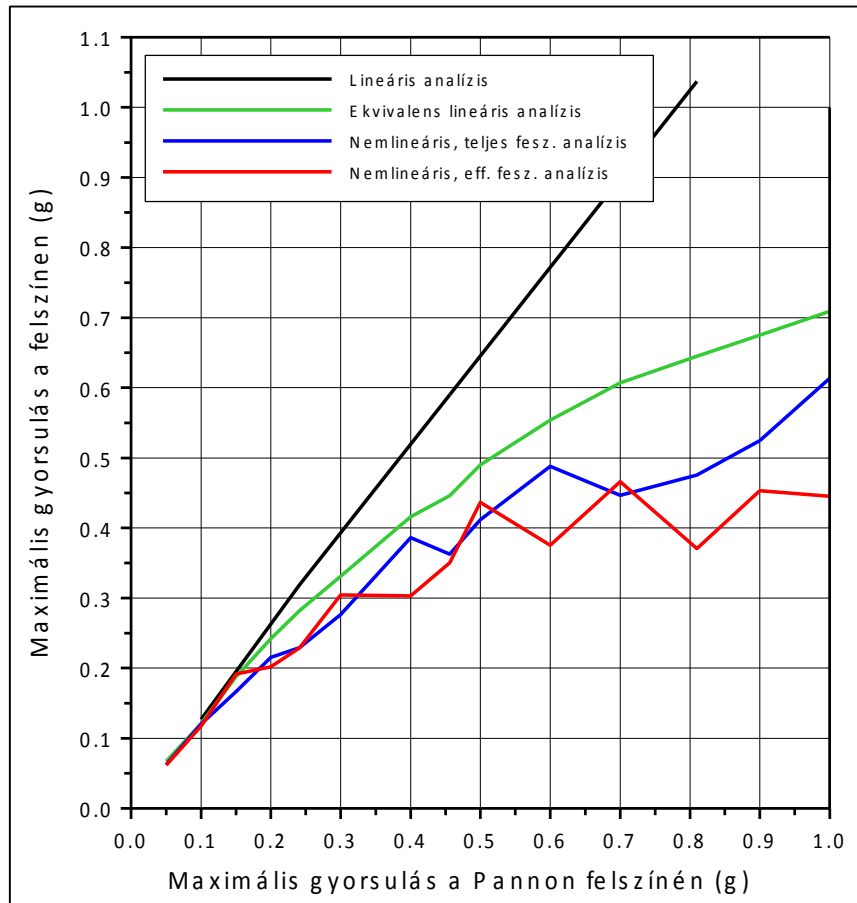
(ütés-szám, nyíróhullám sebessége, penetrációs ellenállás, frikciós-viszony)



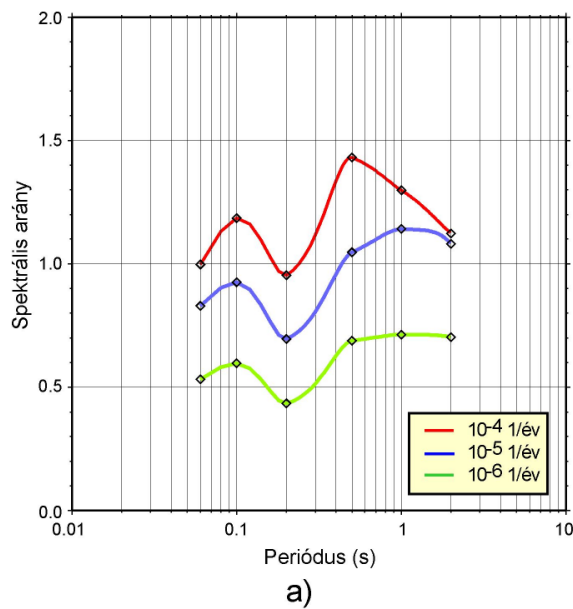
23. ábra Az alakváltozás-függő nyírási rugalmassági modulus és a csillapítás

A fedőréteg viselkedése lehet erőteljesen nemlineáris.

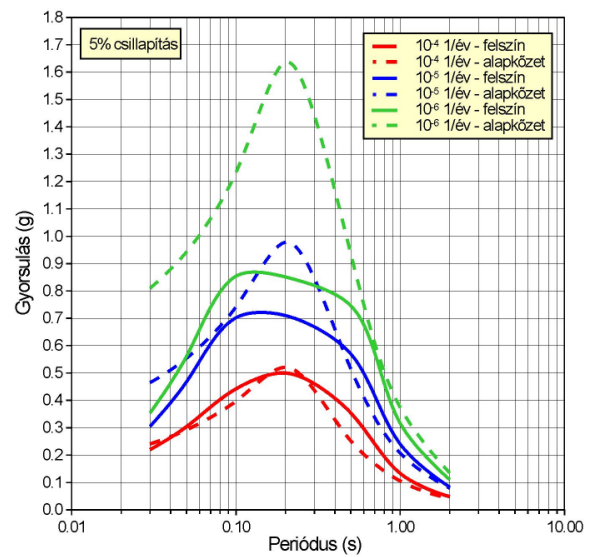
A nemlinearitás figyelembe vételének jelentőségét, illetve a lineáris számítás konzervativizmusát, valamint a felszíni válaszspektrumra gyakorolt hatását mutatja a 24. ábra és 25. ábra.



24. ábra A talajrétegek nemlineáris viselkedésének hatása



a)



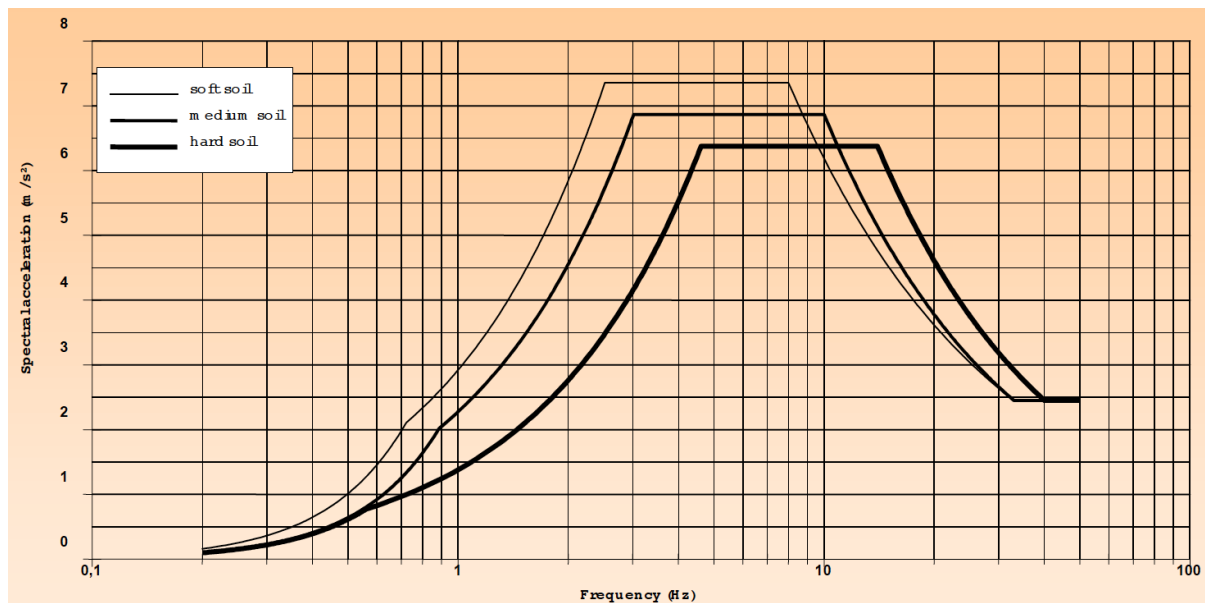
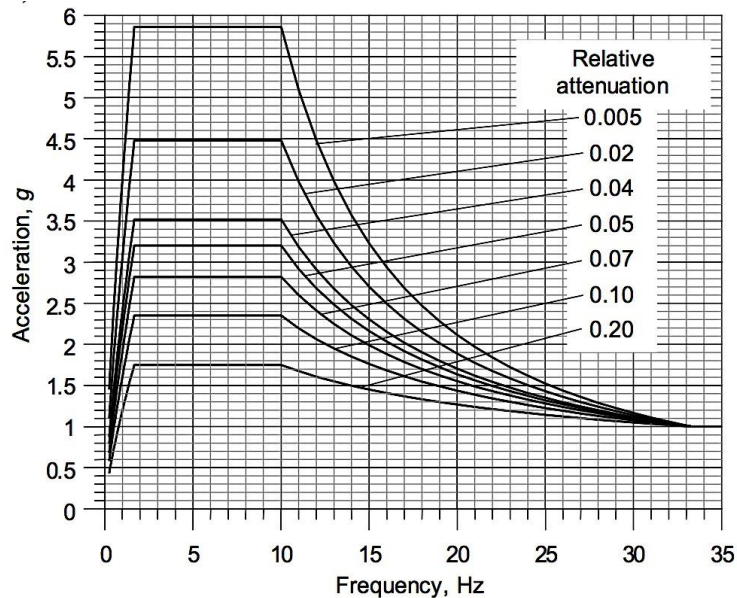
b)

25. ábra A talaj nemlineáris erősítése (a) és hatása a válaszspektrumokra (b)

Megjegyezzük, a referencia atomerőmű telephelye esetében sem a talaj tulajdonságai, sem pedig a földrengés nagysága nem vezet ilyen erőteljesen nemlineáris hatásokhoz.

16.3. A GYAKORLATI TERVEZÉS FÖLDRENGÉS-INPUTJA

A gyakorlati tervezés, főleg a típusterv, nem telephely-specifikus, hanem szabványos válaszspektrum alapján történik: az orosz terv esetében az NP-031-01 [7] szerinti válaszspektrumot véve (26. ábra), az EUR-t követve pedig a 27. ábra szerint.



A 28. ábra a) részlete a referenciaként szereplő balti atomerőmű tervezési alapját jelentő válaszspektrumokat (biztonsági/SSE és üzemeltetési/OBE) és a telephelyre kapott különböző válaszspektrumok viszonyát szemlélteti, mutatva, hogy az MSK-64 szerinti 6 és 7 intenzitásfokhoz rendelhető szabványos miként viszonyul a specifikusakhoz. A 28. ábra b) részlete pedig azt mutatja, miként viszonyul az MSK-64 7 intenzitásfokhoz tartozó szabványos válaszspektrum és a paksi tervezési alapba tartozó egymáshoz, illetve egy 0,25g-re átskálázott szabványos spektrum mennyire konzervatív a telephelyihez képest. Más orosz referenciát véve a 29. ábra adja az összehasonlítást.

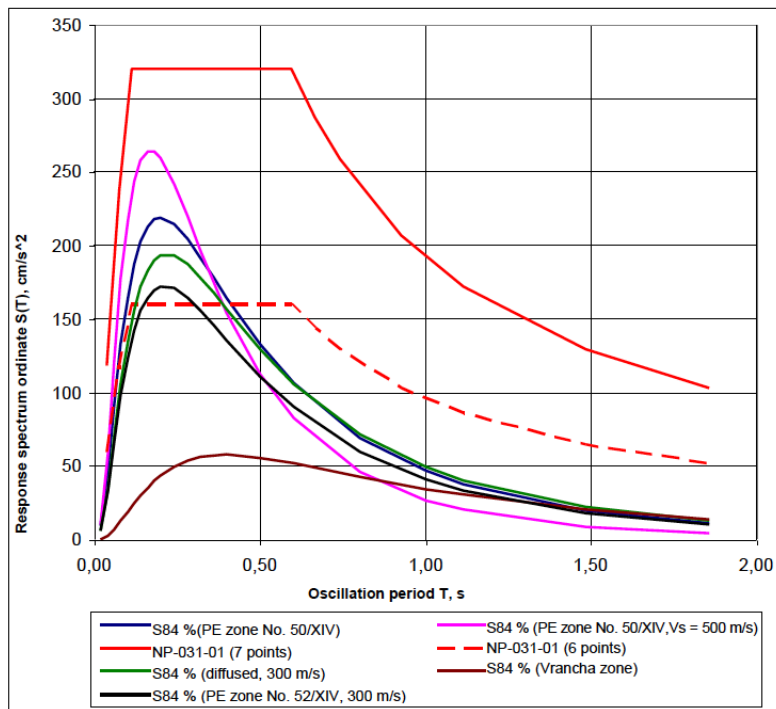
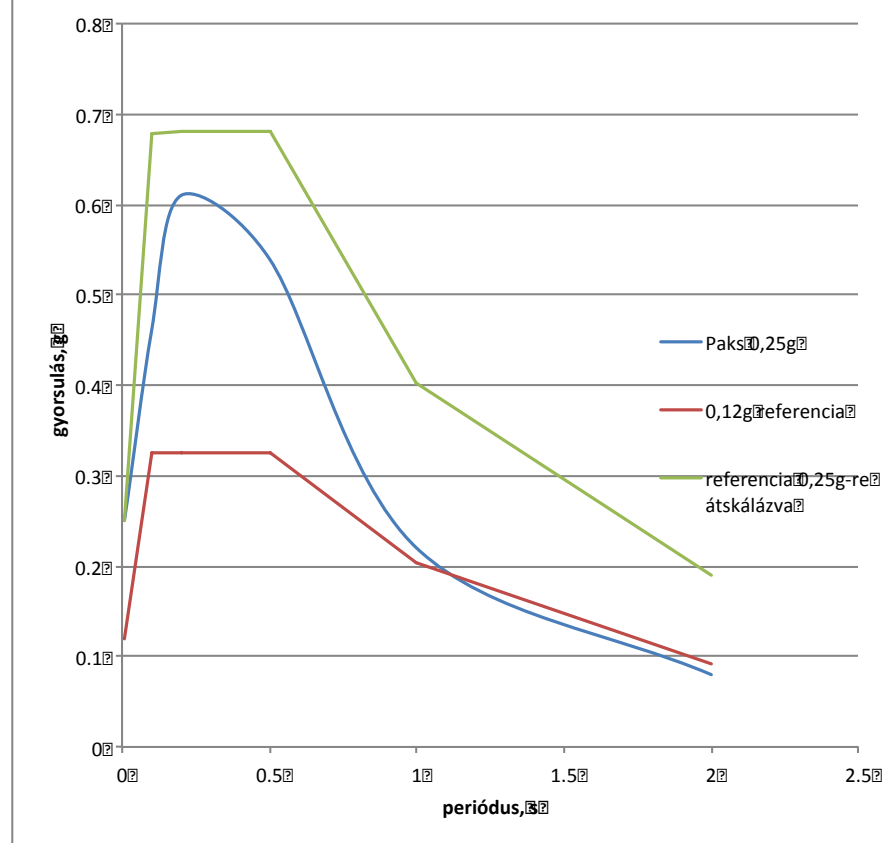


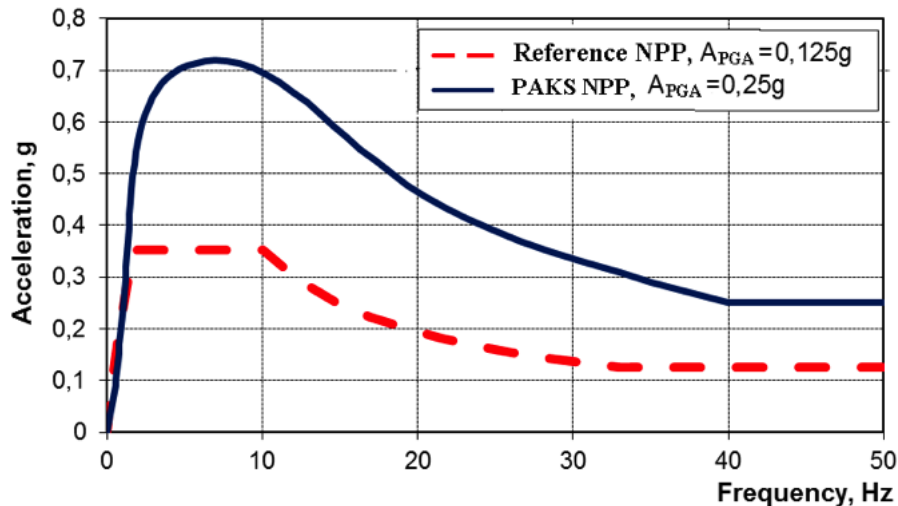
Figure 2.4.2.36 – Predicted generalized response spectra of soil (84 % occurrence)

Comparative analysis shows that standard and design response spectra for intensity of 7 magnitudes and maximum acceleration 0.12 g absorb the in-situ generalized response spectra calculated at 5 % decaying from the critical value (subparagraph 2.4.2.1.3.1.7).



a) Balti EBJ 2. kötet 264. oldal

b) Balti PGA=012g válaszspektrum skálázva a 0,25g-re



29. ábra A paksi és egy orosz referencia tervezési alapjába tartozó válaszspektrum

A fenti eltérések nyilvánvalóan összefüggésben vannak a Pannon felszínt borító negyedidőszaki rétegek talajmechanikai tulajdonságaival és a talajvízszinttel, amit az alábbiakban tárgyalunk.

A hazai szabályozás még megkívánja a cliff-edge effektus kiküszöbölését is a földrengés tervezési alap meghatározásánál, ami lényegében az US NRC Regulatory Guide 1.208 [21] és az ASCE/SEI 43-05 [45] mintájára a következők elvárását jelenti:

- 1%-nál kisebb a valószínűsége annak, hogy a tervezési alapba tartozó földrengés esetén funkcióvesztés következzen be, és
- 10%-nál kisebb legyen a valószínűsége annak, hogy a funkcióvesztés következzen be, ha a rengés a tervezési alapba tartozó rengés (maximális szabadfelszíni gyorsulásban mérve) 150%-a.

Ez elegendő biztosíték arra, hogy a hatás kismértékű megnövekedése ne okozzon azonnali tönkremenetelt. Ezt a követelményt a szabvány úgy a hatás, mint az ellenállás oldalán figyelembe veszi. A hatás oldalon vizsgáljuk, hogy milyen a veszélyeztetettségi görbe meredeksége, s ha az a valószínűség kis megváltozásához a maximális vízszintes gyorsulás nagy megváltozását rendelné, akkor a tervezés alapját képező válaszspektrumot megfelelően módosítani kell. Az ASCE/SEI 43-05 szabvány, illetve az erre épülő Regulatory Guide 1.208 szerint a telephelyre jellemző, úgynevezett „Uniform-Hazard-Response-Spectrum”-ból (UHRS), ami a valószínűségi földrengés-veszély elemzésének eredménye, egy frekvenciafüggő tényezővel való szorzással származtatható a tervezési válaszspektrum (Design Response Spektrum – DRS), az alábbi

$$DRS = DF * UHRS \quad (9)$$

képlet szerint. Itt a DF, a frekvenciafüggő tervezési tényező, amely a veszélyeztetettségi görbe¹² (17. ábra) egy dekádon vett, A_R meredekségét (a veszélyeztetettségi görbe $10^{-4}/\text{év}$ és $10^{-5}/\text{év}$ közötti megváltozását) veszi figyelembe. Ha a valószínűség egy nagyságrenddel történő megváltozása nagy, akkor a DF-fel korrigálni kell az UHRS-t. Ez biztosítja, hogy a tervezési válaszspektrumban legyen megfelelő tartalék az úgynevezett cliff-edge (szakadékszél-jelenség) elkerülésére, azaz a tervezési alapba tartozó válaszspektrum fedje le a meghaladási valószínűség kis megváltozásával járó spektrális amplitúdó változást.

¹² Az éves meg-nem-haladási gyakoriság a maximális vízszintes gyorsulás függvényében, azaz $H(a)=1-P(a)$, ahol a $P(a)$ a maximális vízszintes gyorsulás eloszlásfüggvénye.

A DF kiszámítása az alábbi képlettel történik:

$$DF = \max\{1,0; 0,6(A_R)^{0,8}\} \quad (10)$$

A paksi telephely esetében például $A_R \leq 1,9$, a $DF = 0,6(A_R)^{0,8} \approx 1,0$, lásd a piros vonalat a 17. ábra szerinti veszélyeztetettségi görbén, így

$$DRS \approx GMRS (= \text{a szabadfelszínre átvitt UHRS}) \quad (11)$$

Lényegében a fenti eljárást kodifikálja az NBSZ 7. kötet 7.5.2.0400. bekezdése.

17. A HIDROGEOLÓGIAI, GEOTECHNIKAI KÖRÜLMÉNYEK, VESZÉLYEK

A tervezési alap tartalmazza a telephely geotechnikai és hidrogeológiai jellemzését, adatait, amelyekre több okból is szükség van:

1. az alapozás tervezéséhez, a munkagödör nyitáshoz és a víztelenítés tervezéséhez meg kell adni a talajrétegek teherviselő képességét meghatározó talajmechanikai és hidrogeológiai adatokat;
2. a szabadfelszíni válaszspektrum kiszámításához szükség van a telephelyet fedő talajrétegek átvitelét meghatározó (alakváltozás-függő) talajmechanikai adatokra (a szabadfelszíni gyorsulás válaszspektrumok meghatározást a fentiekben már érintettük.);
3. geotechnikai és hidrogeológiai adatokra van szükség az instabilitás, a talajfolyósodás, beomlás, süllyedés veszélyének értékeléséhez, e veszélyek kizárásához, valamint szükség esetén a stabilizáció megtervezéséhez;
4. geotechnikai adatokra szükség van a hidrogeológiai környezetben történő transzport számításához is;

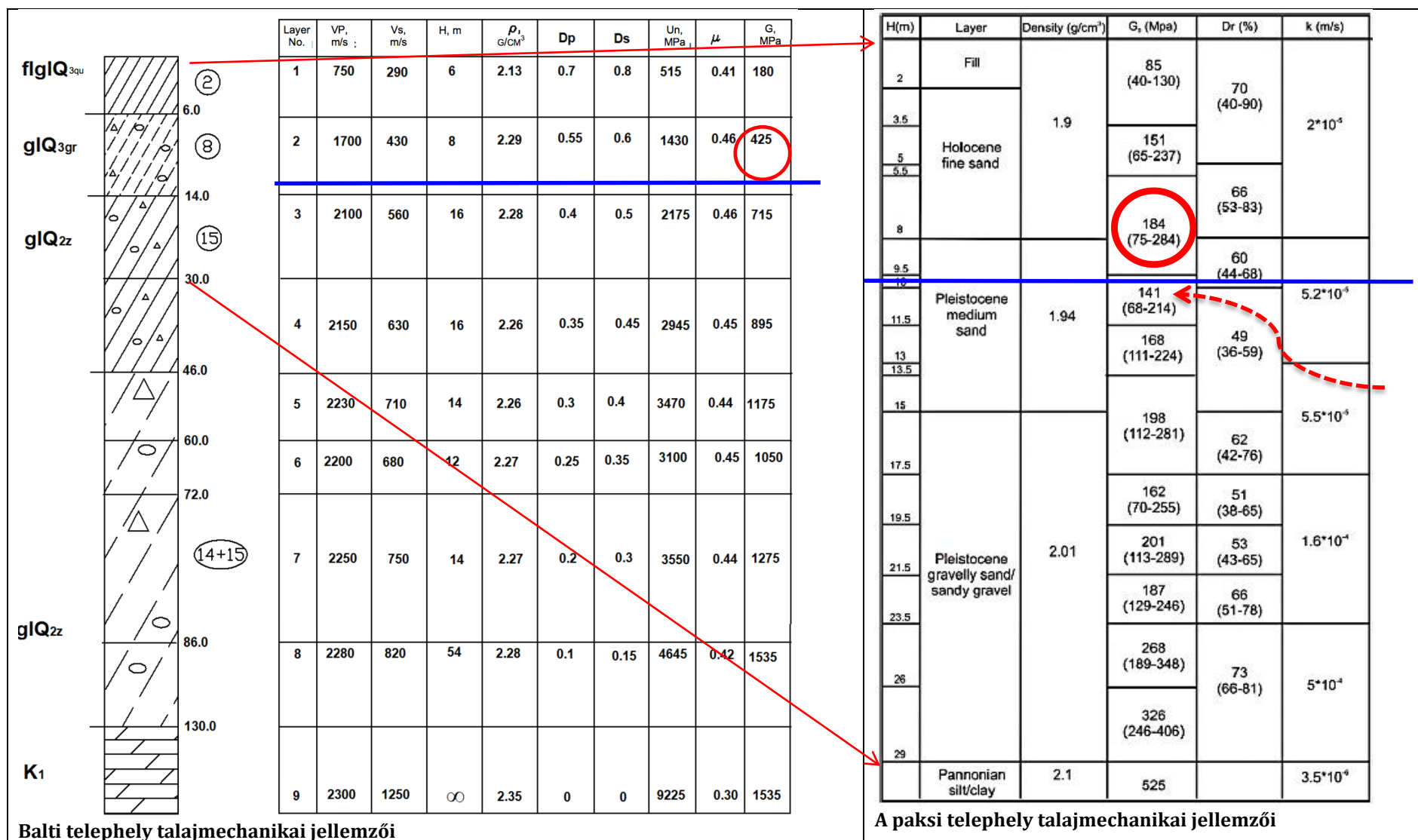
Speciálisan a paksi esetben arra is szükség van, hogy az építés, különös a víztelenítés hatását értékeljük a Paksi Atomerőmű biztonsága szempontjából.

A geotechnikai és hidrogeológiai adatok meghatározása a megfelelő szabványok szerint történik, mint az Eurocode 7 [46]. Hasznos értelmező irodalom például a [47] és [48]. Általános iránymutatást ad például a NAÜ NS-G-3.6 útmutatója [49]. A megfelelő orosz előírásokra hivatkozik a [50] norma, az az alapvető követelmények megtalálhatók az [51] előírásban.

Kifejezett hidrogeológiai veszélyek önmagukban nincsenek, de a talajmechanikai jellegű veszélyek értékeléséhez szükség van bizonyos hidrogeológiai adatokra, továbbá a hidrogeológiai környezetben való kibocsátások terjedés-számításaihoz. Erről részletes tanulmányok készültek az új blokkok környezeti hatásvizsgálat keretében; [52] és [53].

A paksi telephely jellemző talajmechanikai adatai, összehasonlítva a balti telephely adataival, a 30. ábrán látható. Nyilvánvaló, hogy a paksi telephelyen a talaj teherviselő képessége jóval kisebb, mint a referencia esetében.

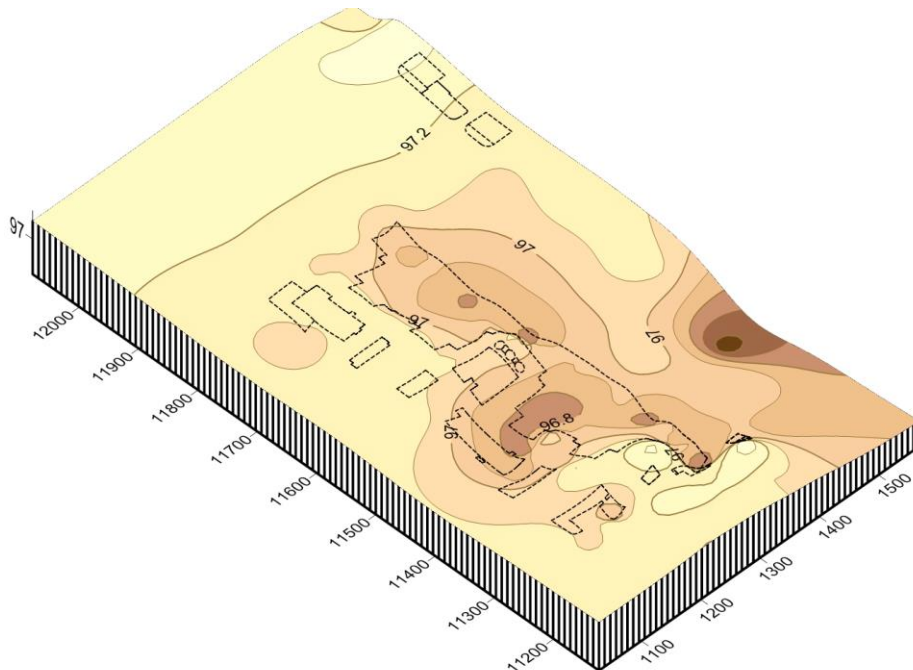
A paksi telephely, illetve a blokkok alapozásánk sajátossága, hogy a főépületek mind a mai napig süllyednek a Duna vízszint-igadozásait követő talajvízszint-ingadozások következményeként, ami nem kis gondot okoz.



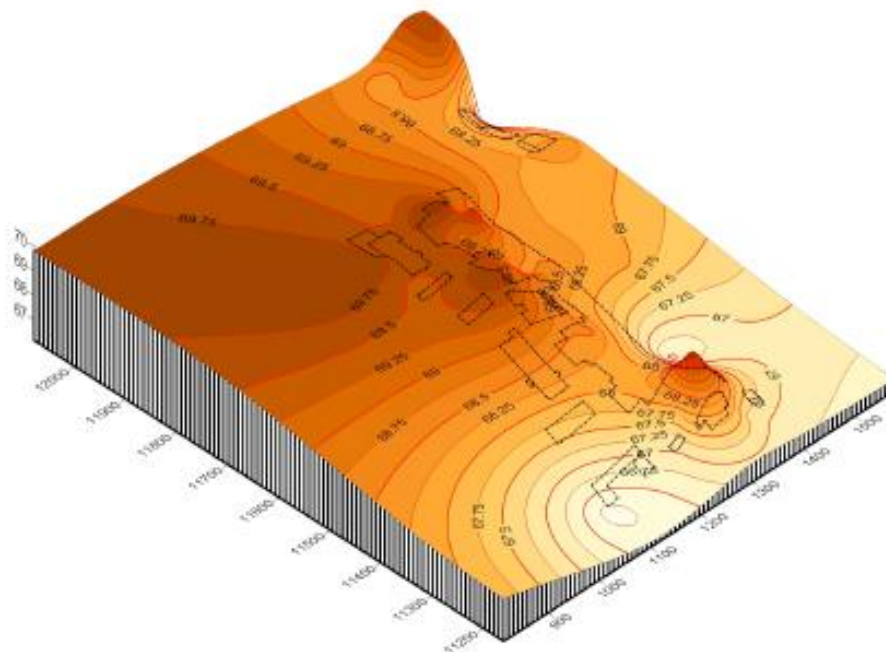
30. ábra A balti és a paksi telephely talajmechanikai jellemzői

A paksi telephelyen felszín átlagos magassága 97 m Bf, a talajvízszint minimuma ~87,3 m Bf maximuma ~91 m Bf talajvízszint, s talajvízszint változékonysága erősen helyfüggő, átlagosan 2,5-3,0 m, de helyenként 5 m is lehet.

A holocén és pleisztocén rétegek vastagsága eléggé változó ahhoz, hogy például az 1-4 blokk területén mintegy 500 pontban végzett geotechnikai vizsgálatok eredményét átvihetnénk a paks2 területére (31. ábra).



(a)



(b)

31. ábra A holocén (a) és a pannon (b) felszín

Fontos biztonságot is érintő kérdés lehet a talaj és a talajvíz esetleges agresszivitása, főleg, ha figyelmen kívül hagyják. A paksi telephelyen ezzel, mint veszéllyel nem kell számolni.

17.1. A LEJTŐ INSTABILITÁS, ERÓZIÓ-, CSUSZAMLÁS- ÉS KÚSZÁSVESZÉLY

Az alkalmasság feltétele, hogy a telephely ne legyen meredek ($>15^\circ$ szilárd kőzet és $>5^\circ$ laza kőzet esetén), vagy erősen tagolt felszínű, vagy erózió-, csuszamlás- és kúszásveszélyes területen. A létesítmény biztonsága szempontjából kiszűrhető az a természetes vagy mesterséges rézsű, amely megcsúszása esetén a törmelék nem érheti el a telephelyet. Ezt a rézsű megcsúszásának determinisztikus, szabványok szerinti elemzésével lehet eldönteni, amelyet a rézsű dőlésszöge, magassága, rétegrendje, víztartalma alapján lehet elvégezni.

Az alkalmasság ellenőrzésén túl vizsgálni kell az instabilitás-veszélyt a telephelyre jellemző földmozgások, valamint az extrém csapadék figyelembevételével. Ez egy tipikus esete a korrelált eseményeknek.

A csúszásveszély ellen léteznek bevált műszaki intézkedések. Ezek tervezési alapját úgy kell meghatározni, hogy a műszaki intézkedést követően a veszélyt nagy biztonsággal ki lehessen zárni a tervezési alaphoz, például egy nagyságrenddel csökkentve a bekövetkezés veszélyét a tervezési alapszűrési szintjéhez képest.

A paksi telephelyen ezt a veszélyt fizikai evidenciák alapján ki lehet zárni.

17.2. A FELSZÍN BEOMLÁSA, ROSKADÁSA

A felszín beomlásának veszélye esetén a telephelyet alkalmatlannak kell nyilvánítani, tehát ez a veszély nem része a tervezési alaphoz. Amennyiben van mód a felszín beomlását ellenőrzött műszaki intézkedéssel kizárni, a tervezési alap ezen intézkedések megtervezésének input adatait, követelményeit tartalmazza. A telephely alkalmatlanságának feltételei az alábbiak:

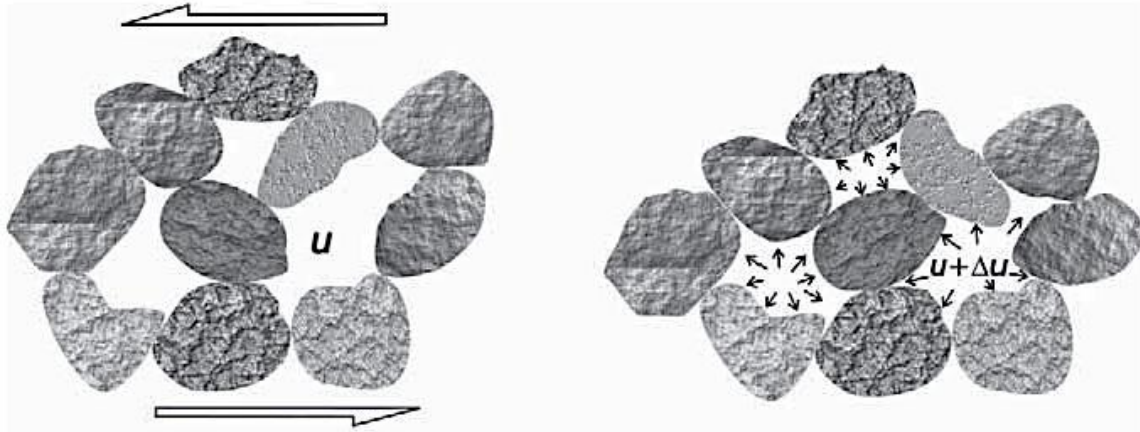
- a telephely közelében ($\sim 1,0$ km távolságon belül), relatíve kis mélységben (<100 m) léteznek karsztképződmények;
- felszín alatti természetes vagy mesterséges eredetű üregek, barlangok, bányák, pincék vagy más rekultiválatlan műtárgyak vannak, s azok geomechanikai hatásterülete eléri a telephelyet, és
- nincs mód a telephely felszínének beomlását, roskadását, süllyedését megakadályozó műszaki intézkedésekre.

A paksi telephelyen ezt a veszélyt fizikai evidenciák alapján ki lehet zárni.

17.3. TALAJFOLYÓSODÁS

A talajfolyósodással a laza, vízzel telített, kohéziómentes talajok, homok, iszapos vagy agyagos homok és kavicsrétegek esetén kell számolni. A talajfolyósodás veszélyét a tervezés alapját képező biztonsági földrengés estére ki kell zárni.

Földrengések során a károk nemcsak az épületek rázkódása, hanem az alattuk levő talaj károsodása miatt is bekövetkezhetnek. Ilyen jelenség például a talajfolyósodás, mely már közepes magnitúdójú rengéseknél is előfordulhat. Erős rázkódás hatására a laza szemcsés talajok tömörödni kezdenek, a bennük levő hézagok térfogata lecsökken. Ha a pórusok vízzel telítettek és a víz nem tud elszívároggni, akkor a pórusvíz nyomása megnő (32. ábra). Ha ez eléri a fölötte levő talajrétegek nyomását, akkor ez az anyag úgy viselkedik, mint egy viszkózus folyadék, elveszíti teherhordó szilárdságát, és nagy deformációkat szenvedhet el. Ha egy felszín alatti rétegben kialakul ez a jelenség, akkor az lecsökkenti a transzverzális hullámkomponensek hozzájárulását a felszín mozgásához, tehát a károk ebben az esetben nem a magas gyorsulások, hanem a kialakuló nagy talajdeformációk miatt keletkeznek. Következmenyei legtragikusabbak lejtős terepen, ahol a felettük levő rétegek súlyuk miatt hatalmas lejtőirányú elmozdulásokat szenvedhetnek el. Sík vidéken a jelenséget az árkok elárasztása vizes homokkal, homok kilövellések, iszapvulkánok, a talaj megsüllyedése stb. kíséri. A mai Magyarország területén a történelmi feljegyzések szerint négy alkalommal tapasztaltak talajfolyósodást (Komárom 1763., Mór 1810., Kecskemét 1911., Dunaharaszti 1956.), de nyomait fiatal üledékekben is megtalálták.



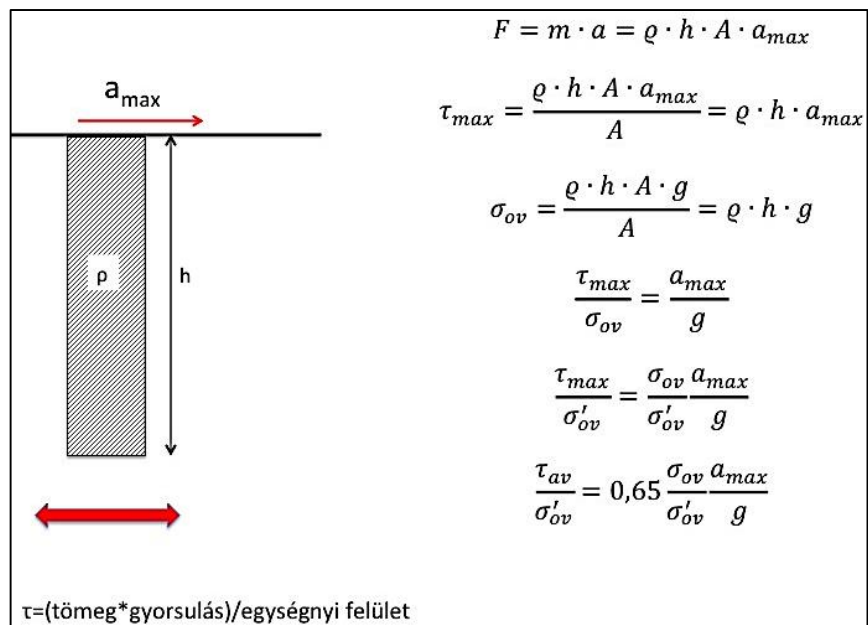
32. ábra A szemcsés vízzel telített talaj viselkedése földrengés esetén

A talajfolyósodás kialakulásának lehetőségére a szűrési kritériumokat például az US NRC Regulatory Guide 1.198 [54] adja meg az FS_{liq} biztonsági tartalék formájában, azaz

$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR} \quad (12)$$

ahol a CRR a talajfolyósodással szembeni ciklikus rezisztencia, CSR pedig a földrengés által keltett ciklikus feszültség-hányad. A CRR ciklikus ellenállás arány meghatározása általában terepi in situ mérésekkel történik. Ezek közül leggyakrabban az SPT és CPT méréseket használják, de kavicsos rétegeknél a transzverzális hullámsebesség meghatározások (VS) és a Becker penetrációs teszt (BPT) mérések megbízhatóbban alkalmazhatók. A CRR meghatározás alapjául szolgáló empirikus diagramokat rögzített, 7,5 magnitúdójú földrengésekre határozzák meg, majd ezt skálázzák át más magnitúdókra.

A CSR ciklikus feszültség arány a szeizmikus gerjesztést képviseli. Egy adott mélységben a fellépő effektív ciklikus nyírófeszültség és az effektív nyomás hányadosával definiálható (33. ábra).



33. ábra A ciklikus feszültség arány értelmezése

Az ábrán látható egyszerű levezetés végén megjelenő 0,65 szorzóval azt vesszük figyelembe, hogy egy földrengés alatt nem állandó a_{max} az amplitúdó, hanem átlagosan **0,65** a_{max} .

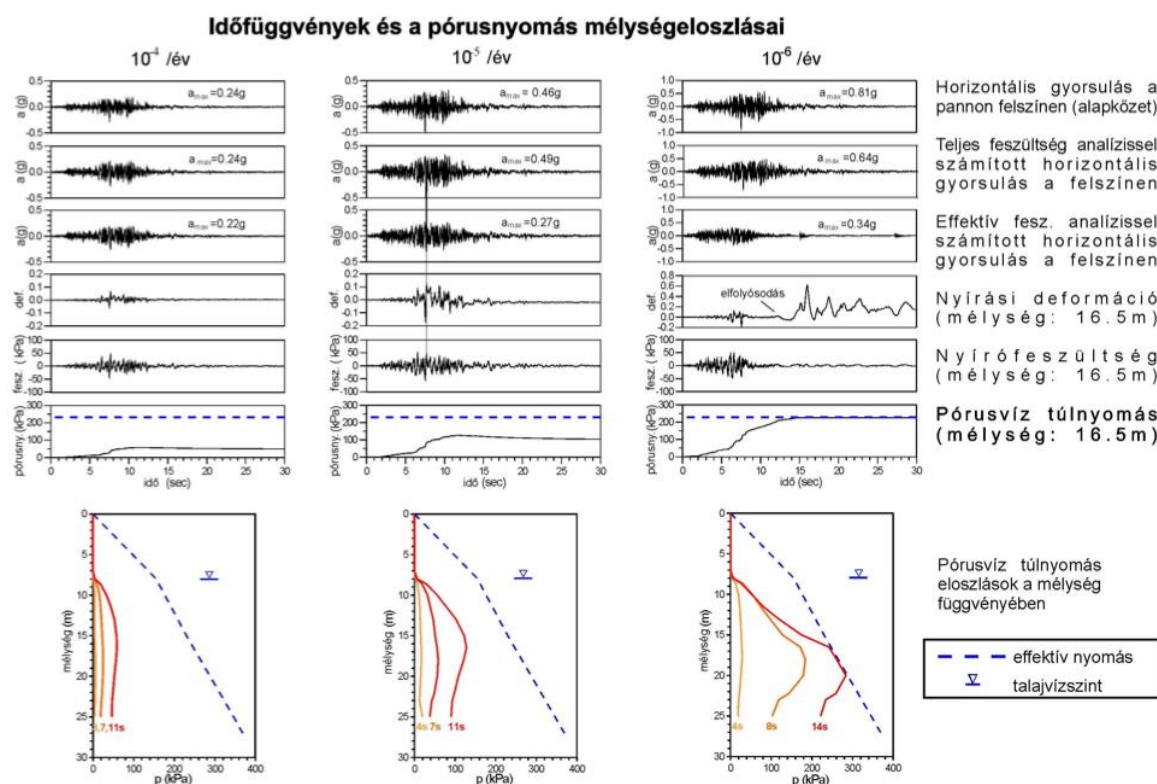
A nyírófeszültség meghatározása a rétegsor átvitelének számításával vagy becslésével történik. A becslésre a gyakorlatban számos empirikus, félempirikus módszer, formula létezik.

A paksi telephelyre végzett legújabb vizsgálatok keretében kritikai összehasonlító elemzést végeztünk az 10. táblázatban szereplő, SPT, CPT és Vs alapú determinisztikus és valószínűségi módszerekre [55], [56].

10. táblázat A talajfolyósodás-veszély vizsgálatokban alkalmazott empirikus módszerek

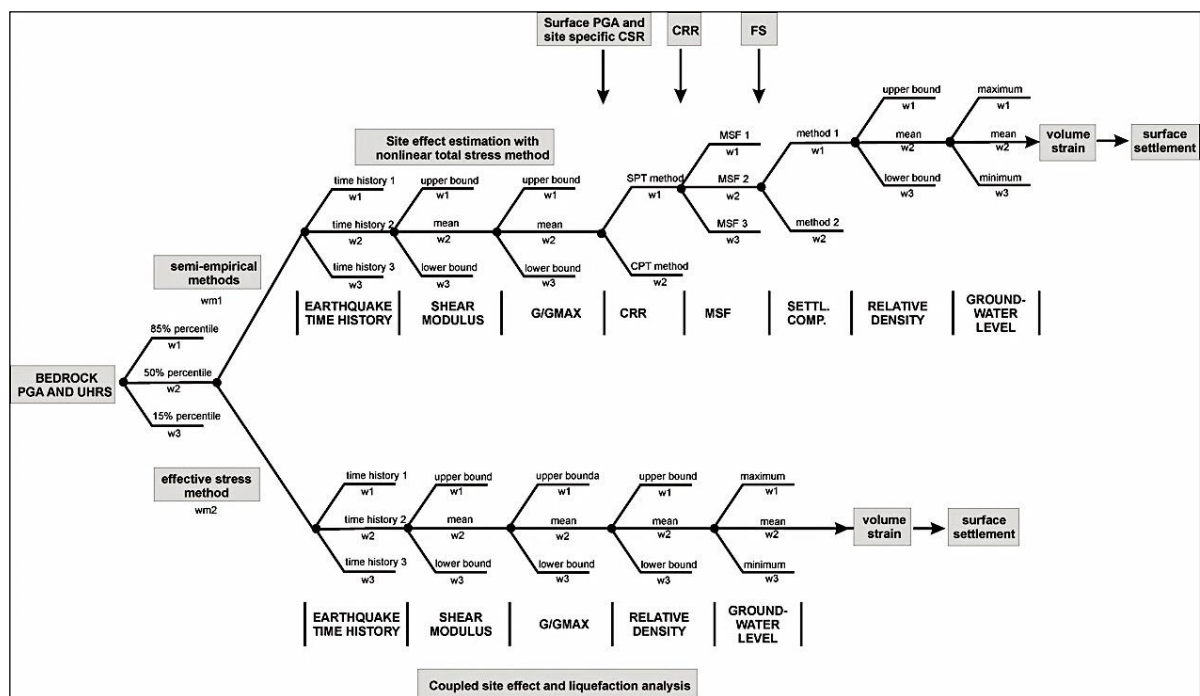
Módszer		NCEER 1996 - NCEER/NSF 1998			Berkeley Egyetem			Idriss és Boulanger (2004, 2008, 2012)	Juang et al. (2006)
		Youd et al. (2001)	Robertson és Wride (1998)	Andrus és Stokoe (1997)	Cetin et al. (2004)	Moss et al. (2006)	Kayen et al. (2013)		
CPT	det		X			X		X	X
	prob					X			X
SPT	det	X			X			X	
	prob				X			X	
Vs	det			X			X		
	prob						X		

Léteznek fejlett, analitikus effektív vagy teljes feszültség alapú talajfolyósodás elemzési módszerek. Ilyen módszerrel végzett elemzés eredményeit mutatja a 34. ábra.



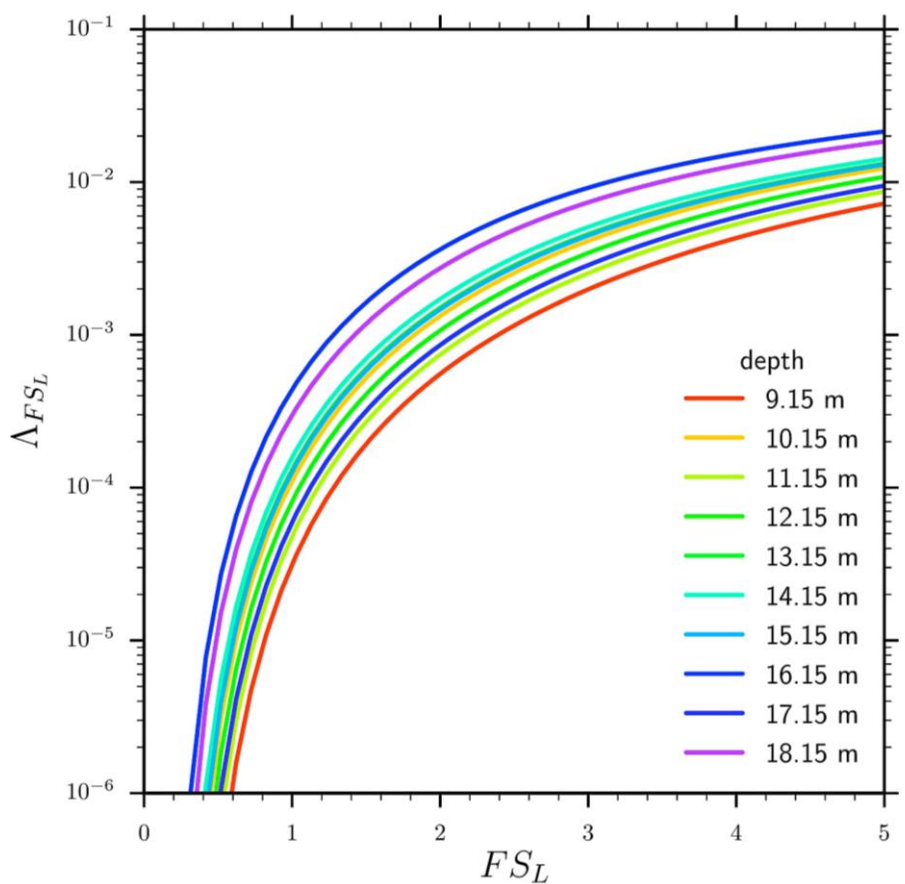
34. ábra A pórusnyomás alakulása a mélység és a megrázottság függvényében

A talajfolyósodás értékelése minden esetben magában foglalja a talajmechanikai adatok és a módszerek bizonytalanságának értékelését is. A bizonytalanságokat egyszerűbb esetben a talajfolyósodás veszélyét tekintve konzervatív talajmechanikai adatok felvételével, bonyolultabb esetben valószínűségi módszerekkel (logikai fa) lehet értékelni [57]. A talajfolyósodás valószínűségi elemzésének logikai fája a 35. ábra mutat példát.



35. ábra A talajfolyósodás elemzésére kidolgozott logikai fa [55]

A talajfolyósodás veszélyt jól jellemzi a paksi telephelyen az egyes rétegekben a talajfolyósodással szembeni biztonsági tényező (FS_L lásd a (12) egyenletet) éves meghaladási gyakoriság eloszlása (36. ábra) [58].



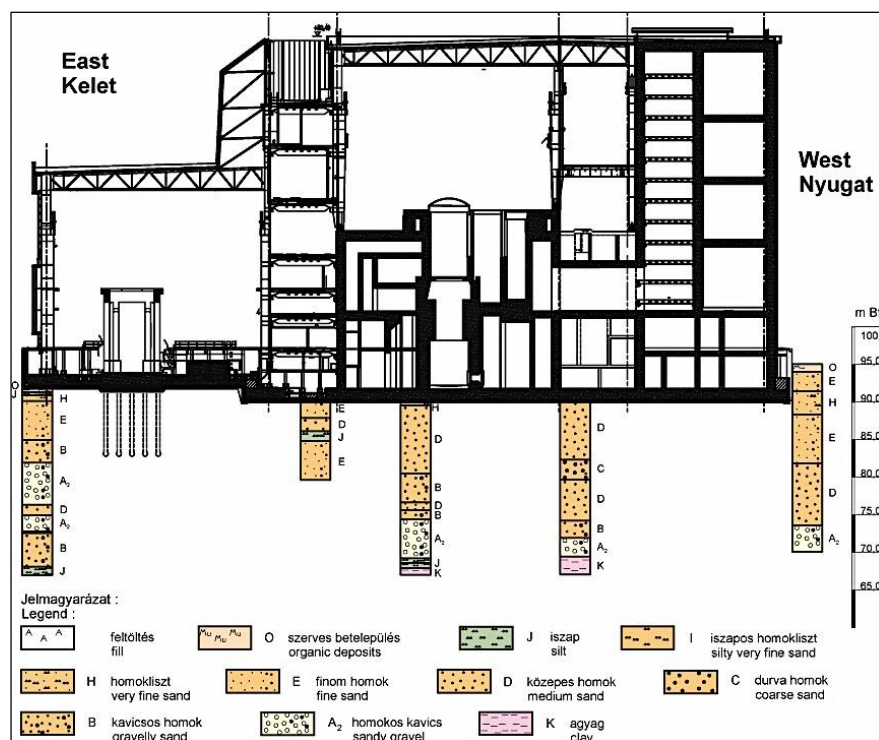
36. ábra A talajfolyósodással szembeni biztonsági tényező éves meghaladási gyakorisága

A talajfolyósodás hatása komplex, ahogy azt a mutatja 11. táblázat [59].

11. táblázat A talajfolyósodás hatásai

Increase in parameter	Primary deformation mechanisms/mechanism of displacement				
	Localized volumetric strains due to partial drainage	Sedimentation after liquefaction	Consolidation due to excess pore pressure dissipation	Partial bearing failure due to strength loss in foundation soil	SSI-induced building ratcheting due to cyclic foundation loading
Peak ground acceleration (PGA)	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Liquefiable layer rel. density (D_r)	↓↓	↓↓	↓	↓↓	↑↓
Liquefiable layer thickness (H_L)	↑	↑	↑↑	↑	↑↓
Foundation width (B)	↓	↑↓	↑	↓	↓↓
Static shear stress ratio, $\tau_{static}/\sigma'_{v0}$	↓	↓	↓	↑↓	—
Height/width (H/B) of structure	↑	↑	↑	—	↑↑
Building weight	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↑
3D drainage	↑↑	↓	↑	↓	↑↓

Esetünkben a talajfolyósodást követő talajsüllyedés a meghatározó mechanizmus, ami, ha a rétegek eloszlása egyenetlen, egyenetlen épületsüllyedéseket okozhat (0).



37. ábra Példa az épületek alatti inhomogenitásokra

A süllyedés kiszámítása is igen nagy körütekintést igényel. Ahogy azt a 12. táblázat mutatja, igen nagy eltérések kaphatók mőszertől és a lokális viszonyoktól, illetve a lokális viszonyokat jellemző talajmechanikai adatok jóságától függően.

12. táblázat A talajsüllyedés számítás módszerei

56

Ha a talajfolyósodás bekövetkezhet olyan gyakorisággal, amely jellemző a tervezési alapba tartozó eseményekre, akkor a telephelyet az érvényes előírások alapján nem megfelelőnek minősítjük, kivéve, ha léteznek bevált műszaki megoldások a talajfolyósodás kiküszöbölésére (például talajcsere, cölöpalapozás, kavicscölöpös talaj-stabilizáció). Erre van példa a kiégett fűtőelemek átmenati tárolója esetében.

17.4. A TALAJ ROSKADÁSA

A roskadás egyes talajok – elsősorban a lösz – térfogatának gyors csökkenése, amely terhelés és vízzel való elárasztás hatására jöhet létre. Ha a roskadási tényező értéke nagyobb, mint a szabványos határérték, akkor a vizsgált talaj roskadás szempontjából veszélyes, amit a tervezés során figyelembe kell venni. A paksi telephelyen ezt a veszélyt fizikai evidenciák alapján ki lehet zárni.

18. METEOROLÓGIAI KÖRÜLMÉNYEK ÉS VESZÉLYEK

A meteorológiai körülményeket, beleértve a szélsőséges meteorológiai jelenségeket is, négy szempontból kell vizsgálni a tervezési alap vonatkozásában:

- 1) Az időjárás meghatározza azokat a szezonálisan változó, átlagos jellemzőkkel leírható körülményeket, amelyek között a létesítménynek üzemelnie kell. Ezek a körülmények az építési, tervezési szabványokban is meghatározott téli és nyári hőmérsékleti átlagok és maximumok, hőteher, szélteher, vagy a kondenzátor hűtőrendszer, a fűtés, hűtés és szellőzés tervezéséhez szükséges időjárási adatok, amelyek a biztonsági funkciótól függetlenül, közvetlen környezeti hatásként szükségszerűen hatnak a létesítményre, illetve rendszereire. Az erőmű/létesítmény egészét ezek figyelembevételével kell tervezni. E körülmények figyelembe vétele tulajdonképpen a használati feltételek biztosítását jelenti.
- 2) Az alapvető biztonsági funkcióknak extrém meteorológia körülmények vagy szélsőséges meteorológiai jelenségek hatása alatt is meg kell valósulni. A meteorológiai jellegű veszélyek, amelyek rendkívüli teherként hatnak a létesítményre és befolyásolják az alapvető biztonsági funkciók megvalósulását, vagy maguk is biztonsági működésekhez vezethetnek a következők lehetnek például:
 - az extrém meteorológiai körülmények (extrém hőmérsékletek, hó, csapadék, villámlás, szárazság),
 - az extrém szél, a ciklon, hurrikán, tornádó (a felkapott repülő tárgy is),
 - az abrazív viharok,
 - a villámlás,
 - a zúzmara, a jéglerakódás.
- 3) A meteorológiai körülmények, légköri stabilitási jellemzők befolyásolják a kibocsátások terjedését. Meg kell határozni a terjedést meghatározó paramétereket, a tervezési alapba tartozó, a normál terjedési viszonyokat épp úgy, mint a szélsőségesen kedvezőtlen terjedési viszonyokat is.
- 4) A telephelyi meteorológiai jellemzők ismerete ahhoz is szükséges, hogy a végső hőelnyelő rendelkezésre állását értékelni lehessen. Itt az éghajlat hosszú távú változását is számításba kell venni.

A meteorológiai körülmények és szélsőségek vizsgálatának általános elveit és követelményeit a NAÜ SSG-18 [60] dokumentuma tartalmazza, hasonlóan az NRC 10CFR100 és a regulatory Guide 4.7 [61]. Konkrét példákat ad a tervezési alapba tartozó veszélyek tekintetében European Utility Requirement Document [13]. Fontos szempont a tervezésnél a felvett adatok stabilitásának vizsgálata, különös tekintettel a feltételezett hosszú távú romló tendenciákra, amelyeket a klímaváltozás okoz (lásd az SSG-18 IV. függelékét). A meteorológiai körülmények és veszélyek jellemzéséhez nem csak az átlag és extrémális értékeket, hanem az egyes állapotok tartósságát is meg kell határozni.

A tartós üzemviteli körülményeket, vagy másképp a használati körülményeket, amelyeket a szabványok is meghatároznak, a $\geq 10^{-3}$ /év gyakoriság jellemez, lásd az üzemi feltételeket meghatározó meteorológiai körülményekre a 13. táblázatban található értékeket.

A paksi telephely meteorológiai viszonyainak jellemzését hosszú idejű megfigyelések (közel 40 év a telephelyen), reprezentatív adatok és elemzések alapján készült, s az rendszeres aktualizálás tárgyát képezi. A legújabb vizsgálatok az új blokkok környezeti hatásvizsgálata keretében készültek [62].

18.1. A HASZNÁLATI FELTÉTELEK MEGHATÁROZÁSA

A használati feltételek is fontos részét képezik a tervezési alapnak. Itt a mértékadónak tekintett 0,01/év meghaladási gyakoriságok az általános ipari szabványokhoz hasonlóak, és az értékek a World Meteorological Organisation szabványai szerint, általában minimum 30 éves rekordokból képzendők a lokális meteorológiai megfigyelési program adatainak figyelembe vételével. A használati feltételek tervezési alapon való megadására lásd az USA szabályozási gyakorlata alapján összeállított 13. táblázatot (lásd még a NAÜ SSG-18 dokumentumának I. függelékét is).

13. táblázat A tervezési alapba tartozó meteorológiai körülmények

paraméter	P _E , meghaladási valószínűség, 1/év	magyarázat
léghőmérséklet		
maximum hőmérséklet és egyidejű max. nedves hőmérséklet	0,01	hűtés és légkondicionálás tervezéshez, folyamatos működés körülmények
maximum nedves hőmérséklet	0,01	szellőzés, hűtők és hűtőtornyok tervezéséhez
minimum hőmérséklet	0,01	fűtés-tervezés, a folyamatos működés körülménye
végső hőelnyelő		
meteorológiai körülmények, amelyek 1 (5) napos minimális hűtést eredményeznek	történelmi legrosszabb eset	a megfigyelt legrosszabb 1(5) napos átlagos nedves hőmérséklet és egyidejű max. hőmérséklet, amely a biztonsági rendszerek hűtésének tervezésére szolgálnak
körülmények, amelyek 30 nap egymásután maximális elpárolgást és cseppvesztést eredményeznek		a megfigyelt legrosszabb 30 napos átlagos nedves hőmérséklet és egyidejű hőmérséklet, amely a tartós hűtés rendelkezésre állásának igazolására szolgálnak
csapadék (eső)		
maximális 10, 20, 60 perces, és napi csapadékösszegek	0,01	csapadék-elvezető rendszer tervezéséhez
szél		
3s maximum széllökés	0,01	10m magasságban mért várható érték, a szélteher meghatározásához
hó		
a maximális órétég, a hótakaró fajlagos súlya kN/m ²	0,01	a hótakaró súlyának és ebből a tetőterheknek meghatározásához
jegesedés, ónos eső		
jég vastagsága és egyidejű szélsőbesség	0,01	jégvastagság és az egyidejű mértékadó 3 másodperces széllökés, az eljegesedésre érzékeny szerkezetek tervezéséhez (légvezetékek)
villámlás		
villám gyakoriság	éves átlagos villámcsapás	villámvédelem tervezés

Ezek a mértékadó értékek megtalálhatók a szabványokban, mint az ASCE/SEI 7-10 „Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” [63] vagy az orosz esetben a SNiP2.01.07-85 [64] szabvány,

avagy az MSZ EN szabványsorozat (EUROCODE) meghatároz . 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)

Megjegyezzük, a korszerű európai nyomottvizes erőmű terve is lényegében az EUROCODE-1 (EN 1991, Actions on structures, EN1991-1-3, hó, 1-4, szél, 1-5 hőmérséklet) is a konvencionális ipari létesítmények normáit veszi alapul a hőmérsékletek, a szél és hóteher származtatásánál.

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.

Konkrét paksi és referencia telephelyi adatokat a 14. táblázatban láthatunk.

14. 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

18.2. METEOROLÓGIAI SZÉLSŐSÉGEK

A meteorológiai, mint a hőmérsékleti minimumok, maximumok és azok tartóssága, az extrém szél, csapadék, stb. a tervezési alapon figyelembe veendő adatok, amelyek esetében megadott gyakoriságú szint a tervezési alaphoz tartozás kritériuma. Hazánk klimatikus körülményei között ezek a szélsőségek nem okoznak különösebb tervezési gondokat.

Jellemző telephelyi és referencia erőművi adatokat a 15. táblázat tartalmaz.

15. táblázat A paksi telephely és a referenciák meteorológiai szélsőségeinek jellemzői

	VBJ (10-4/év)	I.19 (10-5/év)	Balti (10-4/év)		EUR
			2. fejezet	3. 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 alábbiakban szemléltetjük például az extrém szél visszatérési idejének számítását.

Példaként a meghaladási valószínűség, P_E és a visszatérési idő, T_R kiszámítására tekintsük a maximális szélsebességeket, amelyeket egy telephelyen tíz év alatt regisztráltak (egy példát a 16. táblázat tartalmaz).

16. táblázat Példa: Tíz év alatt regisztrált szellőkés maximális sebességek

Sorsz.	V, km/h	P_E meghaladási valószínűség	T_R visszatérési idő
1	123	0,09	11
2	115	0,18	6
3	107	0,27	4
4	101	0,36	3
5	94	0,45	2
6	91	0,55	2
7	77	0,64	2
8	73	0,73	1
9	65	0,82	
10	60	0,91	

A számítást a következő egyszerű képleteket használva végezhetjük el:

$$P_E = \frac{r}{N+1} \quad (13)$$

$$T_R = \frac{1}{P_E} \quad (14)$$

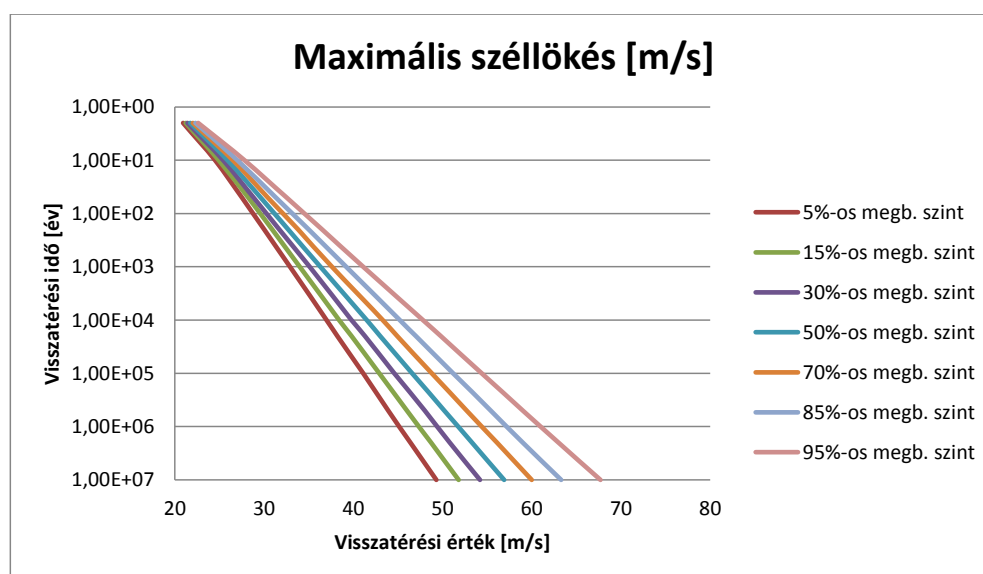
ahol N az évek száma, esetünkben $N=10$, r pedig a $v \geq V$ esetek száma. A 16. táblázat tartalmazza a számítás eredményét is. A P_E kiszámítható, ha ismerjük a sebességek valószínűségi sűrűség-függvényét $p(v)$. Akkor a $P(v \leq V)$ az alábbi módon számítható ki:

$$P(v \leq V) = \int_0^V p(v) dv. \quad (15)$$

A meghaladási valószínűség $P_E(V)$ pedig

$$P_E(V) = 1 - P(v \leq V) = 1 - \int_0^V p(v) dv. \quad (16)$$

Itt a $p(v)$ GEV I típusú extrém-érték eloszlás (például Gumbel vagy Fischer-Tippett I eloszlás), amelynek paraméterei függenek a konkrét régió meteorológiai viszonyaitól. A tervezés alapjába tartozó, megadott meghaladási valószínűségi szélsőbesség így meghatározható, amelyet a 39. ábra illusztrál, ahol a paksi telephelyre meghatározott szellőkés veszélyeztetettségi görbéi láthatók.



39. ábra Szellőkés veszélyeztetettségi görbék a paksi telephelyre

18.3. TORNÁDÓ

A tornádók kialakulása minden esetben nagyon erőteljes konvektív folyamatokhoz köthető. Konvekciónak a koncentrált, függőleges feláramlást nevezzük, melynek következtében alakulnak ki a szabad szemmel láthatatlan „meleg légelemek” (termikek), az egyszerű gomolyfelhők, vagy akár a nagy kiterjedésű zivatarfelhők, zivatarrendszerek is. Feláramlást több tényező is generálhat:

- megfelelő mértékű légköri felhajtóerő (pl. intenzív napsütés hatására)
- összeáramlás, konvergencia (pl. domborzat hatására vagy hidegfront mentén)
- a szél iránya a magassággal változzon (ezt szélnyírásnak nevezzük, örvénylest tud létrehozni)

Ha a zivatarcella belsejében intenzív, és sokáig fennálló konvekció figyelhető meg (ez könnyen megtörténhet, ha a zivatarfelhő nem mozog túl gyorsan, így egy stabil rendszerként működhet, anélkül, hogy a környezetből bekeveredő hideg levegő lecsökkentené az energiáját), valamint légkör különböző rétegei közt nagy hőmérséklet- és páratartalombeli különbség áll fenn (nagy a labilitás), és a szélnyírás is pont megfelelő mértékű, akkor a zivatarfelhő függőleges tengely mentén forogni, rotálni kezd, úgynevezett szupercella alakul ki. A szupercellák hosszú életű, forgó zivatarok, melyekben óriási energiák tudnak hasznosulni. A felhőtető akár 10 km magasságig is felnyúlhat, a felsőlégkör szintjéig. Ott található a nagy sebességű futóáramlatok (jetek), melyek, ha éppen a cella fölött futnak, szívóhatást idéznek elő a felhő belsejében, és a felhő belseje, valamint a környezet levegője között kialakuló nyomáskülönbség miatt örvényleő mozgás alakul ki a felhőtetőtől a felhőalap felé haladva. Ha elég nagy a nyomáskülönbség, az örvény "kiléphet" a felhőből, s megjelenik a "tuba". Ha a tuba leér a felszínre, akkor tornádónak nevezzük. A forgó levegőtölcsért általában a talajról felkapott por és szemcsék színezik meg, ezért igen látványosak ezek a jelenségek.

Alapvető irodalomnak tekinthetjük a [65], [66], [67] és [68] munkákat. A tornádót a translációs és rotációs a sebessége, a tornádó magjának elhaladáskor várható maximális nyomáskülönbség s a tölcser sugara jellemzi. A tornádókat romboló hatásuk és paramétereik alapján a Fujita-skálán rangsoroljuk, lásd a 17. táblázatot.

17. táblázat A Fujita-skála szerinti maximális sebességek

skála	sebesség, km/h
F0	65-115
F1	116-180
F2	181-250
F3	251-330
F4	331-420
F5	421-510

A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzőinek meghatározásához általános útmutatót ad a NAÜ SSG-18 [60] dokumentuma.

Alkalmazható mintát az USA NRC Regulatory Guide 1.76 [69] ad, amely előírja, hogyan kell meghatározni és jellemezni a tervezési alapba tartozó tornádót és a tornádó keltette repülő tárgyakat. A tervezési alapba az új atomerőművek esetében következetesen a 10^{-7} /év meghaladási gyakoriságú maximális szélesebességet, illetve az ezt okozó tornádót kell figyelembe venni.

Az NRC szabályozás szakmai alapját a NUREG/CR-4461 [67] képezi. A NUREG/CR-4461 Revision1 találati valószínűséget a NUREG/CR-4461, Revision 1, pontmodellben a romboló hatást pedig a módosított Fujita skála szerint kezelte, a NUREG/CR-4461, Revision 2 már figyelembe veszi a telephely, illetve az objektum véges méreteit és a romboló hatást a maximális sebességgel korrelálta. A célterület méretének figyelembevétele ésszerű, hiszen a tornádó hatásterület szélessége néhány métertől néhány tíz méterig terjedhet, a nyoma akár több kilométer is lehet. A NUREG/CR-4461 alapján a pontmodell számítási eljárás lényege a következő:

Legyen $P(v \geq V)$ a sebesség adott értékének meghaladási valószínűsége az adott geometriai pontban. Ezt kiszámíthatjuk, mint

$$P(v \geq V) = P_1 * P(v \geq V|s). \quad (17)$$

ahol P_1 annak éves valószínűsége, hogy az adott pontot tornádó sújtja, azaz

$$P_1 = f \frac{A_{\text{tornádó}}}{A_{\text{referencia}}} \quad (18)$$

ahol $A_{\text{tornádó}}$ -val jelöltük a tornádó által súlytott területet az $A_{\text{referencia}}$ referencia területen (például 100km²) belül, f a tornádó gyakorisága a referencia területen. A P_1 átlagos értéke az USA-ban $1,87 \cdot 10^{-4}$ /év, az 5 és 95 százalékos konfidenciájú értékei pedig $1,72 \cdot 10^{-4}$ /év, illetve $2,04 \cdot 10^{-4}$ /év. A $P(v \geq V|s)$ feltételes valószínűség felírható mint

$$P(v \geq V|s) = \frac{A_{\text{tornádó}, v \geq V}}{A_{\text{tornádó}}} \quad (19)$$

ahol az $A_{\text{tornádó}, v \geq V}$ az a tornádó sújtotta terület, ahol a sebesség a megadottnál nagyobb volt. A $P(v \geq V|s)$ Weibull eloszlással leírható:

$$P(v \geq V|s) = \exp \left[- \left(\frac{v-65}{a_p} \right)^{b_p} \right] \quad (20)$$

ahol a 65 a minimális tornádó szélesebbség, az a_p és b_p pedig konstansok.

Az objektum véges méreteit figyelembe vevő eljárás megtalálható a NUREG/CR-4461, Revision 2-ben (Ramsdell, Rishel, 2007). Itt a keresett valószínűség $P_o(v \geq V)$ kiszámítható, mint

$$P_o(v \geq V) = P_o * P(v \geq V|s). \quad (21)$$

de P_o annak éves valószínűsége, hogy az objektumot a tornádó sújtja, azaz

$$P_1 = f \frac{A_{\text{tornádó}}}{A_{\text{referencia}}} = f \frac{w_o L_t}{A_{\text{referencia}}} \quad (22)$$

ahol $A_{\text{tornádó}} = w_o L_t$ azaz az objektum jellemző mérete, w_o megszorozva a tornádó nyomának hosszával, L_t . Továbbá

$$P_o(v \geq V|s) = \frac{L_{t,v \geq V}}{L_t} \quad (23)$$

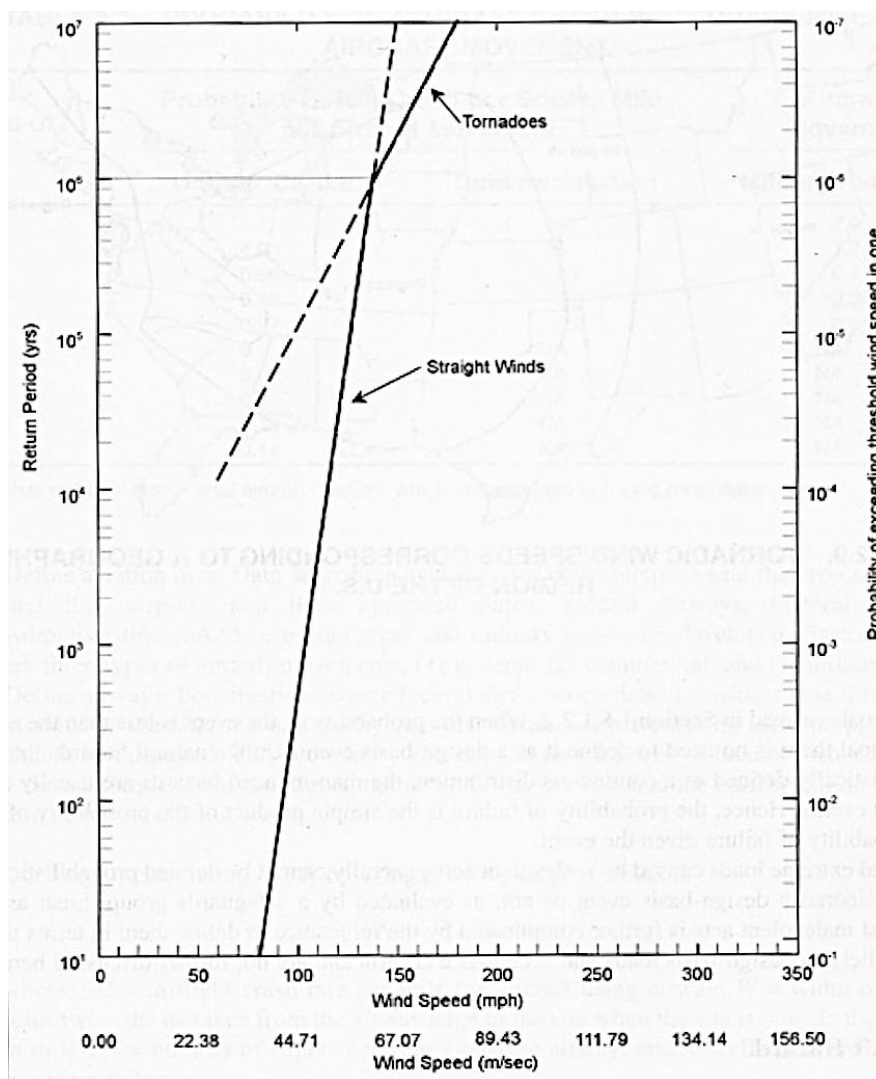
ahol $L_{t,v \geq V}$ az adott sebességet meghaladó tornádók teljes hossza. A teljes valószínűség a (22) és (23) egyenletek összege.

A Regulatory Guide 1.76-ban az NRC az USA területét három zónára osztotta fel, amelyekre meghatározta a 10-7/év meghaladási valószínűségű szél-sebességet okozó tornádó jellemzőit, ahogy azt a 18. táblázatban láthatjuk.

18. táblázat A tervezési alapba tartozó tornádó jellemzői az USA-ban

régió	sebesség			a max. rotációs sebesség sugara, m	nyomás- esés, mbar	nyomásesés sebessége mbar/s
	maximális	transzlációs	rotációs			
	m/s					
I	103	21	82	45,7	83	37
II	89	18	72	45,7	63	25
III	72	14	57	45,7	40	13

Magyarország mérsékelten tornádó-veszélyeztetett. Itt érvényes az a törvényszerűség, hogy a tervezési alapot meghatározó 10^{-4} éves meghaladási valószínűségi szintnél (éves gyakoriságnál), vagy akár az élettartamra vetített 0,005 meghaladási valószínűségi szintnél a széllelkések sebessége és romboló hatása nagyobb, mint a forgószeleké. Ez az viszony visszajára fordul a 10^{-6} /év gyakoriságoknál. Következésképp a tervezés alapját az ilyen adottságú telephelyeken a széllelkések határozzák meg, de a biztonsági elemzéseknél, a 10^{-6} /év körüli és annál kisebb tartományokban már feltehetően figyelembe kell venni a tornádót is.



40. ábra A széllelkések és a tornádók gyakorisága az USA nem tornádó-veszélyes területeire

A forgószél dinamikus hatásán túl a szél által generált repülő tárgyak veszélyét is figyelembe kell venni a tervezésnél. Kétféle hatást lehetőségét kell vizsgálni, a penetráció és az ütközés veszélyét.

Az elsőt az olyan felkapott tárgyak okozzák, amelyek ütközési keresztmetszete kicsi (átmérője $\leq 100\text{mm}$), tömege nem nagy ($\geq 30\text{kg}$), ám a sebessége jelentős, megközelítheti a tornádó sebességének 0,6-szorosát. A tipikus ütközési veszélyt a szél által sodrott nagytömegű tárgy okoz, mint például egy közel két tonnás személyautó, amely a tornádó sebességének 0,2-szeresével sodródhat.

A Regulatory Guide 1.76 szerint tervezési alapba tartozó tornádó keltette repülő tárgyak jellemzői 19. táblázatban láthatók.

19. táblázat A tornádó keltette repülő tárgyak jellemzői

repülő tárgy típusa		Schedule 40 cső	gépkocsi	tömör acél golyó
méretek		D=0,168m L=4,58m	I. és II. régió: 5x2x1,3m	0,254m
			III. régió: 4,5x1,7x1,5m	
tömegek		130kg	I. és II. régió: 1810kg	0,0669kg
			III. régió: 1178kg	
$C_D \frac{A}{m}$		0,0043 m ² /kg	I. és II. régió: 0,0070 m ² /kg	0,0034 m ² /kg
			III. régió: 0,0095 m ² /kg	
V_{Mh}^{max}	I	41 m/s	41 m/s	8 m/s
	II	34 m/s	34 m/s	7 m/s
	III	24 m/s	24 m/s	6 m/s

Az extrém szélre történő tervezés tipikus követelményeit adja például a DoE-1020 jelű szabvány, amely szerint a tervezésnél a 20. táblázatban adottakat az alábbiakat kell figyelembe venni, a tervezés tárgyát képező létesítmény kockázati kategóriájától függően. Ez lehet segítségünkre, amikor nem atomerőmű tervezésről, vagy ellenőrzéséről van szó, hanem kutató reaktorról, vagy kiégett üzemanyag-tárolókról.

20. táblázat Tervezési alap és terhek szél és tornádó esetén a DoE-1020 szabvány alapján

	Kategória	1	2	3	4
szél	Éves meghaladási valószínűség.	2x 10 ⁻²	2x 10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴
	Fontossági tényező	1,0	0,7	1,0	1,0
	Repülő tárgy kritérium	NA	NA	~50x100mm keresztmetszetű, ~7kg tömegű gerenda, ~80km/h vízszintes, ~4,6m magasan	~50x100mm keresztmetszetű, ~7kg tömegű gerenda, ~80km/h vízszintes, ~4,6m magasan
tornádó	Éves meghaladási valószínűség.	NA	NA	2 10 ⁻⁵	2 10 ⁻⁶
	Fontossági tényező	NA	NA	1,0	1,0
	Légnyomás-változás	NA	NA	2kPa, 1kPa/s	6kPa, 52,4kPa/s
	Repülő tárgy kritérium	NA	NA	~50x100mm keresztmetszetű, ~7kg tömegű gerenda, ~80km/h vízszintes, ~4,6m magasan; ~75mm átmérőjű, ~34kg tömegű acélcső, ~80km/h vízszintes, ~56km/h függőleges sebességgel, ~22m magasan;	~50x100mm keresztmetszetű, ~7kg tömegű gerenda, ~80km/h vízszintes, ~4,6m magasan; ~75mm átmérőjű, ~34kg tömegű acélcső, ~80km/h vízszintes, ~56km/h függőleges sebességgel, ~22m magasan; ~1400kg tömegű autó, ~40km/h sebességgel sodródik

NA – nem releváns

18.4. A REFERENCIA ÉS A PAKSI TORNÁDÓ VESZÉLY ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az orosz referenciák esetében a tornádó-veszély meghatározásának alapját a PB-022-01 szabvány képezi.

A paksi telephely, a referenciák és az NRC Regulatory Guide 1.76 összehasonlításához a jellemző adatokat a 21. táblázat tartalmazza

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

		I.19 ¹³	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 ⁻⁴ !?	14	?	10 ⁻⁷		
			10 ⁻⁴ /év/1000km ²				
intenzitás F		F1-F2	F2,75	F3,6			
osztály (<i>K_r</i>)	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 19. táblázatban		

Bár a referenciaként megadott adatok nem konzekvensek, azok burkolják a paksi telephely jellemzőit.

19. ÁRVIZEK, HIDROLÓGIAI VESZÉLYEK

A hidrológiai körülmények és szélsőségek vizsgálatának általános elveit és követelményeit a NAÜ SSG-18 [56] dokumentuma tartalmazza. A hazai relevanciát tekintve a folyami áradások (jeges- és zöldár), az al- és felvízi létesítmények sérülése által okozott árhullámok, s az alacsony vízszint, vízhozam, illetve a végső hőelnyelő rendelkezésre állása jelent biztonsági problémát, amelyet a tervezési alapban megfelelően figyelembe kell venni.

Árvízvédelmi szempontból elsődleges a vízállás- és vízhozam-eloszlások extrém értékeinek és a magas kvantilisoknak a meghatározása az éves maximumok modellje, a szint feletti maximumok modellje, vagy az idősorok modellje alapján. A témának kiterjedt irodalma van. A paksi telephely hidrológiai jellemzése reprezentatív adatsorokra, s számos aspektusból modellkísérletekre és részletes elemzésekre alapul. A legújabb elemzések az új blokkok környezeti hatásvizsgálata keretében készültek, lásd a Paksi Atomerőmű VBJ 2. kötetét és a [72] munkát.

Determinisztikus elemzést kell végezni az al- és felvízi létesítmények sérülése által okozott vízszint növekedés kiszámítására, amennyiben az al- és felvízi létsítmények sérülésének valószínűsége ezt indokolja. *Ezt a veszélyt a paksi telephely esetében elemzéssel kiszűrték, hasonlóképp kiszűrték a balti telephelyen.*

¹³ Állítólag a VBJ 2.3.2.2 alapján.

A hűtővíz ellátás szempontjából több hidrológiai és meteorológiai jellemző együttes előfordulását kell vizsgálni:

- minimális vízszint,
- előírt tartósságú (1, 5, 30 nap) minimális vízszint,
- előírt tartósságú (1, 5, 30 nap) minimális víz hőmérsékletek és léghőmérsékletek.

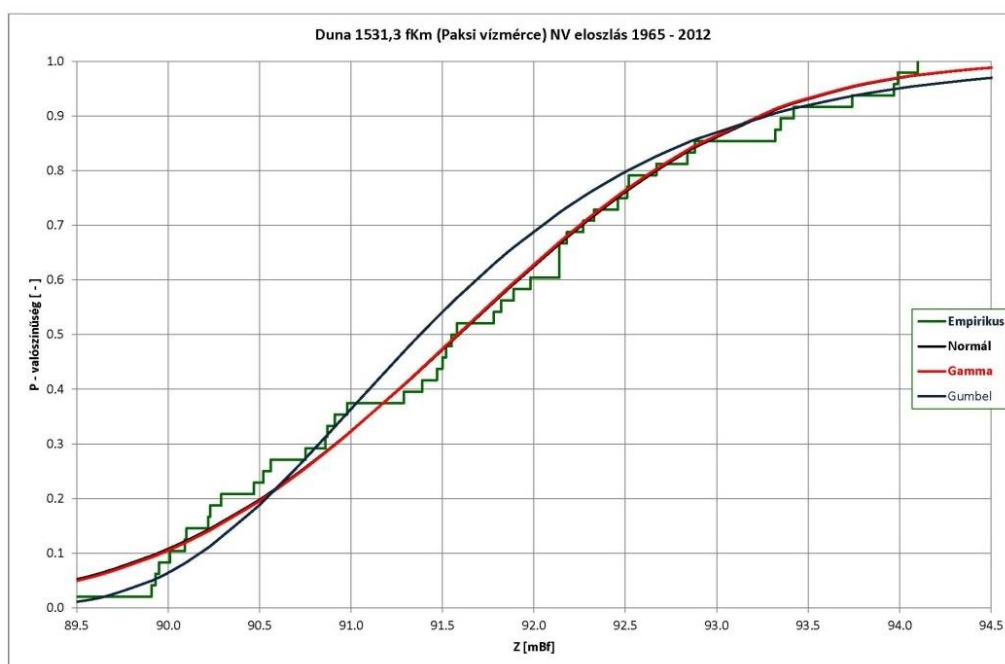
Ezek a jellemzők, illetve együtt hatások szükségesek a

- a hűtőtelijesítmények és rendkívüli intézkedések meghatározásához,
- a hűtővíz szivattyúk telepítéséhez és megbízható működéséhez,
- a természetes víztest hőterhelésének kiszámításához.

A biztonságos hűtés és a víztest, mint végső hőelnyelő elérésének problémája lehet az extrém jégképződés, a befagyott víztestből történő szivattyúzás kérdése. Ezt vizsgálni kell a tervezési alap, illetve a tervezési alap kiterjesztését tekintve, hasonlóan, mint az extrém magas víz hőmérsékletek és kis vízhozamok kérdését.

Sajátos hidrológiai veszélyeknek tekintjük a folyami uszadékot, hordalékot, amely blokkolhatja a hűtővíz kivételt, vagy eltömődésekhez vezethet. Veszélyt jelenthet a hűtővíz-rendszer biológiai terhelése, amely úgyszintén blokkolhatja a hűtővíz rendszert. Ezeket a normálüzem tervezési alapjának meghatározásánál figyelembe kell venni és eszközöknek, intézkedés-terveknek kell rendelkezésre állni arra az esetre, ha a tervezési alapot meghaladó mértékű, a vízkivételt és a hűtőrendszert blokkoló jelenség áll elő.

A paksi telephely hidrológiai jellemzése korszerű és 2014-ben frissített; [72]. A mértékadó árvízszint az erőmű Duna szelvényében (Duna 1527 fkm), MÁSZ2010-től = 94,10 mBf, „A folyók mértékadó árvízszintjeiről” szóló hatályos, 11/2010. (IV. 28.) hatályos KvVM rendelet szerint. A 10^{-5} /év gyakoriságú árvízszint értéke 96,22 mBf, azaz több mint 2 m-rel meghaladja a jogszabály szerinti (100 évente visszatérő) mértékadó árvízszint értéket, de még mindig a 96,30 mBf árvízvédelmi koronaszint alatta marad, illetve a bal parti töltéskoronán - ami 95,80 mBf koronaszintű -, átbukik. A 2013. évi árhullám tetőzési szintje az erőmű szelvényében (Duna 1527 fkm) 94,06 mBf volt. A telephely hidrológiai jellemzőinek illusztrálására szolgál az 41. ábra.

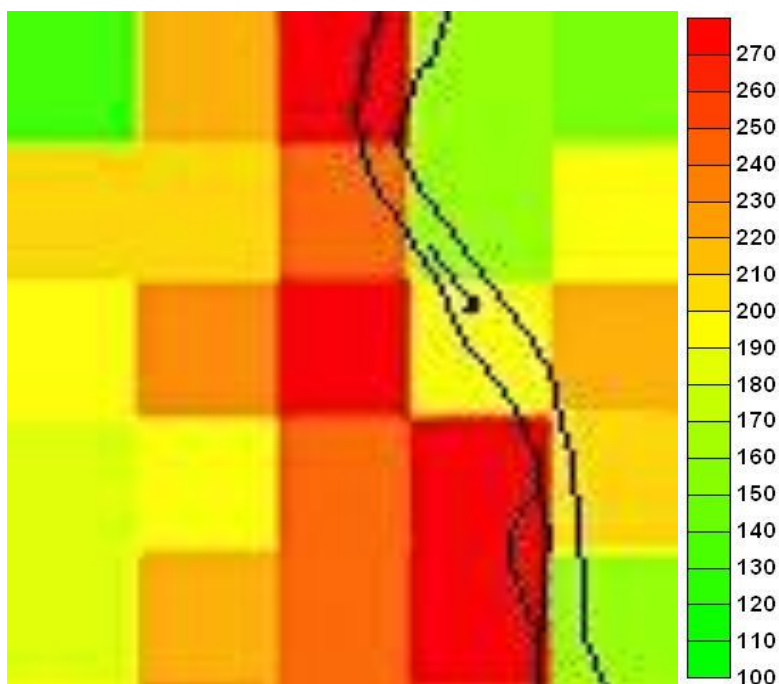


41. ábra Jégmentes nagyvízszintek (NV) eloszlásfüggvénye (1965-2012) – Duna 1531,3 fkm

A paksi telephelyen hidrológiai veszélyekkel, sem az árvíz, jeges ár, felvízi létesítmény hibája folytán nem kell számolni. Nem biztonsági hanem, üzemeltetési problémát jelenthet a kisvíz, különösen, ha az igen magas hőmérsékletekkel esnek egybe.

20. VILLÁMLÁS

A jogszabályok szerint, a villámvédelem tervezéséhez, meg kell határozni a villámcsapás kockázatát. A paksi telephely jellemzői a VBJ „2.3.2.4 Villámcsapás kockázata” c fejezetében találhatók. Illusztrációként szolgál a 42. ábra.



42. ábra Felhő-felhő és felhő-föld villámok száma 2008-2012 között Paks 10×10 km-es körzetében
(Fekete vonallal a Duna látható, a nyíl a folyás irányát jelképezi. A kis négyzetek 2×2 km-esek)

21. BIOLÓGIAI VESZÉLYEK

Az NBSZ 3a előírja az esetleges biológiai veszélyek számbavételét, bár elég nyilvánvaló, hogy ez a követelmény inkább a nemzetközi elvárások áthallása, mintsem a jelen viszonyok közötti paksi telephelyi realitás. A biológiai veszélyek, mint a sáskajárás, denevér-rajok, a szellőző rendszerek, míg a vizi flóra és fauna a hűtővíz-ellátást veszélyezteti. A vizi flóra és fauna hűtővíz rendszerben való megtelepedése mindenekelőtt üzemeltetési, karbantartási gondot okoz, s jól kontrollálható. A paksi hidegvíz csatorna tisztítása jó példa az üzemeltetői intézkedésekre. (Sajátos biológiai veszély a pihentető medence hűtőcsövei biológiai korróziója, vagy a loktorony „gombásodása”).

II. rész Antropogén, technogén külső veszélyek

22. AZ ANTROPOGÉN, TECHNOGÉN VESZÉLYEK SAJÁTOSSÁGAI

Az NBSZ 3a előírja az emberi tevékenységből eredő (antropogén vagy technogén), az atomerőmű biztonsága szempontjából releváns veszélyek meghatározását, jellemzését és szükség szerint a tervezés alapjában való figyelembe vételét. A veszélyek kiszűrhetők távolsági elven, illetve valószínűségi alapon, ha azok bekövetkezésének gyakorisága kisebb egy megadott szintnél, például mint 10^{-7} /év.

A technogén veszélyek általános értékelésének elveit és követelményeit a NAÜ NS-G-3.1 dokumentuma tartalmazza [73]. Mértékadó példát szolgáltatnak az US NRC Standard Review Plan, a NUREG-0800 [74] 2. és 3. fejezete és az ott hivatkozott NRC dokumentumok.

A telephelyen, illetve annak környezetében folyó ipari, szállítási tevékenység során bekövetkező balesetek veszélyeztethetik az atomerőművet a bekövetkező robbanás, tűz, toxikus gázfelhő, repülő tárgy, stb. formájában. Ezek az események általában több módon is hatnak a létesítményre. Így egy repülőgép lezuhanás hatása lehet az ütközés, robbanás, tűz, de ugyanilyen hatása lehet például egy szállítási balesetnek is. Az antropogén veszélyeket és azok hatásait mutatja be a 22. táblázat.

22. táblázat Az ember okozta események és hatások lehetséges összefüggése

	Repülőgép rázuhanás	Ipari vagy katonai objektumok balesetei	Közlekedési, szállítási (közúti, vízi) balesetek	Telephelyen kívüli tüzek	Hajó, uszádék ütközése
Robbanások	x	x	x	x	x
Mechanikai hatás (közv.)	x	x			x
Korrozív gázok és folyadékok		x	x		
Tüzek	x	x	x	x	
Füst	x	x	x	x	
Toxikus gázfelhő		x	x		
Repeszek, repülő tárgyak	x	x	x		x

Az x-szel nem jelölt helyeken vagy nem jellemző a hatás, vagy másodlagos.

A veszélyek relevanciája a legtöbb esetben csak egyéb körülmények figyelembe vétele mellett ítéltető meg, mint topografikus és meteorológiai körülmények, illetve a telephelyen az épületek elhelyezkedése, amelyek a hatást módosítják (terjedés, hígulás, árnyékolás).

A relevanciát befolyásolja maga a konstrukció, például az, hogy a biztonság szempontjából fontos technológiát magában foglaló vitális épületrészek mekkora célfelületet kínálnak.

Nyilvánvaló, hogy a külső, emberi tevékenységből eredő események tervezési alapba történő szerepeltetése kizárólag valószínűségi alapon nem dönthető el, mert lehetnek olyan események, amelyek gyakorisága szint felett van, de hatása a telephelyre semleges, amely kérdés eldöntéséhez egyéb körülmények mérlegelésére, vagy valamilyen determinisztikus elemzésre van szükség.

23. AZ ANTROPOGÉN VESZÉLYEK A PAKSI ÉS A REFERENCIA TELEPHELYEN

A veszély azonosítása és jellemzése a 4. 5. és 6. fejezetekben foglaltak szerint történik. A vizsgálat történhet tevékenységenként, s hozzárendelve minen lehetséges hatást, vagy hatásonként, számbavéve minden lehetséges forrást. A tervezési alap meghatározása a burkoló elv alkalmazásával történik.

A VBJ-hez korábban, és a 2014-ben elvégzett elemzések tevékenységenként, azaz közúti szállítás, légiközlekedés, folyami közlekedés, ipari és katonai tevékenységek szerint történtek, s e tevékenységek hatásait, annak biztonsági relevanciáját azonosították, kombinálva a gyakoriság alapján való szűrést és a determinisztikus hatáselemezést a távolsági elven való szűréshez.

A referencia atomerőmű esetében, a BaltiEBJ (2.2 fejezet) tanúsága szerint, a vizsgálat hatásonként történt, az alábbiak szerint:

- A külső okból bekövetkező tüzek esetében azonosítottak minden lehetséges forrást, s ott az esemény-gyakoriságot azonosítottak, függetlenül attól, hogy az természetes, mint az erdők, tőzeglételek, stb. vagy technogén, mint a szállítás, közlekedés, majd vizsgálták, hogy a hatás elérheti-e az atomerőművet. Ilyen elemzés alapján kiszűrték a tűzveszélyt, minden forrást együttesen tekintve, amellett, hogy a telephely közeli szállítást az NP-064-05 1. melléklete szerint 3 kategóriájú veszélynek minősítették.
- Hasonlóképp történt a robbanás-veszély elemzése is, amelyben a telephelyen belüli és kívüli lehetséges forrásokat számba vették. Itt a típusterv tervezési alapja burkolja a telephelyi hatást. Részleteket a 24 fejezetben közlünk.
- Kiszűrték a talajvíz szennyeződés veszélyét is (ezt esetünkben külön veszélyként nem kezeltük).
- Megállapították, hogy a robbanás-veszélyes, gyúlékony, mérgező gázok és aeroszolok kiszabadulásának veszélyét tekintve a közúti ammónia és klór szállításból származó kibocsátással számolni kell. Védelmi intézkedéseket kell tenni, ha egy szállítmány ammónium szabadulna ki az atomerőmű bekötő útján, de a főépület esetében már a személyzet nem kerülhet a halálos koncentráció zónájába.
- Kőolajtermékek közúti és vízi szállításából eredő, a hűtővíz-rendszerre ható veszélyt kiszűrték.

Az orosz normatív alapot a NP-064-05, NP-001-97, NP.006-98, NP-032-01, NP-064-05, RB-021-01 normatív dokumentumok képezik. A veszély súlyosságának megítélése a az NP-064-05 1. melléklete szerint történik. A súlyosság lényegében a hatás kifejlődésének sebessége és a hatás mértéke szerint határozható meg. Például a robbanás esetében a 30 kPa lökéshullám-nyomás I., a 10 és 30 kPa közötti a II. és 10kPa alatti a III. kategóriába tartozik.

A hazai vizsgálati módszertan mindig egy adott tevékenységből és annak baleseti statisztikáiból indul ki, mint például veszélyes szállítmánnyal közlekedő jármű. Majd a lehetséges veszélyes szállítmányok eloszlását veszi számításban, s szállított anyagoként a balesete következményeit. Ezt követően az orosz gyakorlathoz hasonlóan történik a hőhatás, a kiszabadult anyag terjedése, a robbanás lökéshullám-csillapodás determinisztikus számítása. A hatás minősítése szabványok szerint, vagy empirikus kár-kritériumok szerint történik, ahogy ezt a későbbiekben a robbanás példáján bemutatjuk.

Az ipari, katonai tevékenység veszélyeit a [84] és [85] munkákban vizsgálták, és összefoglalóan a 23. táblázatban láthatók ennek eredményei. A közlekedés, szállítás – kivéve a repülőgép rázuhanást – tevékenység veszélyeit pedig a 24. táblázatban láthatjuk. Megállapítható, hogy – eltekintve a repülőgép rázuhanás veszélyétől – a referencia adatok összhangban vannak a paksi adatokkal.

23. táblázat A vizsgált ipari és katona tevékenységek és következményeik

Esemény helye		Anyag	Kikerülés módja	Eléri-e a hatás a telephelyet?
Veszélyes ipari létesítmények	Vitafoam Magyarország Kft.	TDI	Égés	nem
		Késztermék	Égés	nem
	MOL üzemanyagtöltő állomás (Paks)	Benzin	BLEVE nyomás	nem
			BLEVE hőhatás	nem
MVM Paksi Atomerőmű Zrt. és a Kiegészítő Kazetták Átmeneti Tárolója	Paksi atomerőmű	Ammónium	Tartálysérülés I.	igen
		Ammónium	Tartálysérülés II.	igen
		Ammónium	Tartálytörés	igen
		Hidrazin	Vezetéksérülés	nem
	KKÁT	N ₂	Tartálytörés	nem
E.ON nagyközép-nyomású gázvezeték	Legközelebbi pont	Földgáz	Vezetéktörés	nem
			Jet fire	nem
			Késői robbanás	nem
Katonai létesítmények	-	-	-	-

24. táblázat A közlekedés, szállítás eseményei és következményeik

Esemény helye		Anyag	Kikerülés módja	Hatása eléri a telephelyet?
Közút	6-os számú főút	Ammónia	Tartálytörés	igen
			Tartálysérülés	igen
		Klór	Tartálytörés	igen
			Tartálysérülés	igen
		Sósavgáz	Tartálytörés	igen
			Tartálysérülés	igen
		Szénhidrogén	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		Üzemanyag	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		PB gáz	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
	M6-os autópálya	Ammónia	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		Klór	Tartálytörés	igen
			Tartálysérülés	igen
		Sósavgáz	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		Szénhidrogén	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		Üzemanyag	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		PB gáz	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
		Acetilén gáz	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	nem
Vasút	Paksi állomás	Sósavgáz	Tartálytörés	nem
			Tartálysérülés	igen
Folyam	Duna	Veszélyes anyag	Baleset	nem
Paksi Atomerőmű KKÁT	Paksi Atomerőmű	Ammónia	Tartálytörés	igen
	KKÁT	N ₂	Tartálytörés	nem

24. ROBBANÁSOK

A robbanás nagy sebességű energia-felszabadulással járó fizikai-kémiai folyamat, amely lehet detonáció, azaz a levegő oxigénje nélkül zajló kémiai folyamat, vagy deflagráció, a levegő oxigénjével zajló kémiai folyamat. A robbanás a levegőben a hangnál nagyobb sebességgel terjedő lökéshullámot hoznak létre. A robbanások hatás-mechanizmusait a 25. táblázat mutatja.

25. táblázat A robbanások hatás-mechanizmusai

A robbanások hatása	Terhelés
Robbanáshullám	Diffrakciós teher- a közvetlen és a visszaverődő hullám miatt
Robbanás-szél	Áramlási ellenállás okozta erő
Repülő tárgyak, repeszek	Ütközés
Talajrezgés, szeizmikus hatás	Inercia-erő
Hőhatás	Tüzek keletkezése
Biológiai	A dobhártya átszakadása, tüdő összeroppanása, halál a légnyomás hatására, hang, hő, füst hatása, stb.

Az értékelésnél általában a TNT (trinitro-toluol) egyenértékre vonatkoztatott empirikus összefüggéseket szoktak alkalmazni a robbanás keltette nyomáshullám jellemzői, illetve a távolsággal való csillapodás kiszámítására. A TNT egyenérték szilárd robbanóanyagokra empirikusan megállapított, százalékban kifejezett TNT ekvivalens. Robbanó gáz/gőzfelhőre a TNT egyenérték az alábbi képlettel számolható:

$$TNT = \alpha_c \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \quad (24)$$

ahol α_c – a TNT (energia) egyenérték tényező

W_f – a robbanó anyag tömege [kg]

H_f – a robbanó anyag égéshője [J/kg]

H_{TNT} – a TNT robbanási energia [J/kg], =4,52MJ/kg

A robbanások hatását, következményeit a 26. táblázat mutatja a csúcs túlnyomás függvényében az [75] alapján.

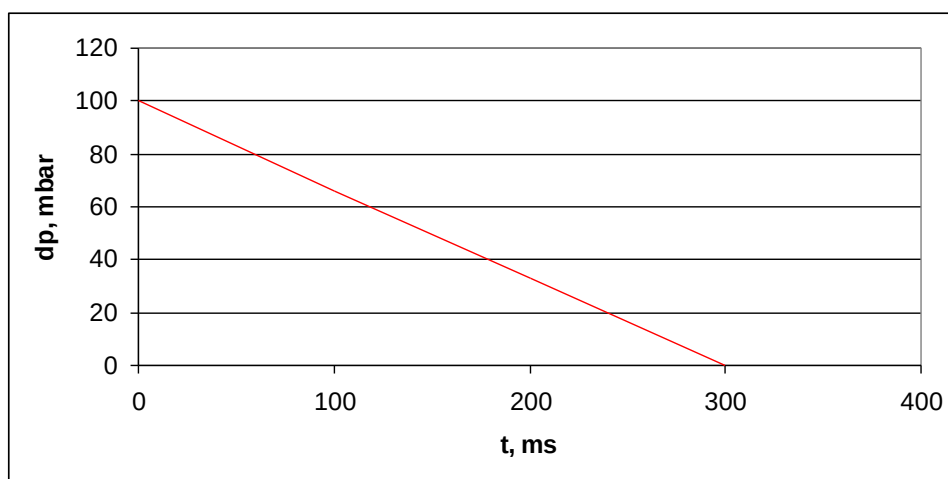
26. táblázat A robbanás várható következménye a túlnyomás függvényében

Egyenértékű statitikus nyomás, (bar)	Következmények a szerkezeteken	Személyi sérülések
~0,015	üvegtáblák, ablakok betörnek	nincs személyi sérülés
> 0,03	jelentősebb helyreállítás igénylő károk (kozmetikai károk)	személyi sérülések az üveg-cserepektől, lezuhanó tárgyaktól
>0,07	kisebb károk vasbeton épületekben. a tégláépületekben, könnyűszerkezetes épületekben súlyos károk.	a törmelékek személyi sérüléseket okoznak
>0,14	lokális szerkezeti sérülések a vasbeton szerkezetekben, a téglá és könnyűszerkezetes épületek összeomlanak	jelentős személyi sérülések, esetleg halálesetek
>0,21	lakóházak összedőlnek	súlyos sérülések és gyakori halálesetek
> 0,70	teljes összeomlás minden nem robbanásra tervezett épület esetében	csaknem 100%-ban halál
> 1,38	nehéz vasbeton épületek is sérülnek és összedőlnek	100%-ban halálos

Az emberi dobhártya sérülésének küszöbértéke 35kPa effektív statikus csúcsnyomás, s $P \approx 1$ valószínűséggel beszakad a dobhártya, ha a túlnyomás csúcs eléri a 150 kPa értéket. Az emberi tüdő sérülésének küszöbértéke ≤ 1 bar, s a sérülés súlyos, ha a nyomás-csúcs eléri a 200kPa értéket. A halálos nyomáscsúcs küszöbérték 250-300kPa, a biztos halál beáll, ha a nyomáscsúcs ≥ 500 kPa. A károsodás függ az impulzus hosszától is.

Amennyiben a robbanást a tervben figyelembe kell venni, jellemezni kell a robbanás méretét és ennek megfelelően várható hatását. Praktikus útmutatót találunk az NRC Regulatory Guide 1.91 dokumentumban [87] és az ott hivatkozott irodalmakban. A tárgyra vonatkozó szabványok megadják a robbanás által kiváltott nyomáshullám, talajrengés, stb. kiszámításának jórészt empirikus képleteit, amelyek segítségével a létesítményt érő hatás kiszámolható, ami a tervezési alapba tartozó inputként szolgál. A nyomáshullám által okozott terhet jellemzi a 43. ábra. Az EPR tervezésénél (az EUR alapján) ezt a terhelési görbét veszik figyelembe (UK EPR, [77]).

A robbanás hatásaira megfelelő védelmet is lehet tervezni, ekkor ez az input nem magának a létesítménynek, hanem a védműnek a tervezési alapját képezi. A robbanások értékelésére hasznos információt tartalmaz például [75]÷[81] irodalmak. Robbanásra való tervezésnél figyelembe kell venni a nyomáshullám visszaverődését is, amely a romboló hatást lényegesen növelheti.



43. ábra A robbanás terhelési görbéje

A típusterv/referencia atomerő esetében PiN AE-5.6 [76] normatív dokumentum szerint $\Delta p_f = 30$ kPa (300mbar) maximális amplitúdójú, $\tau_+ = 1$ 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 referencia esetben az üzemanyag-tartály robbanás a 400 méter távolságban lévő főépületen nagyobb, mint 1kPa lökeshullámot okoz (Balti EBJ 2.3.3.2.4), ami még az üvegtörés határát sem éri el (náluk 2 kPa, ami némileg magasabb, mint a 26. táblázatban lévő érték). Ennek alapján és hivatkozással a PN-064-05 [83] szabványban lévő, a veszélyek súlyosságát kategorizáló I. mellékletre, ezt a veszélyt a második kategóriába sorolják. Megvizsgálták a vasúti üzemanyag-tartály robbanását is, amely 600 m-re a főépülettől, amely esetben már 300 méterre a robbanás helyétől üvegkár alatti nyomás-értéket kaptak. Megvizsgálták úgyszintén 20 t TNT robbanásának hatását az atomerőmű bekötő útján, ami egyes épületek esetében üvegkárokat, illetve könnyű szerkezeti károkat okoz a távolság miatt.

A balti atomerőmű tervezésénél, a repülőgép rázuhanás 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 paksi telephelyre alkalmazható.

25. REPÜLŐ TÁRGY

A biztonságra hatással lévő, az atomerőművet veszélyeztető repülő tárgy keletkezhet a telephelyen és környezetében folyó ipari, szállítási tevékenység során bekövetkező balesetek következményeként. Ezt formálisan külső veszélyként lehet kategorizálni. Ugyanakkor a turbina lapáttörés belső veszély, de a konténment szempontjából külső veszélyként fogható fel. A vizsgálati mód és a hatásmechanizmus sem változik attól, hogy a veszélyt külső vagy belső veszélyként aposztrofáljuk.

A forgógép-sérülés, robbanás keltette repülő tárgy méretének, tömegének, kinetikus energiájának ismeretében a repülés távolságát kiszámíthatjuk, és értékelhetjük, eléri-e a telephelyet, s ha igen, akkor az ütközés konzekvenciáit elemezve meghatározzuk, szignifikáns veszélyt jelenthet-e a repülő tárgy a biztonsági funkciók szempontjából. Az elemzés a nyomás alatti nagyenergiájú rendszerek töréséből, robbanásból vagy forgógép (turbina) sérülésből származó repeszek biztonsági relevanciáját tekintve kombinált, valószínűségi és determinisztikus.

Tapasztalati alapon, vagy egyszerű számítással kell meghatározni a lehetséges hatásokat, mint a penetrációs mélység, átfúródás-veszély, rezgés, stb. és azok következményeit, feltételezve, hogy a becsapódás a lehetséges röppályák figyelembe vételével a létesítmény leginkább érzékeny pontján történik. Nyilvánvaló, hogy a tervezési alap meghatározásának fázisában nem lehet a konkrét műre gyakorolt hatást értékelni, ezért a hatások értékelése típus vagy szabványos céltárgyakra történhet. Ebből az is következik, hogy esetleg bizonyos újraértékelés is szükséges lehet a tervezés későbbi fázisában.

A szél keltette repülő tárgy biztonságra gyakorolt potenciális hatását, s így a tervezési alapba történő felvételét is a tervezés alapját képező szél, tornádó jellemzőinek birtokában lehet elvégezni. Egyes előírások, ahogy ez a 19. táblázatban látható, eleve hozzárendelik a tervezési alapba tartozó tornádóhoz azt a repülő tárgyat, amelyet a tervezésnél figyelembe kell venni.

A repülő tárgy ütközésének éves valószínűségét P_T kiszámíthatjuk az alábbi képlettel:

$$P_T = P_E P_{MR} P_{SC} P_P N \quad (25)$$

ahol P_E a nagyenergiájú rendszer törésének éves valószínűsége,

P_{MR} annak valószínűsége, hogy a repesz eléri a létesítményt,

P_{SC} annak valószínűsége, hogy a repesz a létesítmény vitális részét találja el, P_P pedig annak valószínűsége, hogy a találat pillanatában a repesz energiája elégséges a penetrációhoz vagy olyan másodlagos repeszek keltéséhez, amelyek biztonsági rendszert károsíthat repülő tárgy ütközésének éves valószínűségét, végezetül

N repeszek keletkezésének éves gyakorisága a tervezési alap meghatározásánál vizsgálat tárgyát képező veszélyforrásból.

Amennyiben $P_T \leq 10^{-7}/\text{év}$ a veszély kizárható a további vizsgálatból. Ellenkező esetben számolni kell az adott energiájú repesz hatásával, s megfelelő védelmet kell ezzel szemben tervezni, amely lehet ütközés gátló, árnyékoló fal, stb.

A tárgyra vonatkozóan részletes előírások találhatók a NUREG-0800 2.2.3. és 3.5.1 fejezetében [74], hasznos irodalom például a [80] és [81].

Az eljárás hasonló a létesítményben (konténmentben, vagy a konténmenten kívül) feltételezhető nagyenergiájú rendszerek vagy forgógépek töréséből származó repeszek vizsgálat esetén is [82].

26. VESZÉLYES ANYAG KISZABADULÁSA

Az értékelés tárgyát képezheti még valamely stacionárius vagy mozgó forrásból veszélyes anyag kibocsátása, s felszíni vizekben történő terjedése. A vizsgálat tárgya az, hogy ez az anyag a telephelyet, illetve a létesítményt elérve mennyiségét és koncentrációját tekintve veszélyes-e a létesítmény biztonsága szempontjából. A veszély minősítése az egészségre káros koncentrációk alapján történhet (<http://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/emergency-response-planning-guidelines-erpgs.html>).

A transzport és hígulás számítását egyszerűsített konzervatív eljárással célszerű elvégezni, de léteznek könnyen elérhető szoftverek is erre a célra. A toxikus, fojtó és korrozív gázfelhők, illetve füst esetében az átlagos időjárási és légállapot melletti hígulást és terjedést tételezzük fel. Ugyanígy járunk el a tüzek hőhatásának értékelésénél.

A paksi telephely kiettségének értékelése a veszélyes anyagok tekintetében a VBJ 2. fejezetében található, amelyet a 2007. évi IBF során frissítettek. A telephely vizsgálat aktualizálása 2014-ben megtörtént.

27. REPÜLŐGÉP RÁZUHANÁS

27.1. A TERVEZÉSI ALAPBA, ILLETVE KITERJESZTÉSÉBE TARTOZÁS ATTRIBÚTUMAI

A tervezési alap, illetve a tervezési alap kiterjesztésébe tartozó veszélyek között kitüntetett a repülőgép rázuhanása. A veszélyt a rázuhanás gyakorisága, a lezuhanás és a lezuhanó légijármű jellemzői, a közvetlen és közvetett hatások (lásd 22. táblázat) és ezek paraméterei jellemzik.

A repülőgép rázuhanás tervezési alapba vagy kiterjesztésébe való besorolásának gyakorlata 2001 szeptember 11-óta jelentősen változott és nem teljesen kialakult.

A rázuhanás szűrési szintje a nemzeti szabályozásokban igen kicsi, általában 10^{-7} /év, azaz feltesszük, hogy a szerkezet sérülékenysége (a sérülés feltételes valószínűsége) gyakorlatilag 1, hiszen a hirtelen nagy kibocsátás gyakorisága, mint létesítmény szintű valószínűségi megfeleléségi kritérium is 10^{-7} /év. A tervezési alap meghatározásánál figyelembe lehet venni azt a körülményt, ha jogszabály a telephelyet és környezetét tiltott térnek nyilvánítja a légiforgalom számára.

Egyes nemzeti normákban a repülőgép rázuhanást a gyakoriságtól függetlenül posztulálják. A magyar szabályozás szerint a tervezési alap kiterjesztésénél a katonai és polgári repülőgép becsapódását figyelembe kell venni, feltéve, hogy a tervezési alapnak nem képezi részét. A katonai és polgári repülőgép becsapódás esetére biztosítani kell a TAK1 üzemállapotra vonatkozó követelmények teljesítését. Igazolni kell, hogy az atomerőmű rendelkezik olyan beépített tervezési jellemzőkkel és funkcionális képességekkel, amelyek biztosítják, hogy (lásd az NBSZ 3a kötetén kívül a 10CFR Part §50.150):

- a. vagy az aktív zóna hűtése fennmarad,
- b. vagy a konténment nem sérül, és
- c. a pihentető medence hűtése, vagy integritása fennmarad.

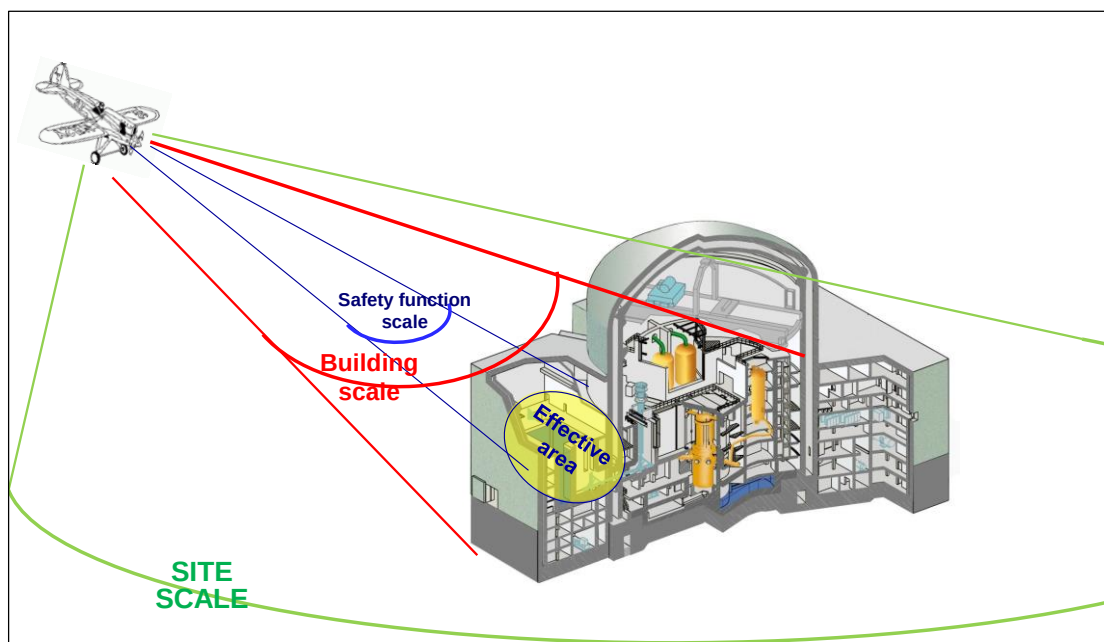
Az USA NRC egyfelől a tervezési alap meghatározásánál vizsgálhatja a rázuhanás valószínűségét a 10^{-7} /év szűrési kritériumot, illetve a repülőterek, gyakorlóterek vonatkozásában ezt a valószínűségi korlátot teljesítő távolság és műveleti gyakoriság kritériumot, lásd a NUREG-0800 3.5.1.6 fejezetét [74]. Ettől függetlenül a 10 CFR 50.150 [2] bekezdésben az NRC kötelezi az engedélyest, hogy végezze el a nagy polgári légijármű rázuhanásának elemzését, s igazolja a fent felsorolt a., b. c. követelmények teljesülését. Az elemzést realisztikus feltételezések alapján, az erőműben rendelkezésre álló eszközök és funkcionális képességek figyelembe vételével, s a kezelők korlátozott beavatkozási lehetőségét feltéve kell elvégezni. A rázuhanásnál a gép jellemzőit (tömeg, üzeanyag mennyiség), rárepülés jellemzőit (sebesség, szög)

lényegében úgy kell megválasztani, hogy az fedje a szándékos rárepülés esetét is¹⁴. Az elemzést a (NEI 07-13 [88]) módszertana szerint kell elvégezni.

A repülőgép rázuhanás veszélye függ attól, milyen a telephely környezetében a légi forgalom jellege. A frekvenciált forgalmú helyek, mint a repülőterek, katonai gyakorló területek és légifolyosók közelében a lezuhanás valószínűsége nagyobb, mint a légtér nem kitüntetett részében. A légijárművek az idő közel negyven százalékát töltik a le- és felszállás műveleteivel a repülőterek közelében. Erre az időre esik a balesetek több, mint kilencven százaléka. Ezért a rázuhanás valószínűségének elemzésénél meg kell különböztetni a repülőtereket (katonai gyakorló területeket), a légifolyosókat és az általános légtérrel. A légtérhasználat jellegét és a légijárművek forgalmi statisztikáit, beleértve a baleseti statisztikákat a nemzeti légiforgalmi hatóságok és nemzetközi szervezetek adatbázisai tartalmazzák¹⁵, mint például [89].

27.2. EFFEKTÍV CÉLFELÜLET

A rázuhanás valószínűségének meghatározásához szükség van az effektív célfelület meghatározására. Az effektív célfelület annak a biztonsági szempontból vitális területnek a vízszintes síkra vett függőleges vetülete, amelyet az adott legkedvezőtlenebb rázuhanási szög mellett a rázuhanó légijármű eltalálhat. Az effektív célfelület meghatározását illusztrálja a 44. ábra [12].



44. ábra Az effektív célfelület meghatározása

Az effektív célfelület meghatározásánál a szomszédos épületek árnyékoló hatását is figyelembe kell venni. Az árnyék az árnyékoló épület függőleges síkbeli kontúrjának a rárepülés szöge alatt vett vetülete a vízszintes síkon.

27.3. REPÜLŐTÉR, GYAKORLÓTÉR

A tapasztalat alapján a rázuhanás valószínűsége kisebb, mint 10^{-7} /év, ha a telephely repülő és gyakorlótérrel vett távolsága és a le- és felszállások száma kisebb, mint a 27. táblázat-ban feltüntetett értékek.

¹⁴ (2) Aircraft impact characteristics.1 The assessment must be based on the beyond-design-basis impact of a large, commercial aircraft used for long distance flights in the United States, with aviation fuel loading typically used in such flights, and an impact speed and angle of impact considering the ability of both experienced and inexperienced pilots to control large, commercial aircraft at the low altitude representative of a nuclear power plant's low profile.

¹⁵ <http://planecrashinfo.com/cause.htm>, <http://aviation-safety.net/database/>, <http://www.nts.gov/aviationquery/index.aspx>.

27. táblázat A repülőgép rázuhanás szűrési kritériuma a távolság függvényében

A rázuhanás valószínűsége <10 ⁻⁷ /év, ha	D= 8-16 km	D>16km	D<8km	A légifolyosótól vett távolság
műveletszám kisebb, mint	<500D ²	<1000D ²	<1000	D>3km a légifolyosó szélétől

Ez példa a veszély távolsági és gyakorisági (művelet) elven való kiszűrésére.

Az táblázat ökölszabályán kívül lehet részletes elemzést is végezni, például lásd a NUREG-0800 3.5.1.6 fejezetben lévő képletet.

27.4. LÉGIFOLYOSÓ

A P_{AC} rázuhanás valószínűségét a légifolyosó használata esetén az alábbi képlettel számolhatjuk:

$$P_{AC} = P_{CR} * N \frac{A}{W_{LF}} \quad (26)$$

ahol A – a célterület, W_{LF} - a légifolyosó szélessége (plusz kétszer a telephely légifolyosótól vett távolsága, ha a telephely nincs a légifolyosó alatt), P_{CR} – a lezuhanás valószínűsége.

A szűrési feladat megfogalmazható arra az estre is, ha ismert a lezuhanások gyakorisága egy gépre és a légifolyosó egy hossz-egységére vetítve és vizsgáljuk, hogy milyen forgalomnál teljesül a szűrési kritérium. Legyen A – a célterület, ami egy átlagos atomerőmű főépületét tekintve 10000 m², legyen továbbá W_{LF} - a légifolyosó szélessége, P_{CR} – a lezuhanás valószínűsége (a tapasztalatok alapján $\sim 4 \cdot 10^{-10}$ /mile). A repülések számát, N , amelynél még teljesül a rázuhanás valószínűségére vonatkozó $P_{scr}=10^{-7}$ /év szűrési kritérium, megkapjuk az alábbi képletből számítva:

$$N \leq \frac{P_{scr}}{P_{AC}} \frac{W_{LF}}{A} \quad (27)$$

Tudni kell, hogy ma a legtöbb országban, így hazánkban is érvényes a „szabad légtér”, azaz nincsenek kötött légifolyosók, de van tiltott repülési terület, mint a paksi légtér.

27.5. ÁLTALÁNOS FORGALOM

A légifolyosóktól és repülőterektől távoli telephelyekre az általános forgalomból kell meghatározni a rázuhanási gyakoriságot. Általában az adott területre, ahol a telephelyet kijelölték, nincs reprezentatív lezuhanási statisztika, ezért a nemzetközi baleseti statisztikai adatokat kell használni.

A lezuhanások időben Poisson-folyamatot képeznek, két esemény között eltelt idő eloszlása exponenciális. Annak valószínűsége, hogy T időintervallumban n baleset történik a következő összefüggéssel határozható meg:

$$F(N) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T} \quad (28)$$

λ – gyakoriság [1/év], amelyet az empirikus gyakorisággal lehet közelíteni;

T – a vizsgált időtartam;

n – az esetek száma az egész ország területén.

A χ^2 próba annak ellenőrzésére szolgál, hogy a lezuhanások egy λ paraméterű Poisson-eloszlást követnek. A χ^2 eloszlás segítségével a fajlagos lezuhanási gyakoriságra felírható az alábbi képlet:

$$F_B = \frac{\chi^2_{1-\alpha, 2(r+1)}}{2TA} \quad (29)$$

ahol F_B – fajlagos lezuhanási gyakoriság [1/ km²/év]

T= a vizsgált időintervallum

A= a terület

r=a balesetek száma

α = a túllépési valószínűség, (1- α) a konfidencia-szint

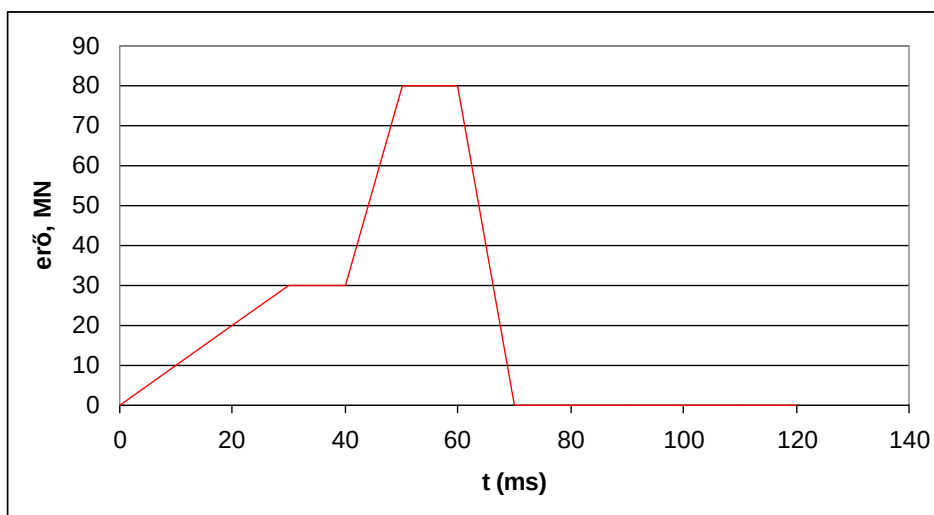
A lezuhanási gyakoriság számításnál elégséges legjobb közelítésként az $\alpha=0,5$ értéket választani. A következtetések konzervatív megerősítése érdekében, az ajánlástól eltérően az $\alpha=0,05$ értékre is célszerű elvégezni az értékelést. Az EPR (UK) esetében az alábbi esemény gyakoriságokkal számoltak (EPR, 2011):

- könnyű repülőgép: $2.46 \cdot 10^{-5}$ /km²/év
- helikopter: $1.16 \cdot 10^{-5}$ /km²/év
- kis szállító gép: $0.12 \cdot 10^{-5}$ /km²/év
- nagy szállító gép: $0.22 \cdot 10^{-5}$ /km²/év
- katonai gép: $0.46 \cdot 10^{-5}$ /km²/év

27.6. TERHELÉSI GÖRBÉK

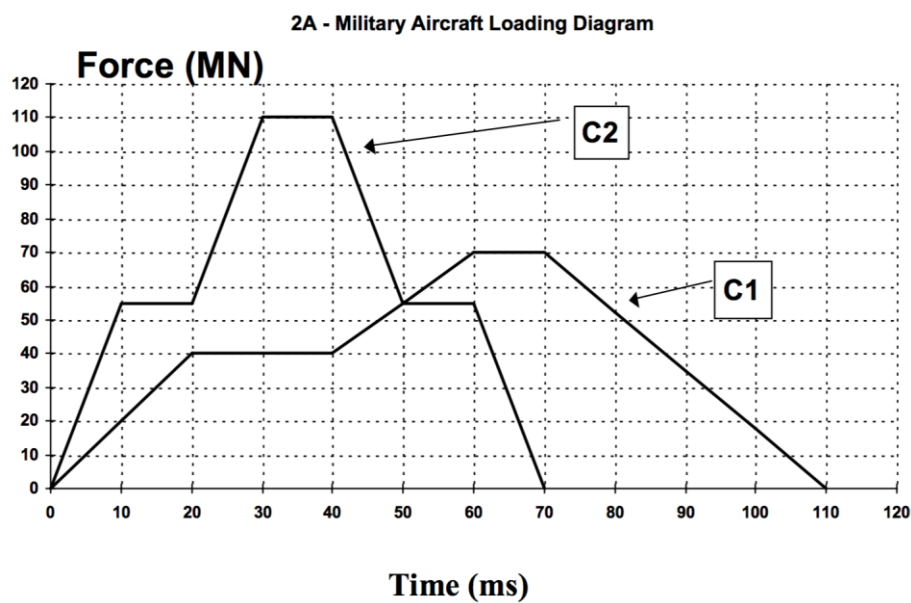
Repülőgép rázuhanását tekintve a veszélyt együttesen egy megadott össztömegű, adott tömegeloszlású, sebességű, becsapódási szög alatt érkező gép terhelési görbéje, ami például egy teher-idő függvény jellemzi. A mértékadó becsapódási jellemzőket a burkoló elvet alkalmazva kell kiválasztani. A terhelési görbék különféle realizációira példát ad [80].

Az EUR által ajánlott görbét a 45. ábra mutatja.



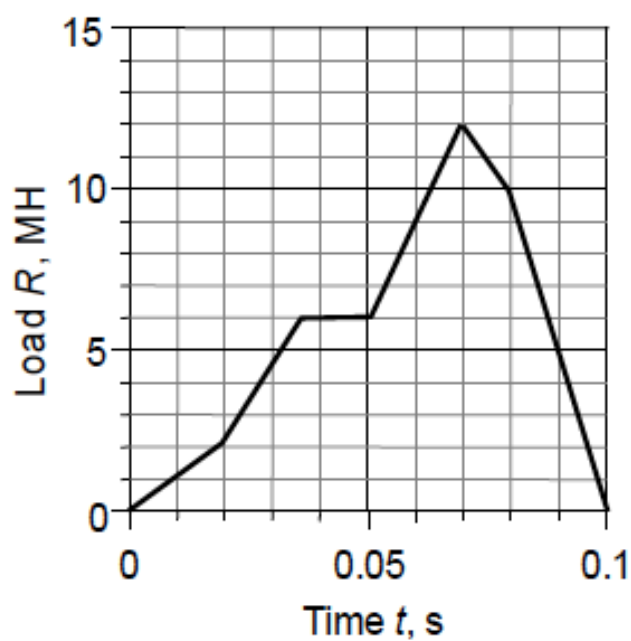
45. ábra Repülőgép rázuhanás terhelési görbe (dimenziók erő-MN versus idő-milisec)

Az EPR terhelési diagramját a 46. ábra láthatjuk (UKEPR-0002-131 Issue 04, PCSR – Sub-chapter 13.1 – External Hazards Protection [77]). Itt két görbét alkalmaztak, a C1 a konténmenten belüli szerkezetekre ható rezgés-gerjesztés válaszspektrumának származtatására szolgál, a C2 pedig a merev célfelülettel való ütközést jellemzi és a penetráció ellenőrzésére szolgál.

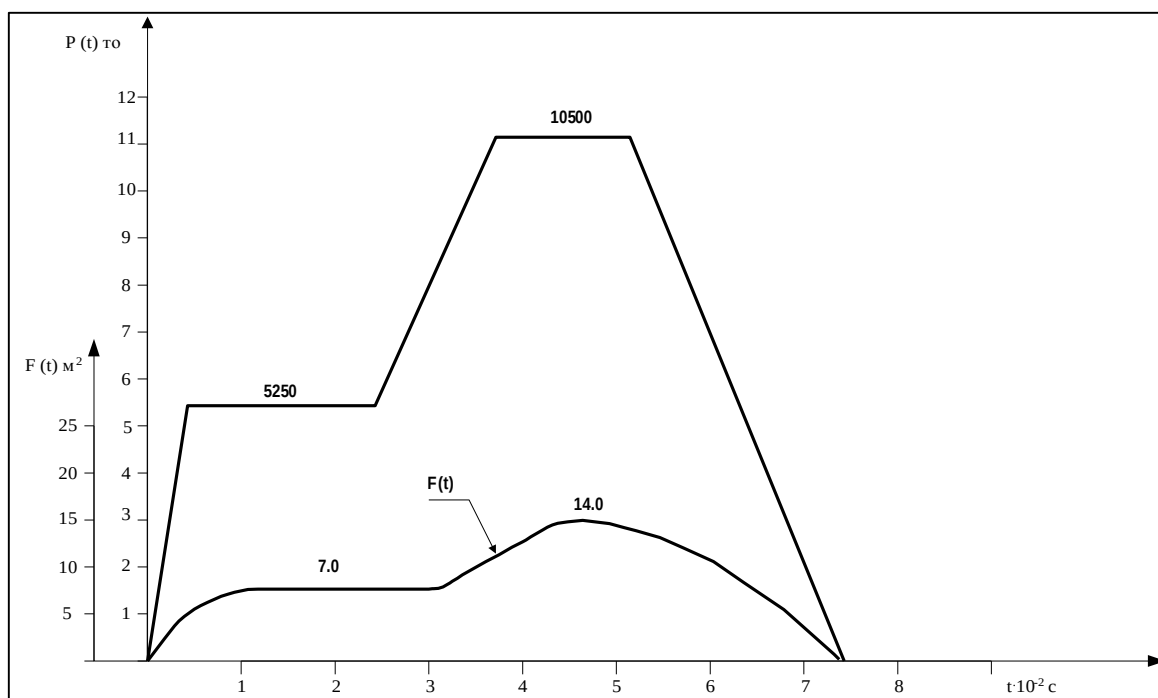


46. ábra Az EPR tervezésénél alkalmazott terhelés diagrammok

Mindemellett tudni kell, hogy az orosz normatív dokumentumok ennél jelentősen nagyobb géptípus rázuhanásának figyelembe vételét követelik meg (48. ábra), de a PiN AE-5.6 [76] ebben a kérdésben a megrendelő elvárásait helyezi előtérbe.



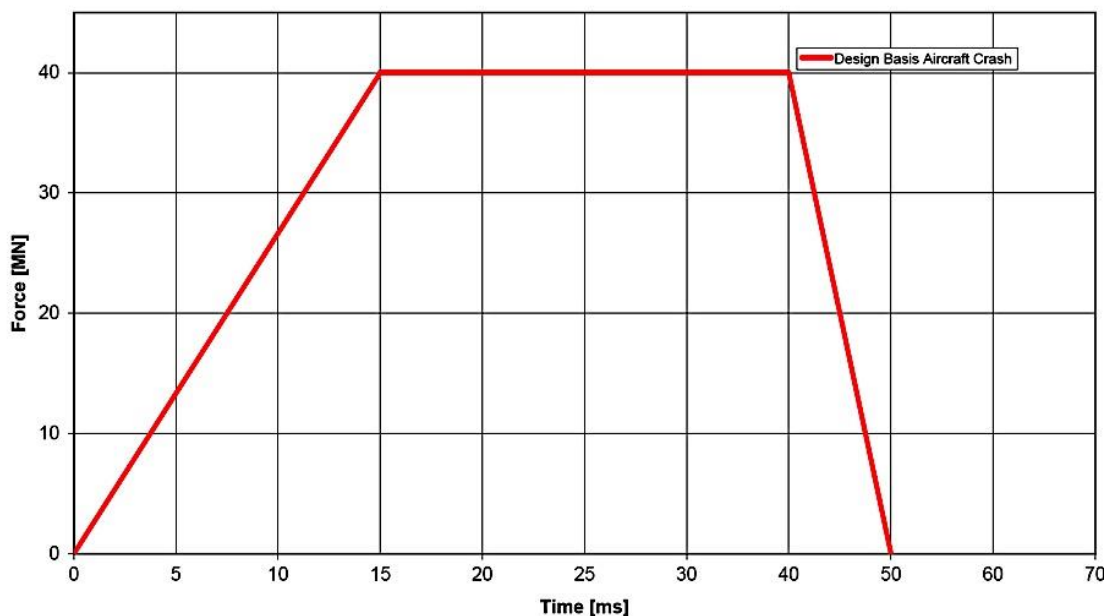
47. ábra A balti atomerőmű tervezésénél alkalmazott terhelési diagram
(A terhelési diagram függőleges tengelyén MN szerepel)



48. 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)

A tervezési alapba tartozó esetként az orosz szállító egyik dokumentumában a 49. ábra szerinti terhelési görbét ajánlja, amelyet a referencia atomerőmű tervezésénél is alkalmaztak.



49. ábra Egy 7 tonnás vadászgép terhelési görbéje 200 m/s sebesség esetén

A fent hivatkozott szállítói dokumentum és az aktuális ismereteink szerinti mértékadó repülőgép jellemzőket tartalmazza a 28. táblázat [90]. A Paks2 tervezési alapjába sorolt gépek jellemzői 29. táblázatban láthatók, s összehasonlításul szerepelnek itt a balti tervben figyelembe vett LearJet-23 adatai is.

28. táblázat Mértékadó adatok egy orosz dokumentum és az aktuális ismereteink szerint

jellemzők	géptípus					
	tervezési alap		nagy polgári légi jármű		katonai	
súly, t	7	24*	≤400	590**	~20	16,5
rázuhanás szöge	45°	45°	45°	45°	45°	45°
hajtómű						
tömeg, kg	250	600	4300 kg	6712	2000 kg	1055
sebesség, m/sec	200	138,9	150	284	215	590
átmérő, m	~0,5	0,68 (1,08)	0,91	2,95	0,91	0,89
rázuhanás szöge	45°	45°	45°	45°	45°	45°
üzemanyag tömeg	~3000 kg	6000	75000 kg	262072	10000 kg	2000

* An-26

** A 380

29. 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
An-26	24000	2x 600	6000 kg	500	40	29,2
L-39 Albatros	4700	1x 350	280 kg	750	2	9,5
Lear Jet-23	5670	2x 200	3026 kg	904	5-8	10,85

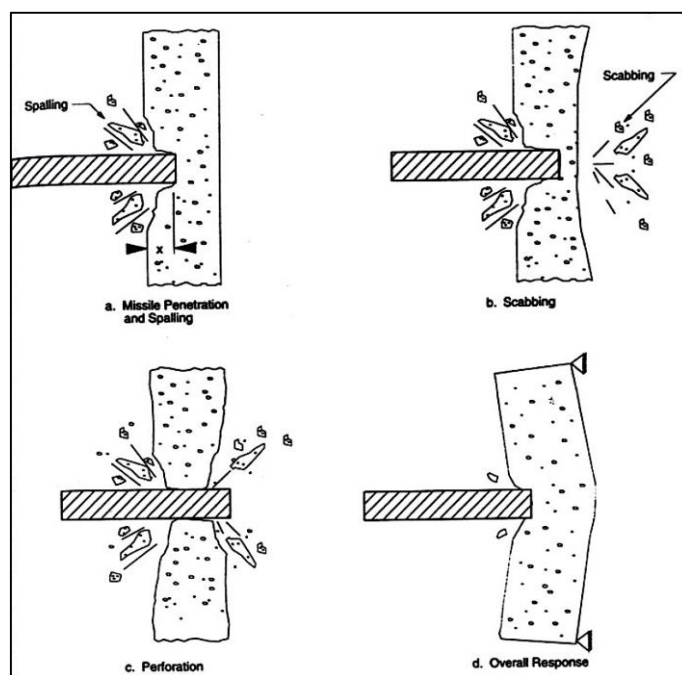
A vizsgálatok alapján katonai gép (5.) kategóriában mértékadó lehet esetünkben a Saab JAS-39 Gripen gép rázuhanása. A nagy polgári repülőgép reprezentánsa az Airbus 380. Ezek adatait a 30. táblázatban megadjuk.

30. 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. utas-szám [fő]	Szárny fesztáv [m]
<i>Saab JAS-39 Gripen</i>	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

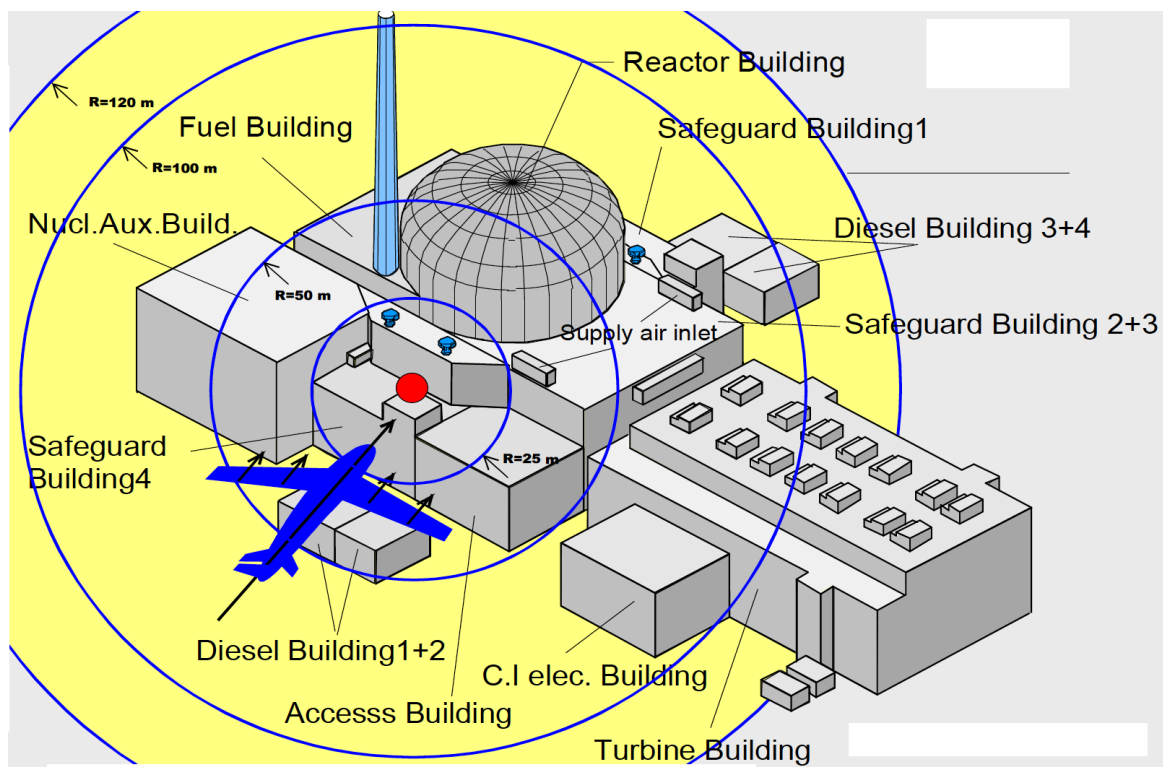
A rázuhanó gép sarkánya gyűrődő, kis merevségű, míg a hajtóművek az úgynevezett hard missile kategóriába tartoznak.

A hard missile által okozott sérülések típusait az 50. ábra mutatja be.



50. 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 az 51. ábra. Alapvető információt az atomerőművek tűzbiztonságáról a NUREG-1805 [91] tartalmaz. Jellemzően az NRC egy excel számítási segédletet is publikált¹⁶.



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

¹⁶ (http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/05.3_Thermal_Radiation_From_Hydrocarbon_Fireballs.xls)

A repülőgép ütközése a konténment védőépületre jelentős rezgést okoz, amire az adott esetben szükséges rendszereket tervezni, minősíteni kell. Ez a rezgés frekvencia-tartalmát illetően jelentősen eltér a földrengés által okozottól. Ezt a 4. ábra szemlélteti, ahol az EPR épület válaszspektruma látható különböző repülőgép rázuhanási esetekre és földrengésre (lásd [12]).

28. TÚZVESZÉLY

A repülőgép rázuhanás által okozott tűzveszélyt az előzőekben érintettük. Egyéb, a telephelyen vagy annak közelében folyó tevékenység miatti tűzveszélyt, beleértve a parkoló autók és a telephely közelében lévő erdő miatti tűzveszélyt az atomerőmű biztonsága szempontjából kiszűrhetőnek minősítettük, lásd a 23 fejezetet. A BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) hatás következményeit jellemző fizikai hatásokra készült számítás. A BLEVE modell két hatásra adott eredményeket:

- a robbanás túlnyomáshullámának kiterjedésére,
- a begyulladó anyag által keltett „fireball”-ból eredő hőszugárzásra.

A számítás eredménye alapján megállapítható, hogy az új atomerőművi telephelyhez legközelebbi üzemanyagtöltő állomáson bekövetkező súlyos baleseti esemény nem veszélyezteti a telephely biztonságát. Sem a tűzgömb hőszugárzási zónája, sem a legkisebb értékű ($2,0 \text{ kPa} = 0,02 \text{ bar}$) túlnyomás nem éri el az új telephely határát.

A referencia atomerőmű esetében a külső tűzveszélyt úgyszintén kiszűrték.

29. A VILLAMOS HÁLÓZAT ELVESZTÉSE

A villamos hálózat elvesztése sajátos külső veszély az atomerőmű számára, amely TA2 és TA3 kategóriájú eseményként fogható fel a hálózat kiesésének időtartamától függően. A hálózat kiessésének gyakorisága és a kiesé időtartama az üzemzavari villamosenergia-ellátás eszközei tervezési alapjába tartozó információ.

Az EUR elvárásainak megfelelően az EPR tervezésénél, illetve valószínűségi biztonsági elemzésénél az alábbi adatokat vették figyelembe [77]:

- rövid idejű, rövidebb mint 2 órás hálózat kiesés, $6 \cdot 10^{-2}$ /év gyakorisággal,
- hosszú idejű, hosszabb mint 2 órás hálózat kiesés, 10^{-3} /év gyakorisággal,
- nem tervezett reaktor leállítás és egyidejű hálózat elvesztés, 10^{-3} /év gyakorisággal.

A paksi telephelyre végzett aktualis vizsgálatok [91] szerint rövid idejű (egy órát nem meghaladó) teljes külső hálózati kiesés nem valószínűsíthető, mivel a teljes külső hálózat kiesését csak komoly hálózati üzemzavar okozhatja, ami viszont ha bekövetkezik, akkor kis eséllyel állítható helyre 1 órán belül.

Közepes időtartamú (egy órát meghaladó, de 24 óránál rövidebb) teljes külső hálózati kiesések is kétségesek, mivel ehhez is komoly hálózati üzemzavarra lenne szükség, és ilyenre Magyarországon és Európában még nem volt példa, és az új blokkok üzembeállításáig pedig tovább nő a VER és az ENTSO-E megbízhatósága és stabilitása is.

24 óránál hosszabb idejű teljes külső hálózati kiesés a külső veszélyeztető tényezők vizsgálata alapján az alábbi esetekben és gyakorisággal fordulhat elő:

- tornádó: $6,8 \cdot 10^{-5}$ /év
- földrengés: 10^{-5} /év
- repülőgép becsapódás: $1,19 \cdot 10^{-4}$ /év.

A fenti eseményekhez tartozó rendszer-helyreállítás időtartama: 1 hét – 1 hónap. Megjegyezzük, az elvégzett értékelés kétségeket hagyott maga után.

30. EGYÉB KÜLSŐ VESZÉLYEK

30.1. ELEKTROMÁGNESES HATÁSOK

A szabályok szerint vizsgálni és jellemezni kell, s ki kell zárni.

30.2. CYBER-ATTACK

Ki kell zárni.

III. rész Belső veszélyek

31. BELSŐ VESZÉLYEK

31.1. A TECHNOLÓGIA MEGHIBÁSODÁSÁBÓL EREDŐ VESZÉLYEK

A belső veszélyek, keletkezésüket tekintve, az atomerőmű épületein belül, a technológiai rendszerek, karbantartási eszközök, emelőgépek meghibásodásának következményei. Hatásmechanizmusaik nem különböznek a külső veszélyek hatásmechanizmusaitól, csak a céltárgyak ebben az esetben maguk az atomerőmű rendszerei és belső szerkezetei, míg a külső veszélyek hatása „fennakad” a védőépületen és az erőmű egyéb épületein. Ezek a veszélyek a következők:

- a) Robbanások
- b) Repülő tárgyak
- c) Nagyenergiájú csőtörések
 - Ostorozás hatása
 - Kiáramló közeg hatása
- d) Tüzek
- e) Elárasztás
- f) Toxikus vagy egyéb szempontból veszélyes anyagok kiszabadulása
- g) Nehéz teher leejtése.

A belső veszélyek azonosítása és jellemzése a diszpozíció és a védelem tervezésnek alapja. A cél

- a veszély kiküszöbölése,
- a veszély súlyosságának csökkentése, ha az esemény bekövetkezik,
- a következmények csökkentése.

A veszélyek, mint például a nagyenergiájú rendszerek törése hatásait tekintve igen komplex, így például számolni kell a következőkkel:

- vízsugár,
- ostrozás,
- reakció-erők,
- kompressziós-hullám,
- áramlás, nyomáskülönbség okozta erők,
- túlnyomás,
- megnövekvő páratartalom, hőmérséklet, nyomás,
- elárasztás (spray is),
- megnövekedett sugárzás, aktív közegek kikerülése.

Ugyanakkor a védelmi megoldások, eszközök relatíve egyszerűek, ilyenek a védőfalak, a térbeli szeparáció, a geodetikus szabályok (lejtések) betartása, elmozdulásgátlók alkalmazása.

Nehéz terhek leejtése kizárható a tervezési alaphól, ha a daru megadott szabványok szerint méretezett és redundáns teherviselő és mozgató szerkezet. Ilyen szabvány például az ASME NOG-1-1989 (ASME, 1989), amely alkalmazásával a teher leejtésének valószínűsége a szűrési szint (10^{-7} /év) alá csökkenthető. Fontos szempont, hogy – amennyiben az emelési műveletek az éves üzemidő két százalékánál hosszabb időt vesznek igénybe – együttható eseményként a földrengést is figyelembe kell venni az emelő szerkezet tervezésénél. A nem kellően biztonságos emelő szerkezetek alkalmazása esetén leejtés hatásait determinisztikus módon elemezni kell a maximális lehetséges teher és ejtési magasság és legkedvezőtlenebb leejtési pozíció figyelembe vételével és az így kialakuló kezdeti eseményt a tervezésnél

figyelembe kell venni, például a megfelelő diszpozícióval vagy védő intézkedés betervezésével. Hasonló elvek szerint tervezték az EPR-t, lásd az UK-EPR PCSR 13.2 fejezetét (EPR, 2011).

A belső veszélyeket, okaikat és kezelésük módját a 31. táblázatban összegeztük.

31. táblázat A belső veszélyek, okaik és a kezelési módjuk

a veszély	az okok	ahogyan kezeljük
Tűz	– éghető anyagok, – kábelek, – karbantartási műveletek	– a minimális mennyiségű éghető anyag alkalmazása, – redundancia, tűzgátak, térbeli szeparáció, tűzálló anyagok, szerkezetek tűzvédelmi bevonatok, – tűz-jelzés és oltórendszerek, – tűzbiztonság/kockázat elemzés és intézkedések
Elárasztás	– a nagynyomású rendszerek szivárgása, – rossz útvonal beállítás, – a szomszédos térrészekből átfolyó víz, – a tűzoltó rendszer szándékolatlan működése, – túltöltés, – izoláló szelepek hibája, – kezelői hiba	– LBB a nem kizárható nagyenergiájú csőszakaszokra (pl. tápvíz konténmenten belül) – összefolyók és vízelevezetés – geodetikus védelem – tömör zárású ajtók – diszpozíció – biztonsági elemzés (források, útvonalak, veszélyeztetett funkciók, következmények, közös okú hibák)
Repülő tárgyak	– fogógépek, – turbina, – nagyenergiájú rendszerek törése, – belső robbanások	– adekvát tervezés (gépek, mint forrás, az épületek, mint védelem és céltárgy), – túlfordulat-védelem, – LBB – diszpozíció, térbeli szétválasztás – védőfalak, elmozdulás-gátlók, – üzem közbeni ellenőrzések, – szinergiák (földrengés-védelem hatása)
Robbanások	– robbanóképes anyagok alkalmazása (generátor hűtés), – hidrogén a technológiából, – üzemzavari, baleseti hidrogén	– minimalizálni a mennyiséget – minimalizálni a robbanóképes koncentráció kialakulását, kiküszöbölni a a berobbanás okait – térkialakítás, térbeli szétválasztás, diszpozíció – H-rekombinátorok
Nagyenergiájú csőtörések	– nem megfelelő tervezés, – nem terv szerint üzemeltetés, karbantartás és felügyelet, – vízütés	– LBB – térkialakítás, térbeli szétválasztás, diszpozíció – védőfalak, elmozdulás-gátlók, – üzem közbeni ellenőrzések, – szinergiák (földrengés-védelem hatása)
Nehéz teher leejtése	– Műszaki hiba – Kezelői hiba	– minimális legyen: ○ a leejtés valószínűsége, ○ az ejtési magasság, ○ a tömeg ○ az érintett technológiák száma, – optimális daruzási útvonalak kialakítása – védelem az útvonal alatt – single-failure-proof daruk (redundancia) ASME NOG-1 (Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes)

32. IRODALOM

- [1] IAEA, 2010, Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations: Safety Guide, SSG-9, Vienna, IAEA, 2010, ISBN 978-92-0-102910-2
- [2] 10 CFR PART 100—REACTOR SITE CRITERIA
- [3] NP-032-01, NUCLEAR POWER PLANT SITING. MAIN CRITERIA AND SAFETY REQUIREMENTS, 2002-04-30, Gosatomnadzor's Decree No.10, <http://en.gosnadzor.ru/framework/nuclear/NP-032-2001.pdf>
- [4] WASH-1400, (NUREG 75/014), Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, Executive Summary, U.S. Nuclear Regulatory Commission, October 1975
- [5] NRC, 1990, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants, NUREG-1150, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1150/>
- [6] DOE-STD-1020-94, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585 April 1994, Change Notice #1, January 1996
- [7] 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
- [8] 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.russiangost.com/p-20739-pnae-g-10-007-89.aspx>
- [9] U.S. NRC Regulatory Guide 1.136, Revision 3 "Design Limits, Loading Combinations, Materials, Construction, and Testing of Concrete Containments.", March 2007
- [10] U.S. NRC Regulatory Guide 1.57, Revision 2, „Design Limits and Loading Combinations for Metal Primary Reactor Containment System Components”, May 2013
- [11] Murty C. V. R., Rupen Goswami, Vijayanarayanan A. R., Vipul V. Mehta. Some Concepts in Earthquake Behaviour of Buildings, Gujarat State Disaster Management Authority,
- [12] Sollogoub, P., 2010, External Human Induced Events NS-G-3.1, 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, NSNI/IAEA
- [13] EUR, European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, Volume 2 Chapter 1, Safety Requirements (Part 2)
- [14] Tóth, L., Győri, E., Katona, T.J., 2008, Current Hungarian Practice of Seismic Hazard Assessment. In: OECD NEA CSNI Workshop on Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications. Lyon, Franciaország, 2008.04.07-2008.04.09. OECD NEA, pp. 313-344. Paper NEA/CSNI/R(2009)1.
- [15] IAEA, EXTERNAL EVENT SITE SAFETY EVALUATION (EE-SSE) SAFETY REPORT SERIES Draft No.: SRS XX-8.5-R0; date March 3, 2013
- [16] Evaluation of seismic hazards for nuclear power plants: safety guide, no. NS-G-3.3, International Atomic Energy Agency, 2002. Vienna, ISBN 92-0-117302-4
- [17] NUREG/CR-6372, SSHAC – Senior Seismic Hazard Analysis Committee Report: Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts, 1997
- [18] NUREG/CR-6728 "Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Hazard- and Risk-consistent Ground Motion Spectra Guidelines", October 2001
- [19] NRC, 2011, Prioritization of Recommended Actions to be Taken in Response to Fukushima Lessons Learned, October 3, 2011 SECY-11-0137, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/commission/secys/2011/2011-0137scy.pdf>
- [20] Sener Tinic-Kizildogan, 2008, PSHA Application for Switzerland NPPs, PEGASOS Project", International Workshop on Lessons Learned from Strong Earthquakes, 19-21 June 2008, Kashiwazaki, Japan

- [21] NRC, 2007, Regulatory Guide 1.208 „A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion”, March 2007
- [22] Tóth, L., Györi, E., Katona, T.J., 2008, Current Hungarian Practice of Seismic Hazard Assessment. In: OECD NEA CSNI Workshop on Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications. Lyon, Franciaország, 2008.04.07-2008.04.09. OECD NEA, pp. 313-344. Paper NEA/CSNI/R(2009)1.
- [23] Jack W. Baker, An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Version 1.3, October 1st, 2008, [http://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker \(2008\) Intro to PSHA v1 3.pdf](http://web.stanford.edu/~bakerjw/Publications/Baker (2008) Intro to PSHA v1 3.pdf)
- [24] ARUP, 1996, Ove Arup Partners International, 1996, “PHARE Regional Programme Nuclear Safety; Project No.:4.2.1 VVER 440-213 Seismic Hazard Reevaluation; Contract No 94-0600”, Final Report.
- [25] Zhenming Wang and Mai Zhou, 2007, Comment on “Why Do Modern Probabilistic Seismic-Hazard Analyses Often Lead to Increased Hazard Estimates?” by Julian J. Bommer and Norman A. Abrahamson, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 6, pp. 2212–2214, December 2007, doi: 10.1785/0120070004
- [26] Bommer, J. J. et al, 2005, On the Use of Logic Trees for Ground-Motion Prediction Equations in Seismic-Hazard Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 2, pp. 377–389, April 2005, doi: 10.1785/0120040073
- [27] Bommer, J. J., and N. A. Abrahamson (2006). Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates?, Bull. Seismol. Soc. Am. 96, 1976–1977
- [28] Mallard Partnership, 2003, Uncertainty, Conservatism and the Use of Expert Judgement in Probabilistic Site-specific Earthquake Ground Motion Hazard Assessments for the UK Nuclear Industry. Report for HSE Nuclear Safety Directorate.
- [29] Aspinall, W., 2007 Lessons for probabilistic seismic assessment methodology from cases in low seismic areas, Presentation at SCM of EBP Seismic Safety of Operating NPPs, Vienna, October, 2007,
- [30] Aspinall, W., 2009, ISSC Scientific Committee Afternoon Theme 1: Seismic and Fault Displacement Hazards, Topic 2 Sanity Checks for SHA results, IAEA International Seismic Safety Centre - Scientific Committee, Vienna 23-25 September 2009, UK Seismic Hazard Working Party - Aspinall & Associates - Bristol University (UK)
- [31] Bada G., Horváth F., Gerner P., Fejes I., 1999: Review of the present-day geodynamics of the Pannonian basin: progress and problems. J. Geodynamics 27: 501-527.
- [32] Bada G, Grenczy Gy, Tóth L, Horváth F, Stein S, Cloetingh S, Windhoffer G, Fodor L, Pinter N, Fejes I 2007: Motion of Adria and ongoing inversion of the Pannonian basin: Seismicity, GPS velocities and stress transfer. In: Stein, S., Mazzotti, S., (Eds.), Continental Intraplate Earthquakes: Science, Hazard, and Policy Issues. Geological Society of America Special Paper 425, p. 243-262, doi: 10.1130/2007.2425(16)
- [33] Bus Z, Grenczy G, Tóth L, Mónus P 2009: Active crustal deformation in two seismogenic zones of the Pannonian region — GPS versus seismological observations, Tectonophysics 474 (2009) 343–352, doi:10.1016/j.tecto.2009.02.045
- [34] GeoRisk, 2000: Extension of PSHA at Paks NPP to very low probabilities. Technical Report, Paks NPP
- [35] GeoRisk, 2013: Free field earthquake design response spectra at 10⁻⁵ /y earthquake frequency at Paks NPP Site. Technical Report, Paks NPP
- [36] GeoRisk, 2014: Building motion due to liquefaction at Paks NPP Site. Volume 2: Earthquake Hazard at the Bedrock. Technical Report, Paks NPP
- [37] GeoRisk: Comprehensive Earthquake Catalogue of the Pannonian Region (44.0–50.0N and 13.0–28.0 E), Computer file, 2014
- [38] Grenczy, G., Fejes, I. and Kenyeres, A., 2002. Present crustal deformation pattern in the Pancardi Region: Constraints from Space Geodesy. In: Cloetingh, S., Horváth, F., Bada, G. and Lankreijer, A., (eds.), Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system. EGU St. Mueller Special Publication Series, 3: 65-77.

- [39] Grenerczy G., Sella G., Stein S., Kenyeres A., 2005. Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 16, L16311.
- [40] Ove Arup & Partners: PHARE Regional Programme VVER 440–213, Seismic Hazard Re-evaluation, Final Report produced by Ove Arup & Partners, 1995.
- [41] Tóth L., Mónus P., Zsíros, T. and Kiszely, M., Seismicity in the Pannonian Region – earthquake data. In *Neotectonics and surface processes: the Pannonian basin and Alpine/Carpathian system*, S. Cloetingh, F. Horváth, G. Bada, A. Lankreijer, eds., EGU St. Mueller Special Publication Series 2002; 3: 9-28.
- [42] Tóth L, Mónus P, Bus Z, Győri E 2008: Seismicity of the Pannonian Basin, In: E.S. Husebye (ed.), *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*, Springer Verlag, NATO ARW Series, Vol. 81, p. 97-108.
- [43] Tóth L, Győri E, Katona T 2009: Current Hungarian Practice of Seismic Hazard Assessment: Methodology and Examples, OECD NEA Workshop: Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Methodologies and Applications, WORKSHOP PROCEEDINGS, NEA/CSNI/R(2009)1, p. 313-344.
- [44] Tóth L, Mónus P, Kiszely M, 1996-2014: Magyarországi földrengések évkönyve - Hungarian Earthquake Bulletin – 1995-2013. GeoRisk, Budapest, HU ISSN 1589-8326
- [45] ASCE/SEI 43-05 „Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities”, 2005
- [46] MSZ EN 1997: 2006, Eurocode 7: Geotechnikai tervezés.
- [47] Andrew J. Bond, Bernd Schuppener, Giuseppe Scarpelli, Trevor L.L. Orr, Eurocode 7: Geotechnical Design, Worked examples, presented at the Workshop “Eurocode 7: Geotechnical Design”, Dublin, 13-14 June, 2013, ISBN 978-92-79-33759-8, doi: 10.2788/3398
- [48] C. R. I. Clayton, M. C. Matthews and N. E. Simons, SITE INVESTIGATION, Second Edition, Department of Civil Engineering, University of Surrey <http://www.geotechnique.info/SI/Contents%20of%20Clayton%20Matthews%20Simons.pdf>
- [49] IAEA, 2002, NS-G-3.6 Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants, 2002, ISBN 92-0-107204-X
- [50] ПНАЭ Г-05-035-94, УЧЕТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫЕ ОБЪЕКТЫ, Москва 2000
- [51] СППНАЭ-87. Основные требования по составу и объему инженерных изысканий и исследований при выборе пункта и площадки АС.
- [52] MVM Paks II. Zrt, Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, Környezeti hatástanulmány, Földtani közeg és felszín alatti víz a telephelyen és közvetlen környezetében, ERBE dokumentum azonosító: 13A380069000 25 003 v0
- [53] MVM Paks II. Zrt, Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, Környezeti hatástanulmány, Földtani közeg és felszín alatti vizek a Paks alatti Duna-völgyben, ERBE dokumentum azonosító: 13A380069000 25 003 v0
- [54] NRC, 2003, Regulatory Guide 1.198, “Procedures and Criteria for Assessing Seismic Soil Liquefaction at Nuclear Power Plant Sites”, 2003
- [55] Tamás János Katona, Zoltán Bán, Erzsébet Győri, László Tóth, and András Mahler, (2015) Safety Assessment of Nuclear Power Plants for Liquefaction Consequences, Hindawi Publishing Corporation, Science and Technology of Nuclear Installations, Article ID 727291
- [56] E. Győri, T. J. Katona, Z. Bán, and L. Tóth, “Methods and uncertainties in liquefaction hazard assessment for nuclear power plants,” in *Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, August 2014.
- [57] E. Győri, L. Tóth, Z. Grácz, and T. Katona, “Liquefaction and post-liquefaction settlement assessment—a probabilistic approach,” *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, vol. 46, no. 3, pp. 347–369, 2011.

- [58] Tamás János Katona, Erzsébet Győri, Zoltán Bán, László Tóth, Assessment of Liquefaction Consequences for Nuclear Power Plant Paks, accepted for Transactions, SMiRT-23, Manchester, United Kingdom - August 10-14, 2015, Division VII
- [59] Tamas J. Katona, Safety Assessment of the Liquefaction for Nuclear Power Plants, *Pollack Periodica*, Vol. 10, No. 1, pp. 39–52 (2015), DOI: 10.1556/Pollack.10.2015.1.4
- [60] IAEA SSG-18 Meteorological and hydrological hazards in site evaluation for nuclear installations : safety guide, IAEA, WMO, Vienna, 2011, ISBN 978-92-0-115210-7
- [61] Regulatory Guide 4.7 - General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations, Revision 2, April 1998
- [62] MVM Paks II. Zrt, Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, Környezeti hatástanulmány, Paks 30 km sugarú környezetének klimatikus jellemzése, ERBE dokumentum azonosító: 13A380069000 25 003 v0
- [63] ASCE 7-95, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, 1995
- [64] СНиП 2.01.07-85*, НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ, МОСКВА, 2003
- [65] Fujita, T.T., "Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity," SMRP Research Paper No. 91, University of Illinois, 1991
- [66] Hossain, Q. et al, 1999, A Probabilistic Tornado Wind Hazard Model for the Continental United States, UCRL-JC-133566, Lawrence Livermore National Laboratory, April 1999
- [67] Ramsdell, J.V. Jr., Rishel, J.P., 2007, Tornado Climatology of the Contiguous United States, NUREG/CR-4461, Rev. 2, PNNL-15112, Rev. 1, Pacific Northwest National Laboratory U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-0001, February 2007
- [68] Boissonnade, A. et. al., 2000, "Development of Probabilistic Tornado Wind Hazard Model for the Continental United States, Vol. 1, Main Report," UCRL-ID 140922 Vol. 1, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- [69] US NRC Regulatory Guide 1.76, Revision 1, Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, March 2007
- [70] DOE-STD-1020-94, Natural Phenomena Hazards Design and Evaluation Criteria for Department of Energy Facilities, U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585 April 1994, Change Notice #1, January 1996
- [71] РБ-022-01, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕРЧА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Москва 2001
- [72] MVM Paks II. Zrt, Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, Környezeti hatástanulmány, A Duna medermorfológiájának és hőterhelésének modellezése, ERBE dokumentum azonosító: 13A380069000 25 003 v0
- [73] IAEA Safety Guide No. NS-G-3.1 „External human induced events in site evaluation for nuclear power plants”, Vienna, 2002, ISBN 92-0-111202-5
- [74] NUREG-0800, Standard Review Plan, Rev. 2 - April 1996, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, D.C. 20555
- [75] AIChE, 1996, Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires, CCPS, American Institute of Chemical Engineering, New York, 1996
- [76] 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.russiangost.com/p-20737-pin-ae-56.aspx>
- [77] UK-EPR, 2011a, The Pre-Construction Safety Report (PCSR), Public Version of UK EPR™ GDA Submission, <http://www.epr-reactor.co.uk/>
- [78] Bangash, M.Y.H., 1993, Impact and Explosion, Analysis and Design, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993
- [79] Goshi, B., 1990 Design of buildings to withstand abnormal loads, Butterwoths, London, 1990

- [80] Birbraer, A.N., Roledler, A.J., 2009, Extreme Actions on Structures, Saint Petersburg, Politechnic University Publishing House, 2009, ISBN 978-5-7422-2370-2 (oroszul)
- [81] Stevenson, J. D., Coman, O., 2006, Design of hazardous mechanical structures, systems and components for extreme loads, ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, USA, ISBN 0-7918-0242-6
- [82] Boros, J. et al, 2000, Feltételezett nagyenergiájú csőtörések nemzetközi előírásoknak megfelelő teljes körű felülvizsgálata a Paksi Atomerőműben, Erőterv Közlemények 38: pp. 4-14.
- [83] PN-064-05, НП-064-05, УЧЕТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ОБЪЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Москва 2005
- [84] MVM PAKS II. ATOMERŐMŰ FEJLESZTŐ ZRT., Új atomerőművi blokkok létesítése, A telephely környezetében lévő ipari és katonai létesítmények nem nukleáris baleseteiből származó külső veszélyek vizsgálata, PÖYRY ERŐTERV 6FX205272/0001/O
- [85] MVM PAKS II. ATOMERŐMŰ FEJLESZTŐ ZRT., Új atomerőművi blokkok létesítése, A telephely környezetében lévő ipari és katonai létesítmények nem nukleáris baleseteiből származó külső veszélyek vizsgálata, Összefoglaló értékelő dokumentáció, PÖYRY ERŐTERV, 6FX205272/0002/O
- [86] MVM PAKS II. ATOMERŐMŰ FEJLESZTŐ ZRT., Új atomerőművi blokkok létesítése Szállítási tevékenység okozta külső veszélyek felmérése Összefoglaló értékelő dokumentáció, PÖYRY ERŐTERV, 6FX205271/0002/O
- [87] US NRC Regulatory Guide 1.91, Evaluations of Explosions Postulated to Occur at Nearby Facilities and on Transportation Routes near Nuclear Power Plants, April 2013
- [88] 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>
- [89] CAA PAPER 2006/01, A Database to Record Human Experience of Evacuation in Aviation Accidents, The Aircraft Accident Statistics and Knowledge Database, (AASK), I Civil Aviation Authority, June 2008, SBN 978 0 11790 839 0
- [90] MVM Paks II. Atomerőmű Fejlesztő Zártkörűen Működő Részvénytársaság, Összefoglaló értékelő dokumentáció, REPÜLŐGÉP BECSAPÓDÁS VALÓSZÍNŰSÉGÉNEK ÉS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA ÉS ÉRTÉKELÉSE, 2014. december, ERBE Dokumentumazonosító: 13A380042026-22-13-001 R2
- [91] 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
- [92] MVM PAKS II. ATOMERŐMŰ FEJLESZTŐ ZRT., Összefoglaló értékelő dokumentáció, KAPCSOLÓDÓ KÜLSŐ TÁVVEZETÉK-HÁLÓZATOK VIZSGÁLATA ÉS ÉRTÉKELÉSE, ERBE Dokumentumazonosító: 13A380042035-22-14-001