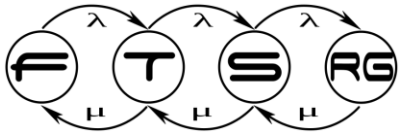
Rendszermodellezés

Hibamodellezés

(dr. Majzik István és Micskei Zoltán fóliái alapján)

Budapest University of Technology and Economics
Fault Tolerant Systems Research Group



Tartalomjegyzék

Motiváció: Hibamentes működés

- Szolgáltatási szint szerződések (SLA):
  - Ügyfél által elvárt jellemzők
  - Telekom szolgáltatások rendszerei („carrier grade”):
    „Öt kilences”: 99,999% (5 perc/év kiesés)
- Biztonságkritikus rendszerek:
  - Szabvány előírások a hibák gyakoriságára
  - Biztonságintegritási szintek (Safety Integrity Level)

SIL	Biztonságkritikus funkció hibája / óra
1	$10^{-6} \leq THR < 10^{-5}$
2	$10^{-7} \leq THR < 10^{-6}$
3	$10^{-8} \leq THR < 10^{-7}$
4	$10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$

Hiba nélküli működés ~ 11.000 év??

Ha 15 év az élettartam, akkor ez alatt kb. 750 berendezésből 1-ben lesz hiba

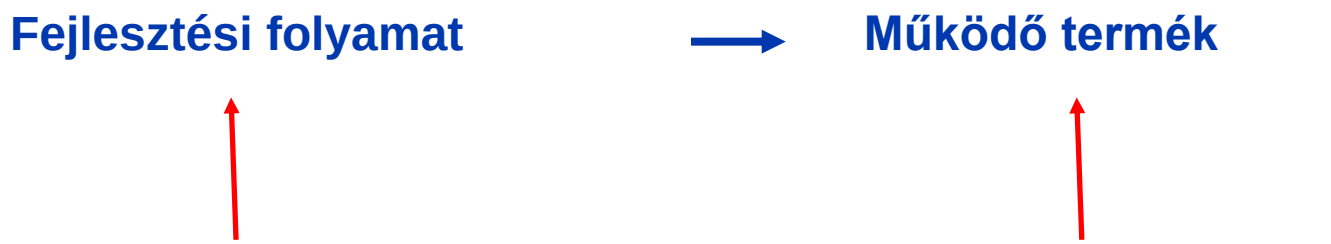
Elkerülhetetlen: Hibahatások

Fejlesztési folyamat → **Működő termék**

- Tervezési hibák
- Implementációs hibák

- Hardver hibák
- Konfigurációs hibák
- Kezelői hibák

Elkerülhetetlen: Hibahatások



Fejlesztési folyamat jellemzői:

- Jobb minőségbiztosítás, jobb módszertanok
- De növekvő bonyolultság, nehezebb ellenőrzés

Szokásos becsült értékek 1000 kódsorra:

- Jó kézi fejlesztés és tesztelés: <10 hiba marad
- Automatizált fejlesztés: ~1-2 hiba marad
- Formális módszerek használata: <1 hiba marad

Elkerülhetetlen: Hibahatások

Fejlesztési folyamat → **Működő termék**

- Tervezési hibák
- Implementációs hibák

- Hardver hibák
- Konfigurációs hibák
- Kezelői hibák

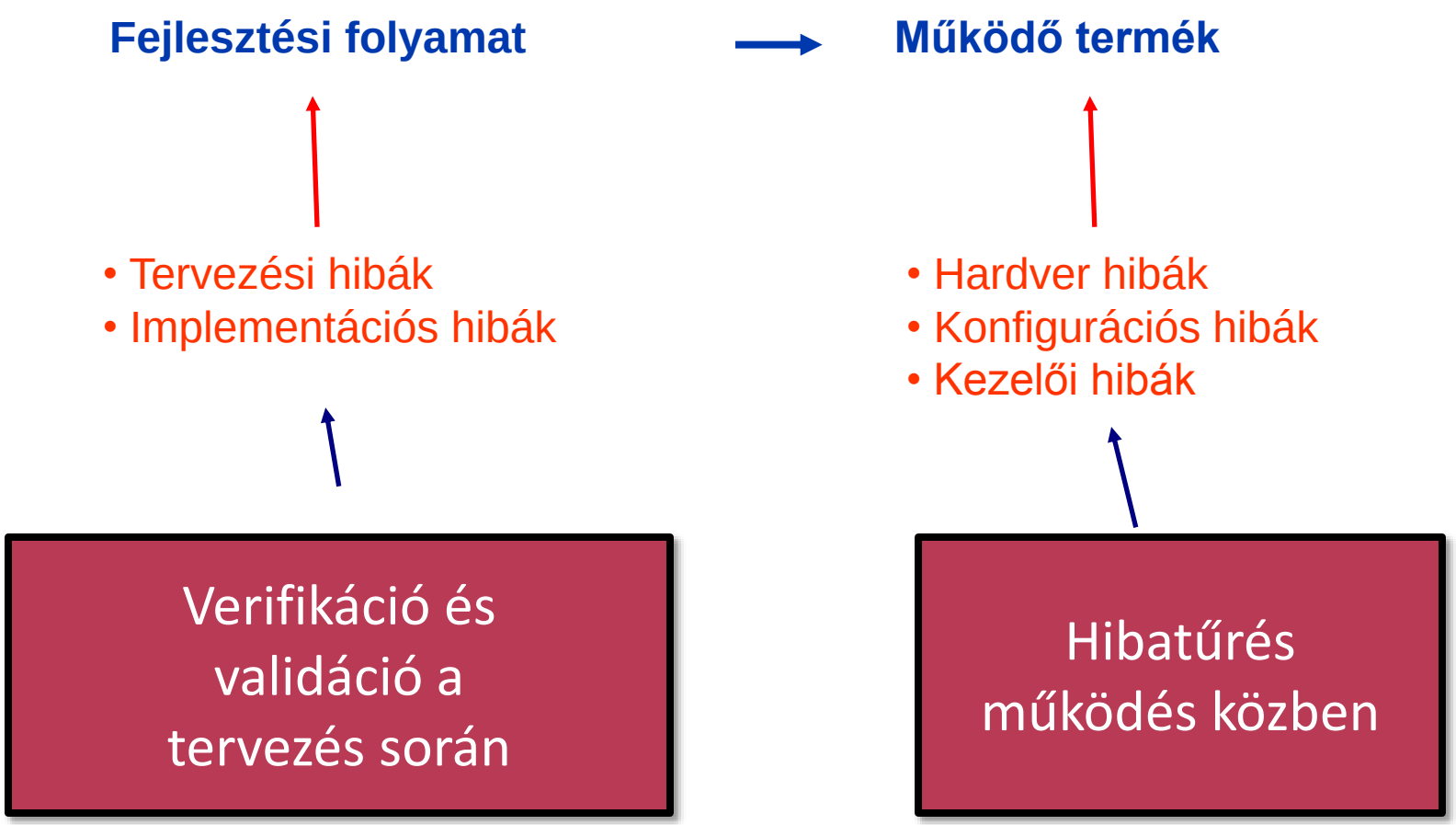
Technológia korlátai:

- Jobb paraméterek, jobb anyagok
- De növekvő bonyolultság (érzékenység)

Szokásos becsült értékek:

- CPU: 10^{-5}…10^{-6} hiba/óra
- RAM: 10^{-4}…10^{-5} hiba/óra
- LCD: ~ 2…3 év élettartam

Elkerülhetetlen: Hibahatások



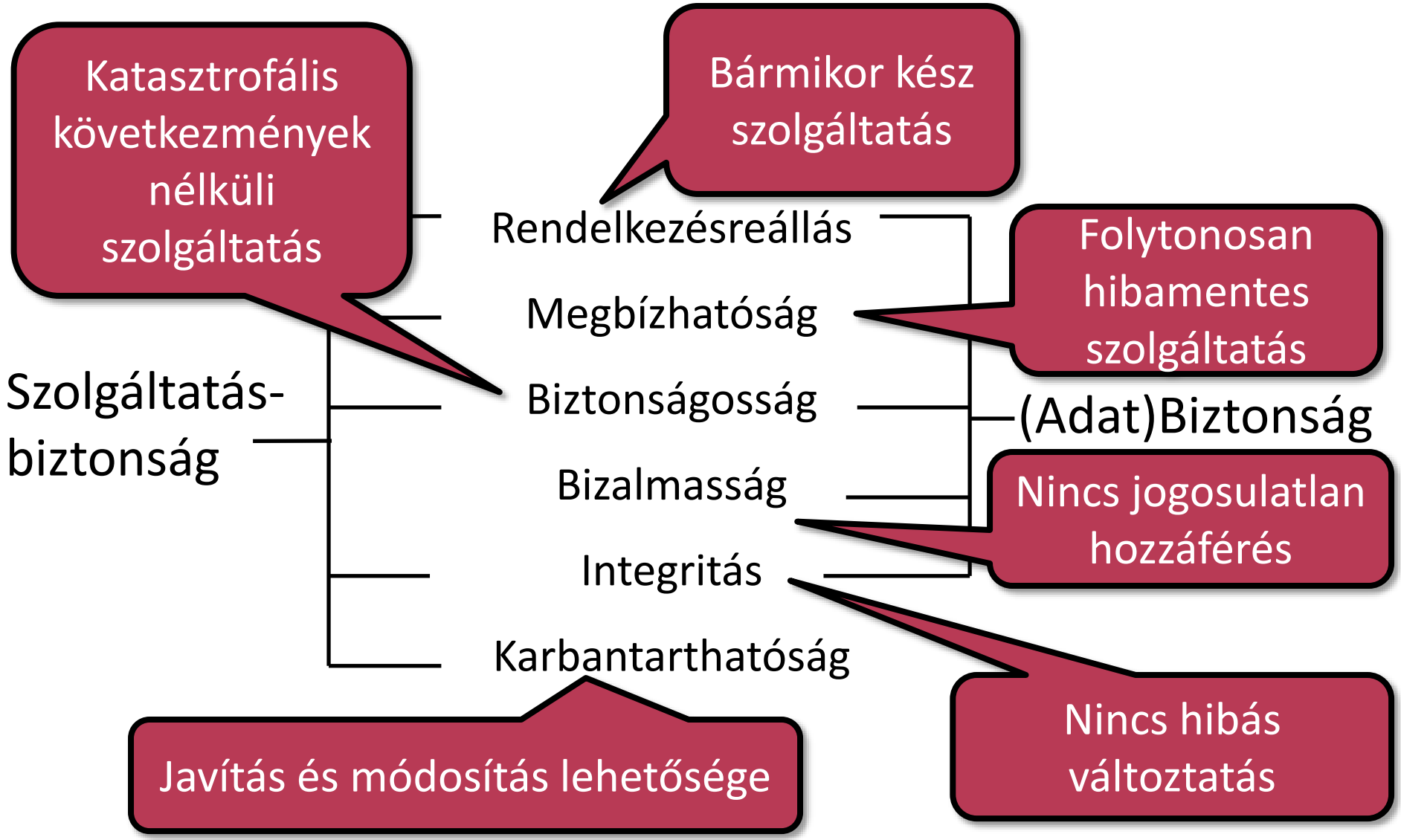
Szolgáltatásbiztonság

Szolgáltatásbiztonság (dependability): a képesség, hogy igazoltan bízni lehet a szolgáltatásban

- *igazoltan*: elemzésen, méréseken alapul
- *bizalom*: szolgáltatás az igényeket kielégíti

(nemfunkcionális követelmény)

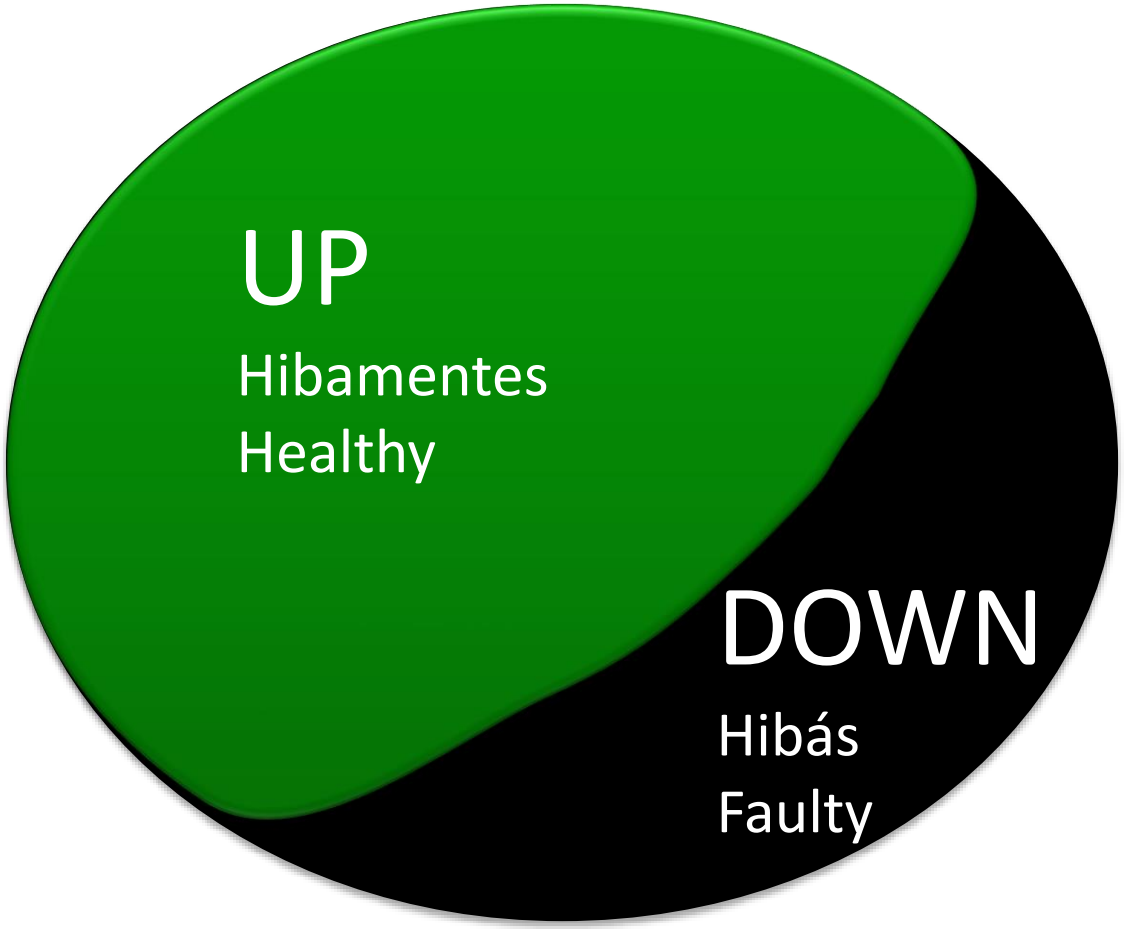
Szolgáltatásbiztonság jellemzői



Laprie et. al.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing

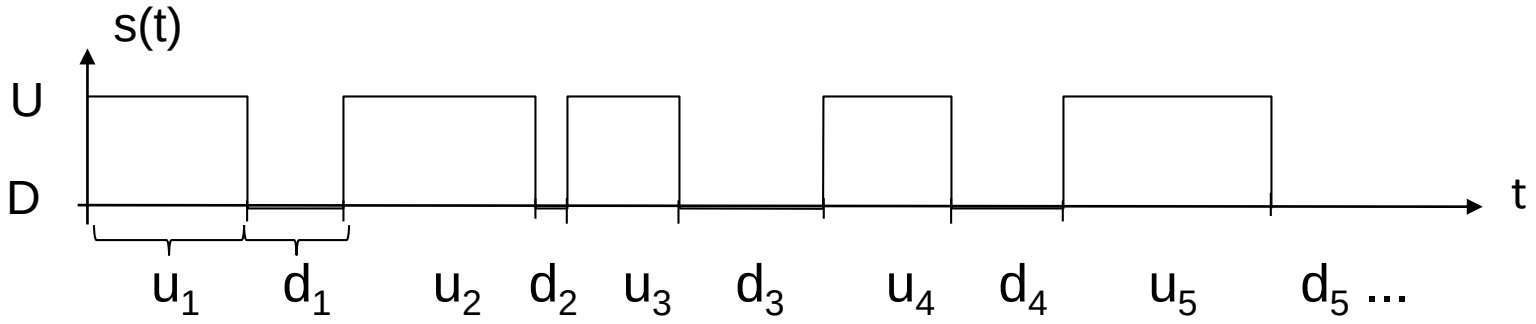
Állapotpartícionálás

- S: a rendszer teljes állapottere



Megbízhatósági mértékek

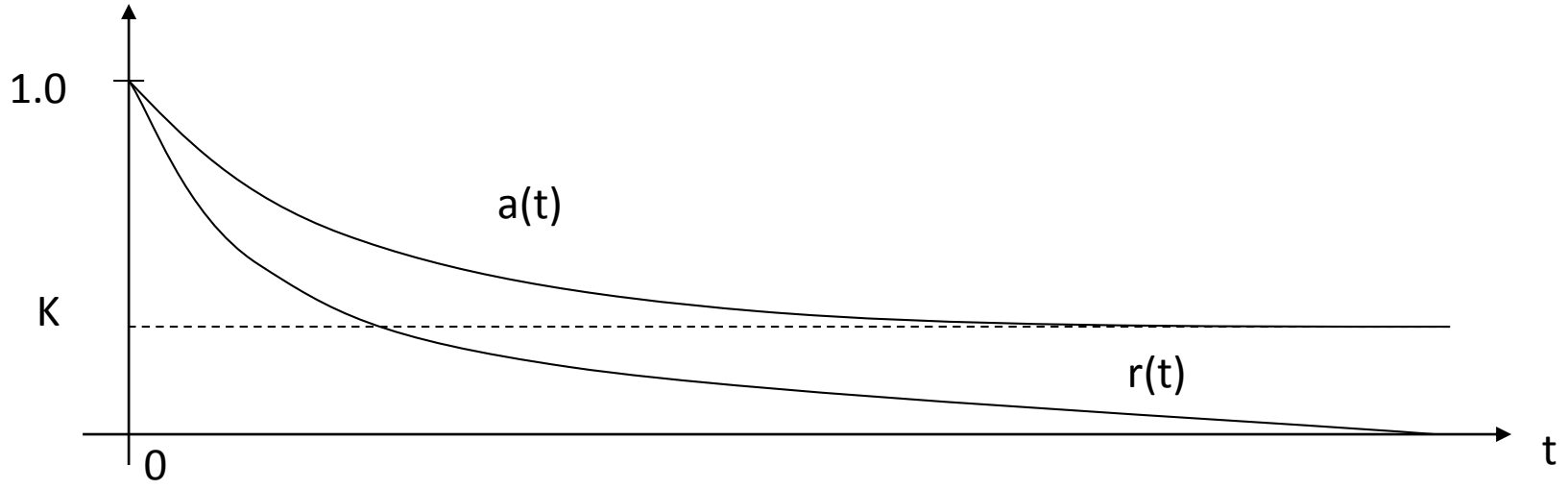
- Állapotparticionálás → s(t) rendszerállapot
  - Hibás (D) - Hibamentes (U) állapotpartíció



- Várható értékek:
  - Első hiba bekövetkezése: MTFF = $E\{u_1\}$
    (mean time to first failure, néha MTTF)
  - Hibamentes működési idő: MUT = $E\{u_i\}$
  - Hibás állapot ideje: MDT = $E\{d_i\}$
  - Hibák közötti idő: MTBF = MUT + MDT
    (mean time between failures)

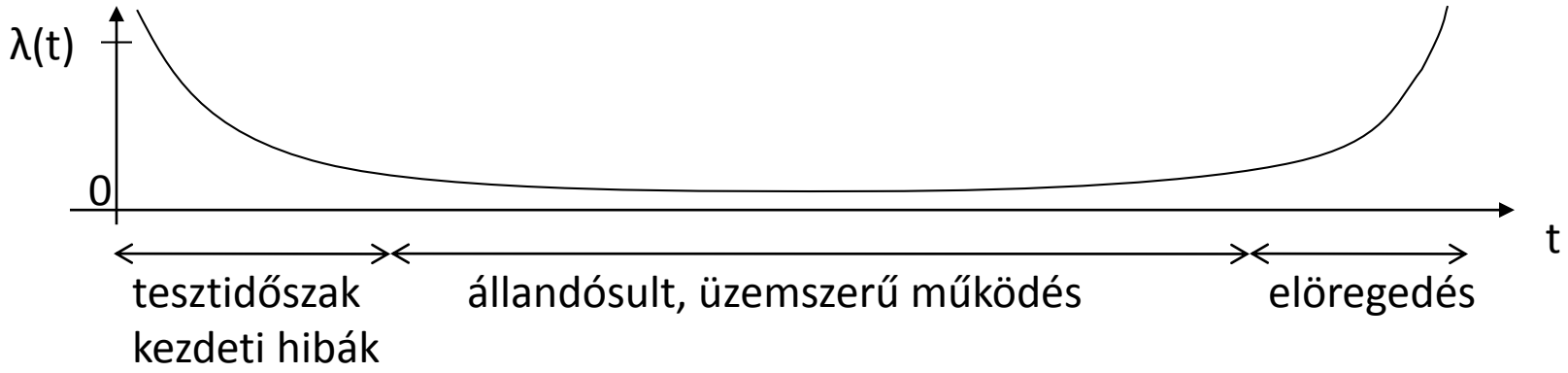
Valószínűség időfüggvények

- megbízhatóság: (reliability)
  $r(t) = P\{\forall\ t' < t: s(t') \in U\}$ (nem hibásodhat meg)
- rendelkezésre állás: (availability)
  $a(t) = P\{\ s(t) \in U\ \}$ (közben meghibásodhat)
  - készenléti tényező: $K = \lim_{t\to\infty} a(t) = \frac{MUT}{MUT+MDT}$



Megbízhatóság

- megbízhatóság: $r(t) = P\{ s(t') \in U, \forall t' < t \}$
- (első) meghibásodások gyakorisága: $-r'(t)$
  - Ez az „első meghibásodás ideje” valószínűségi változó eloszlásának sűrűségfüggvénye!
  - Várható érték: MTTF
- meghibásodási ráta: $\lambda(t) = -r'(t) / r(t)$ (meghibásodás valószínűsége időegységenként és darabonként)
  - „kádgörbe”:



Megbízhatóság

- Közelítés: állandósult állapot, λ(t) = λ (konst.)
  - „Örökifjú” / „memoryless” tulajdonság
  - Jól tesztelt informatikai rendszerre igaz lehet: előbb avul el, minthogy elöregedne
- Következmény: $r(t) = e^{-\lambda t}$
- -r’(t): meghibásodás ideje exponenciális eloszlás lesz
  - λ paraméterrel
  - 1/λ várható értékkel
  - Vagyis: MTTF = 1/λ !

Rendelkezésre állás követelményei

A rendelkezésre állási tényező	Maximális kiesés idő 1 év alatt
2 db 9-es (99%)	3,5 nap
3 db 9-es (99,9%)	9 óra
4 db 9-es (99,99%)	1 óra
5 db 9-es (99,999%)	5 perc
6 db 9-es (99,9999%)	32 másodperc
7 db 9-es (99,99999%)	3 másodperc

Elosztott rendszerek (hibatűrés nélkül, irányadó számok):

- **1 szgép: 95%**
- **2 szgép: 90%**
- **5 szgép: 77%**
- **10 szgép: 60%**

Tartalomjegyzék

Befolyásoló tényezők

- **Hibajelenség** (failure):
  A specifikációnak nem megfelelő szolgáltatás
  - értékbeli / időzítésbeli, katasztrofális / „jóindulatú”
- **Hiba** (error):
  Hibajelenséghez vezető rendszerállapot
  - lappangó → detektált
- **Meghibásodás** (fault):
  A hiba feltételezett oka
  - hatás: alvó → aktív
  - fajta: véletlen vagy szándékos, időleges vagy állandósult
  - eredet: fizikai/emberi, belső/külső, tervezési/működési

Hatáslánc

- Meghibásodás → Hiba → Hibajelenség
  - pl. szoftver:
    - meghibásodás: progr. hiba: csökkentés helyett növel
    - hiba: vezérlés ráfut, változó értéke hibás lesz
    - hibajelenség: számítás végeredménye rossz
  - pl. hardver:
    - meghibásodás: kozmikus sugárzás egy bitet átbillent
    - hiba: hibás pozícióérték a memóriában
    - hibajelenség: robotkar a falnak ütközik
- Rendszer hierarchiaszint függvénye
  - alsó szintű hibajelenség felsőbb szinten meghibásodás
    - kimenet beragadás egy chip szintjén hibajelenség
    - rendszer szintjén meghibásodás (chip a cserélhető komponens)

Hatáslánc

- A hatáslánc befolyásolása
  - meghibásodási tényező csökkentése
    - jobb minőségű komponensek
    - szigorúbb fejlesztési folyamat (ellenőrzés, tesztelés)

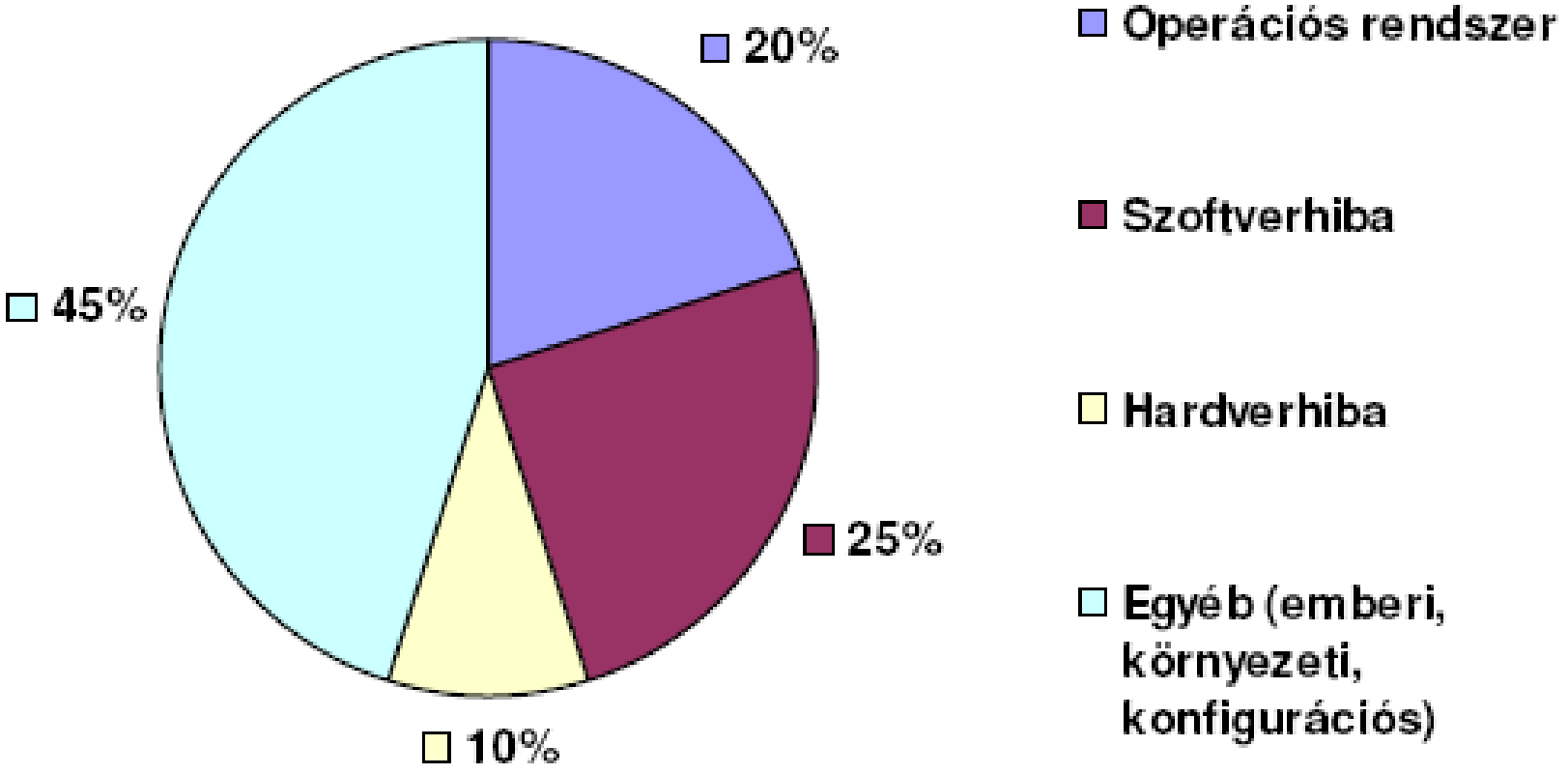
    A meghibásodás-mentesség nem garantálható (csökkenő chipméretek, bonyolultabb programok)
  - hibajelenség kialakulásának megakadályozása
    - rendszerstruktúra kialakítása: redundancia
- Hibatípusok:
  - előre figyelembe vehető hibák: optimális kezelés a tervezési folyamat során
  - előre figyelembe nem vehető hibák: megfelelő rendszerstruktúra kialakítása szükséges

Meghibásodások kategorizálása

- Hardverhibák
  - alaprendszer (alaplap, processzor, memória)
  - tápellátás (tápegység, szünetmentes táp)
  - adattároló alrendszer
  - hálózat
- Szoftverhibák
  - az operációs rendszer hibái
  - alkalmazáshibák
  - illesztőprogram-hibák
- …

- Emberi hibák
  - rendszergazdai hibák
  - illetékes felhasználók nem rosszindulatú hibái
  - illetékes felhasználók rosszindulatú hibái
  - illetéktelen felhasználók támadásai
- Környezeti hatások
  - üzemeltetési környezet rendellenességei, például a légkondicionálás leállása, bombariadó, csőtörés
  - természeti katasztrófák

A hibajelenségek okai IT rendszerek esetén



Tartalomjegyzék

A szolgáltatásbiztonság eszközei

- **Hiba megelőzés**: Meghibásodás megakadályozása
  - fizikai hibák: jó minőségű alkatrészek, árnyékolás,...
  - tervezési hibák: verifikáció
- **Hiba megszüntetés**: Hibaállapotból kimozdítás
  - prototípus fázis: tesztelés, diagnosztika, javítás
  - működés közben: monitorozás, javítás
- **Hibatűrés**: Szolgáltatást nyújtani hiba esetén is
  - működés közben: hibakezelés, redundancia
- **Hiba előrejelzés**: Hibák és hatásuk becslése
  - mérés és „jóslás”, megelőző karbantartás

Hibatűrő rendszerek

- Akármilyen jó is az ellenőrzés a tervezés során, a szolgáltatásbiztonság nem garantálható:
  - időleges hardver hibák (ld. zavarérzékenység)
  - teszteletlen szoftver hibák
  - figyelembe nem vett komplex interakciók

  → Fel kell készülni a működés közbeni hibákra!
- Hibatűrés: Szolgáltatást nyújtani hiba esetén is
  - működés közbeni autonóm hibakezelés
  - beavatkozás a meghibásodás → hibajelenség láncba
  - rendszertechnikai megoldások (+ megbízható alkatrész)
- Alapfeltétel: Redundancia (tartalékolás)
  - többlet erőforrások a hibás komponensek kiváltására

Redundancia megjelenése

1. Hardver redundancia
   - többlet hardver erőforrások
     - eleve a rendszerben lévők (elosztott rendszer)
     - hibatűréshez betervezett (tartalék)
2. Szoftver redundancia
   - többlet szoftver modulok
3. Információ redundancia
   - többlet információ a hibajavítás érdekében
     - hibajavító kódolás (ECC)
4. Idő redundancia
   - ismételt végrehajtás, hibakezelés többlet ideje

Együttes megjelenés!

Redundancia típusai

- Hidegtartalék (passzív redundancia):
  - normál üzemmódban passzív, hiba esetén aktiválva
  - lassú átkapcsolás (elindítás, állapot frissítés,...)
  - pl. tartalék számítógép
- Langyos tartalék:
  - normál üzemmódban másodlagos funkciók
  - gyorsabb átkapcsolás (indítást nem kell várni)
  - pl. naplózó gép átveszi a kritikus funkciókat
- Meleg tartalék (aktív redundancia):
  - normál üzemmódban aktív, ugyanazt a feladatot végzi
  - azonnal átkapcsolható
  - pl. kettőzés, többszörözés

1. Hardver redundancia

- Többszörözés
  - Kettőzés
    - hibadetektálás: pl. master-checker kialakítás
    - hibatűrés csak diagnosztikai támogatással és átkapcsolással
  - TMR: Triple-modular redundancy
    - hiba maszkolás szavazással
    - szavazó kritikus elem (de egyszerű)
  - NMR: N-modular redundancy
    - hibamaszkolás többségi szavazással
    - MTFF kisebb, de missziós idő túlélése nagyobb esélyű
    - repülőgép fedélzeti eszközök: 4MR, 5MR
- Tipikus: nagy rendelkezésre állású fürtök

2. Szoftver redundancia

Használat:

1. Szoftver tervezési hibák esetén:
   - ismételt végrehajtás nem segít...
   - redundáns modulok: eltérő tervezés szükséges
     variánsok: azonos specifikáció, de
     - eltérő algoritmus, adatstruktúrák
     - más fejlesztési környezet, programnyelv
     - elszigetelt fejlesztés
2. Időleges (hardver) hibák esetén:
   - ismételt végrehajtás esetén a hiba nem jelentkezik
   - hibahatások kiküszöbölése a fontos

3. Információ redundancia

- Hibajavító kódolás
  - memóriák. háttértárak, adatátvitel
  - pl. Hamming-kód, Reed-Solomon kódok
- Korlátozott hibajavító képesség
  - hosszú idejű adatstabilitás rossz lehet ("felgyűlnek" a hibák)
  - háttértárak: "memory scrubbing" folyamatos olvasás és javítva visszaírás
- Redundáns (többpéldányos) adatbázisok:
  - hozzáférések konzisztenciájának biztosítása
  - egypéldányos sorosíthatóság

4. Idő redundancia

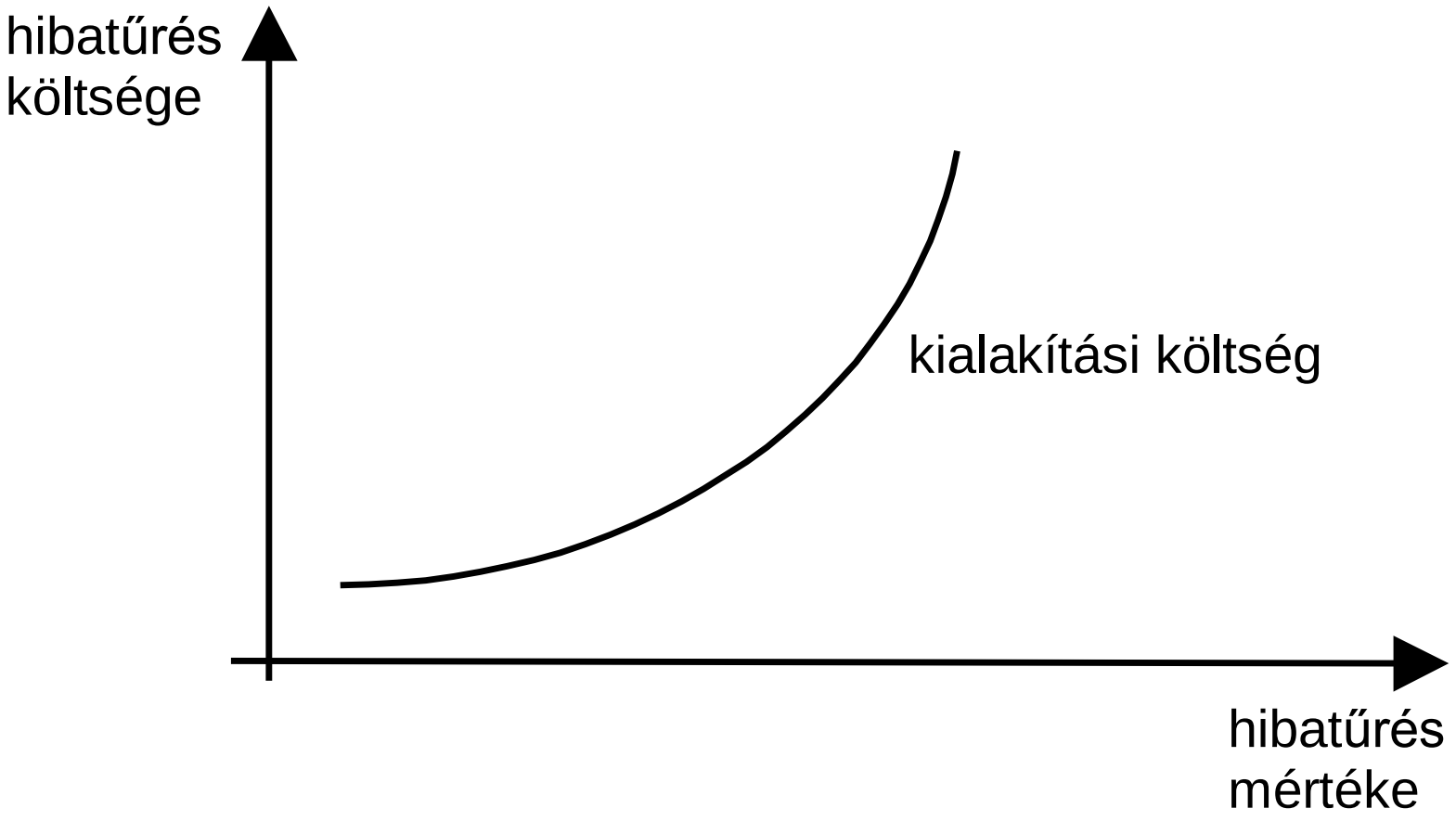
- Tiszta eset: utasítás újrapróbálás (retry)
  - alacsony hardver szinten: processzor utasítás
  - időleges hibák esetén hatásos
- Idő redundancia “velejárója” a többi típusnak

  Valósidejű rendszerek: tervezési szempont
  mennyire garantálható a hibakezelés ideje
  - állandósult hardver hibák: maszkolás, meleg tartalék
  - időleges hardver hibák: előrelépő helyreállítás
  - szoftver tervezési hibák: N-verziós programozás
- a(t), válaszidő SLA fontos tényezője

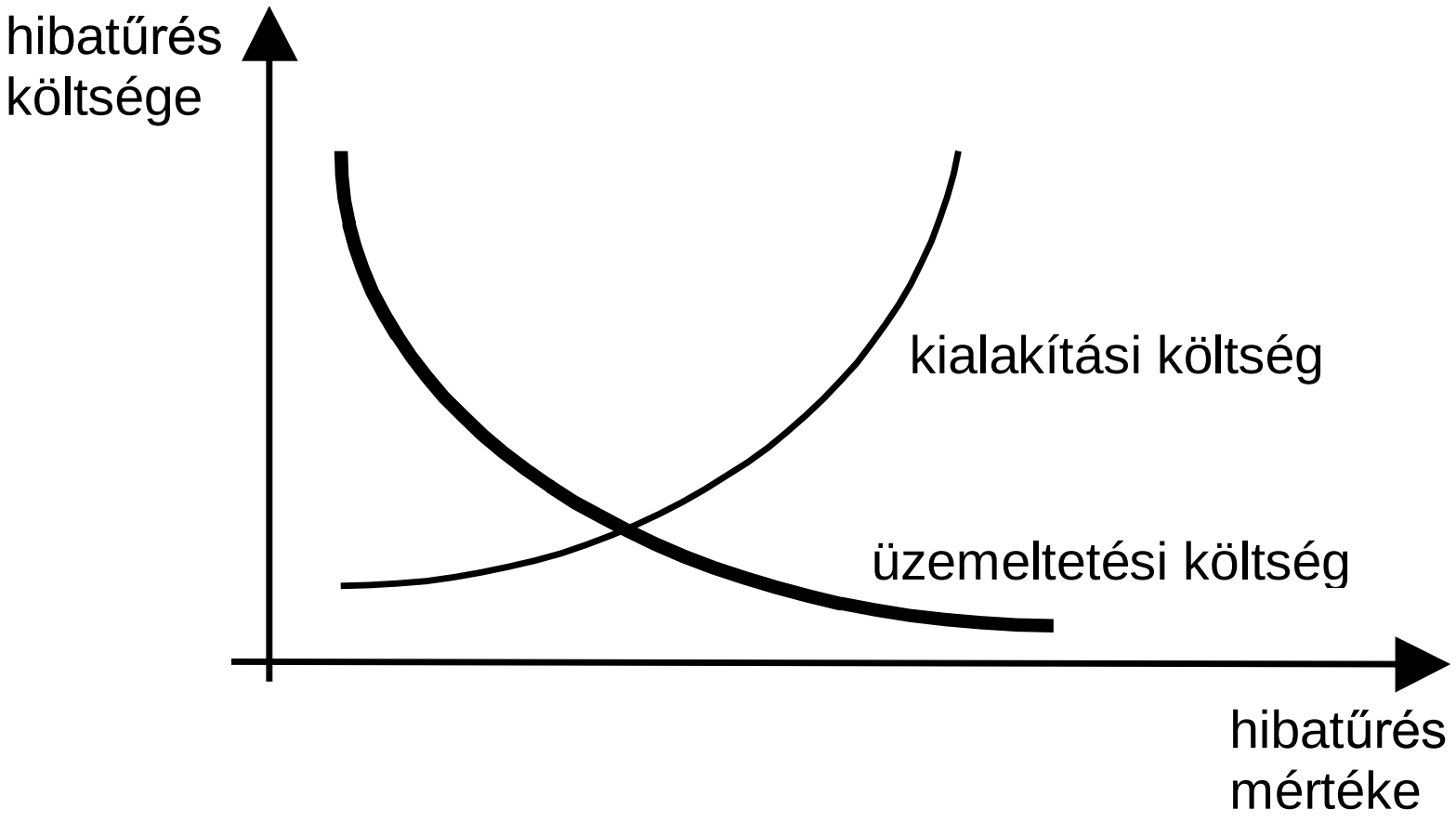
Hibák kezelése

- Hardver tervezési hibák (< 1%):
  - nincs figyelembe véve (ld. jól tesztelt komponensek)
- Hardver állandósult működési hibák (10%):
  - hardver redundancia (pl. tartalék processzor)
- Hardver időleges működési hibák (70-80%):
  - idő redundancia (pl. utasítás újravégrehajtás)
  - információ redundancia (pl. hibajavítás)
  - szoftver redundancia (pl. állapotmentés és helyreállítás)
- Szoftver tervezési hibák (10-20%):
  - szoftver redundancia (pl. eltérő tervezésű modulok)

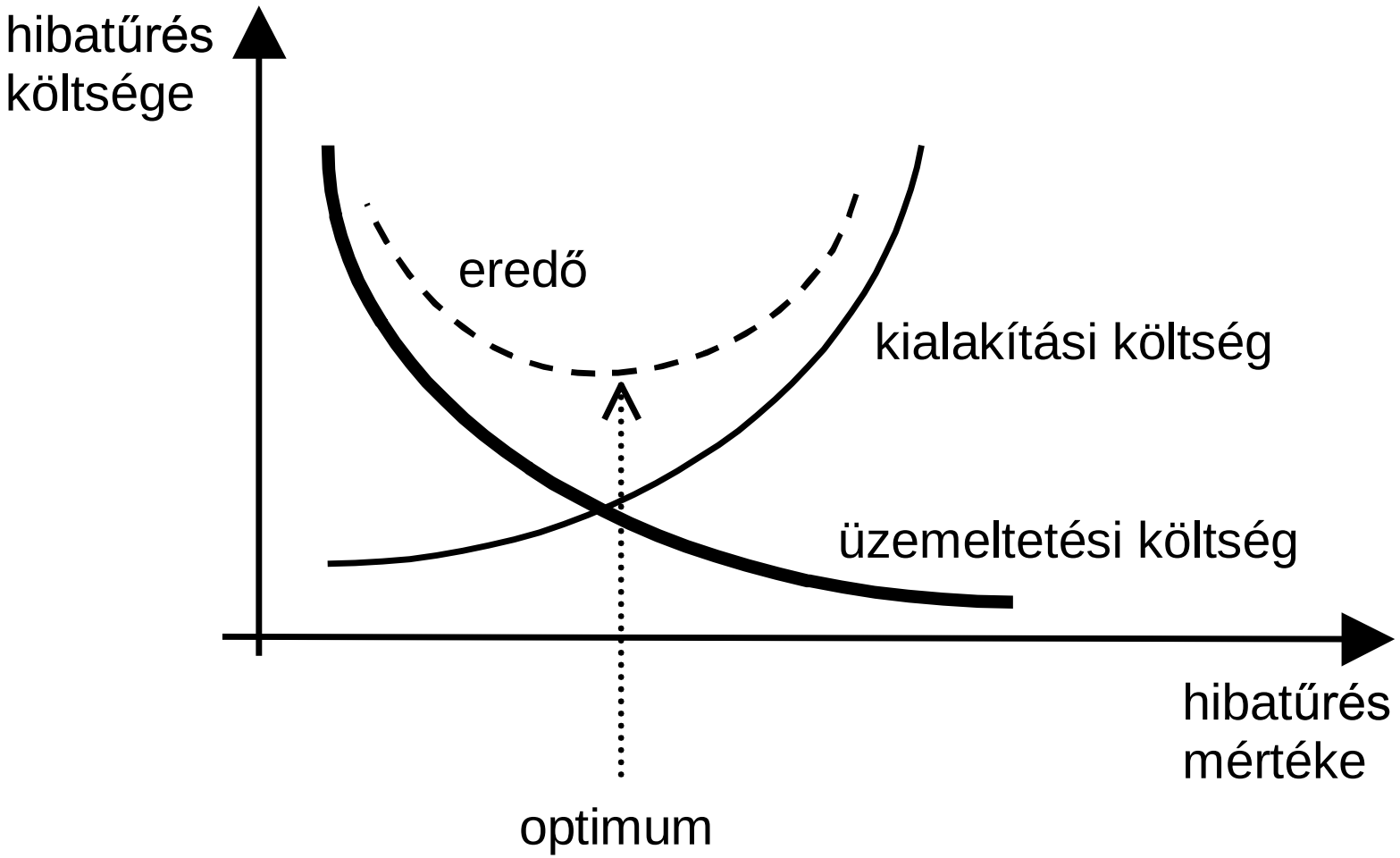
Költségoptimalizálás



Költségoptimalizálás



Költségoptimalizálás



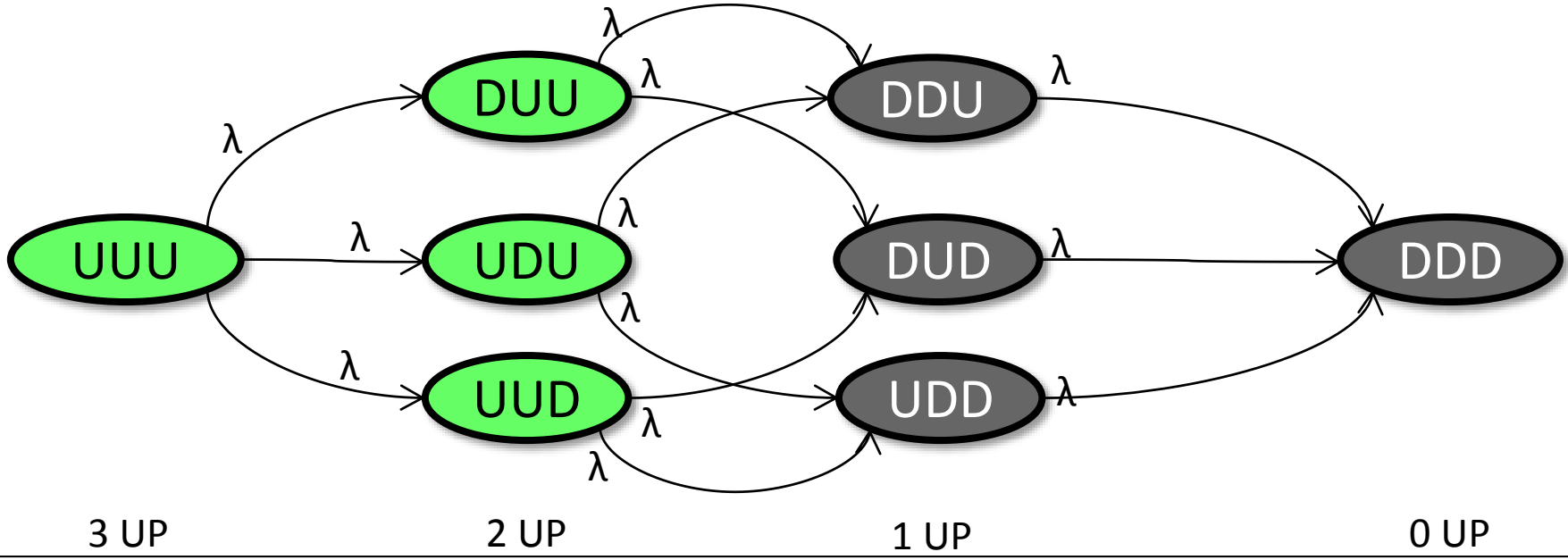
Tartalomjegyzék

Szolgáltatásbiztonság analízise

- Miért van szükség analízisre?
  - Ha bőséges redundanciát biztosítunk, az nem elég?
- A redundancia költséges ☹
- Csak a jól **tervezett** redundancia éri el a célját!
  - Mennyiség
  - Hideg / meleg
  - Javítás
  - …

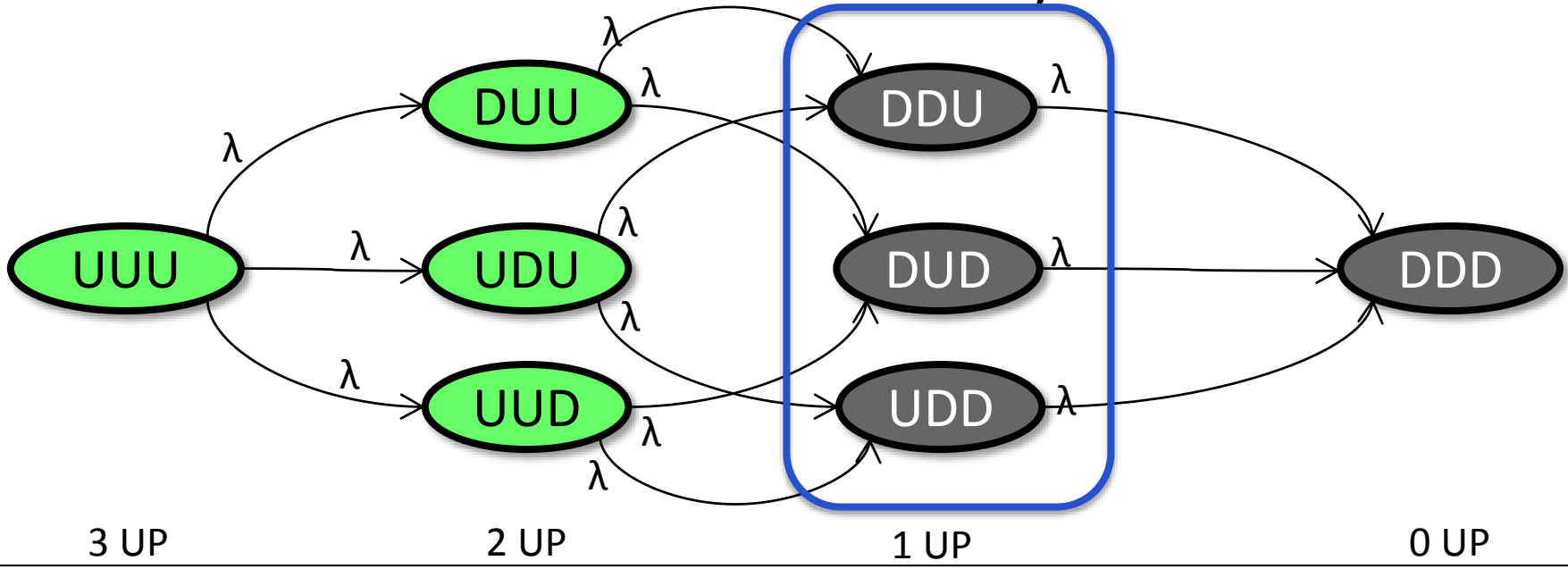
Példa

- 3 merevlemezből álló RAID-5 tömb
  - Két lemeznyi hasznos terület, plusz paritás
  - Egy lemez meghibásodását tűri
- 8 állapot: $\{Up/Down\}^3$
  - Köztük λ állapotátmeneti ráták



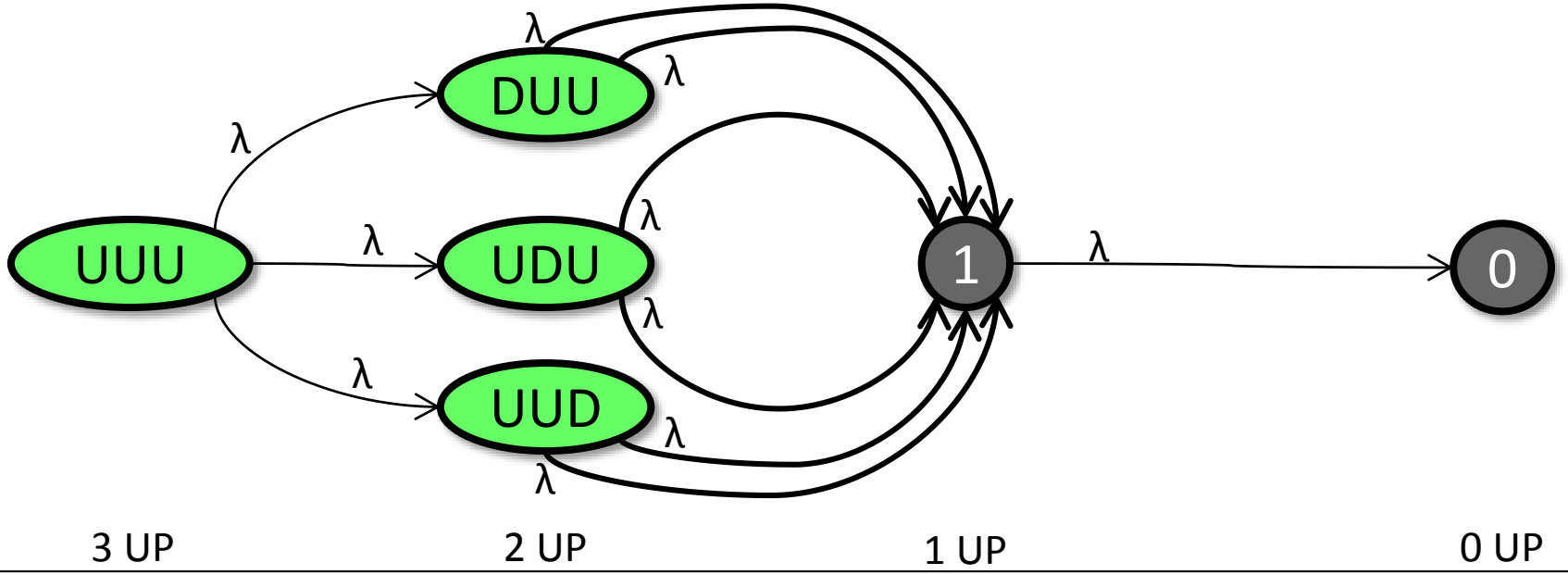
Példa

- 3 merevlemezből álló RAID-5 tömb
  - Két lemeznyi hasznos terület, plusz paritás
  - Egy lemez meghibásodását tűri
- Azonos állapotok összevonhatóak
  - Azonos rendszerszintű következmény és kimenetek



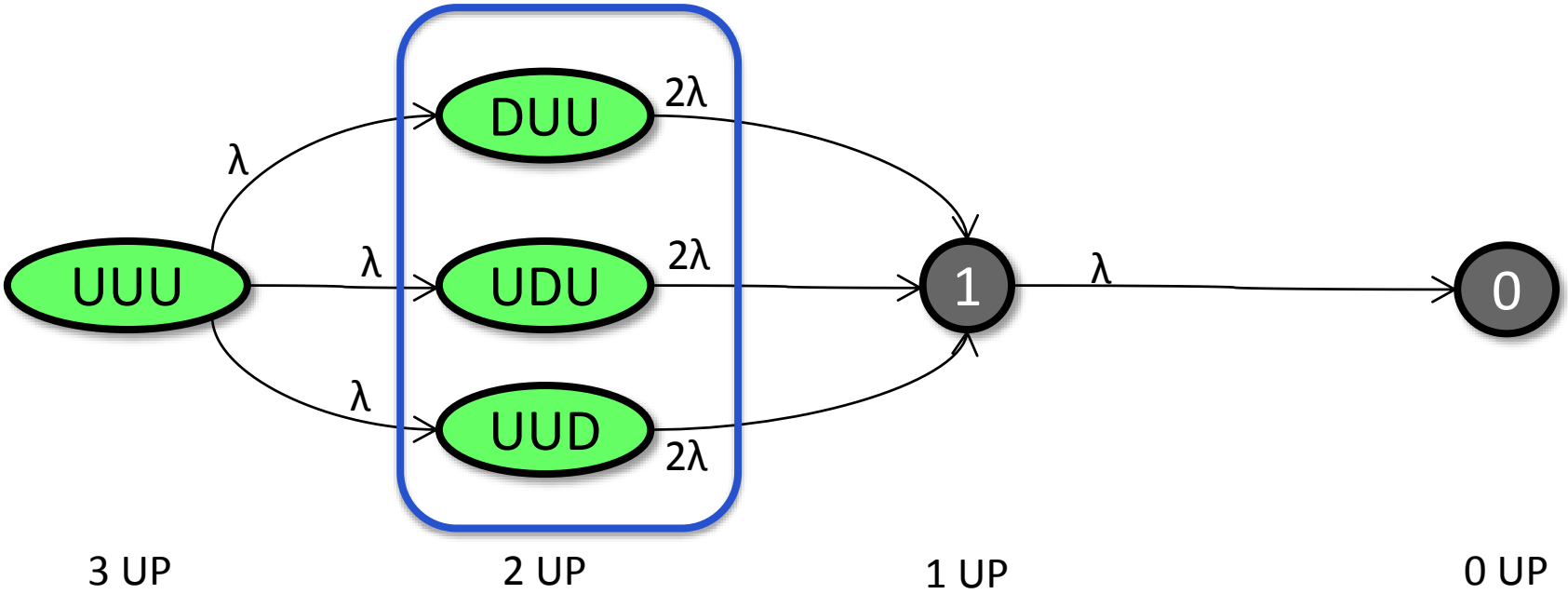
Példa

- 3 merevlemezből álló RAID-5 tömb
  - Két lemeznyi hasznos terület, plusz paritás
  - Egy lemez meghibásodását tűri
- Azonos élek összevonhatóak
  - Állapotátmeneti ráta összeadódik!



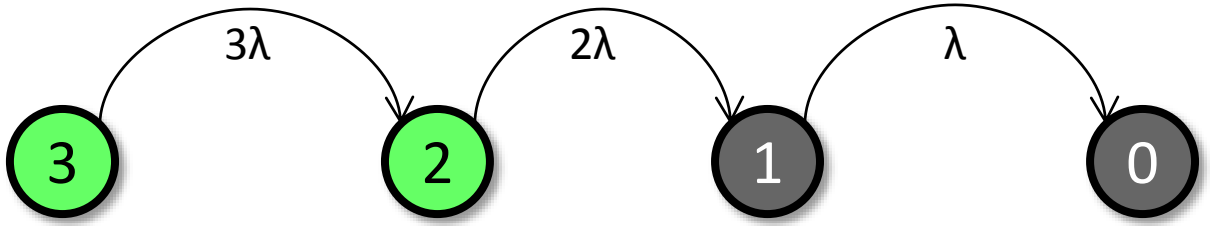
Példa

- 3 merevlemezből álló RAID-5 tömb
  - Két lemeznyi hasznos terület, plusz paritás
  - Egy lemez meghibásodását tűri
- Eljárás folytatása…



Példa

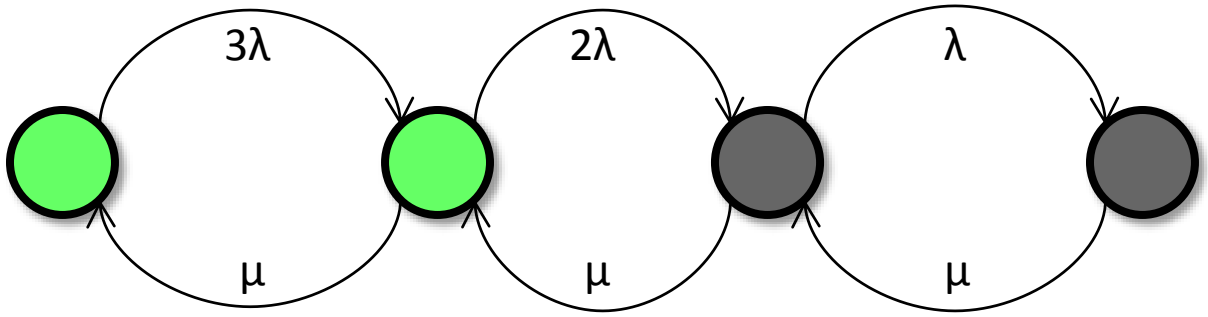
- 3 merevlemezből álló RAID-5 tömb
  - Két lemeznyi hasznos terület, plusz paritás
  - Egy lemez meghibásodását tűri
  - Első meghibásodás rátája: 3λ
    (meleg tartalék → mindhárom lemez kieshet!)



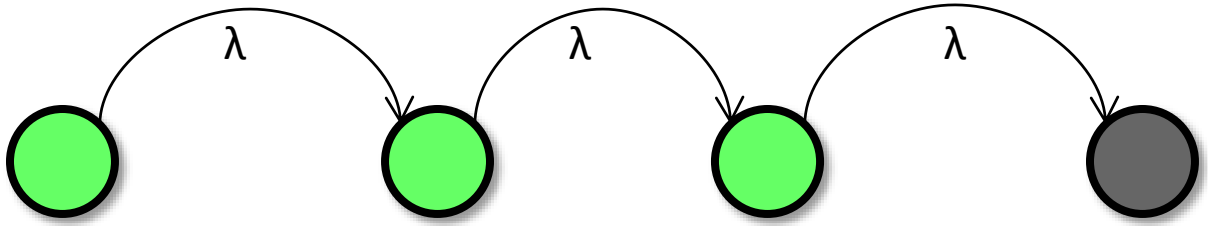
  - MTTF: 1/3λ + 1/2λ = 5/6λ
  - 5/6λ < 1/λ – egy lemez jobb!

Példa

- A redundancia rontotta a megbízhatóságot!
- Megoldás: a kiesett lemezt gyorsan cserélni kell
  - Javítási folyamat felvétele a *Markov-lánc*ba



- Másik példa: három villanykörte, hideg tartalék



Szolgáltatásbiztonság analízise

- Feladatok:
  - Hibamódok, meghibásodások azonosítása
  - Analízis: **kvalitatív és kvantitatív**
- Módszerek
  - Ellenőrző listák
  - Táblázatok
    (pl. FMEA: Failure Mode and Effect Analysis)
  - Hibafák
  - Állapot alapú módszerek (pl. Petri hálók)
  - …

Ellenőrző lista

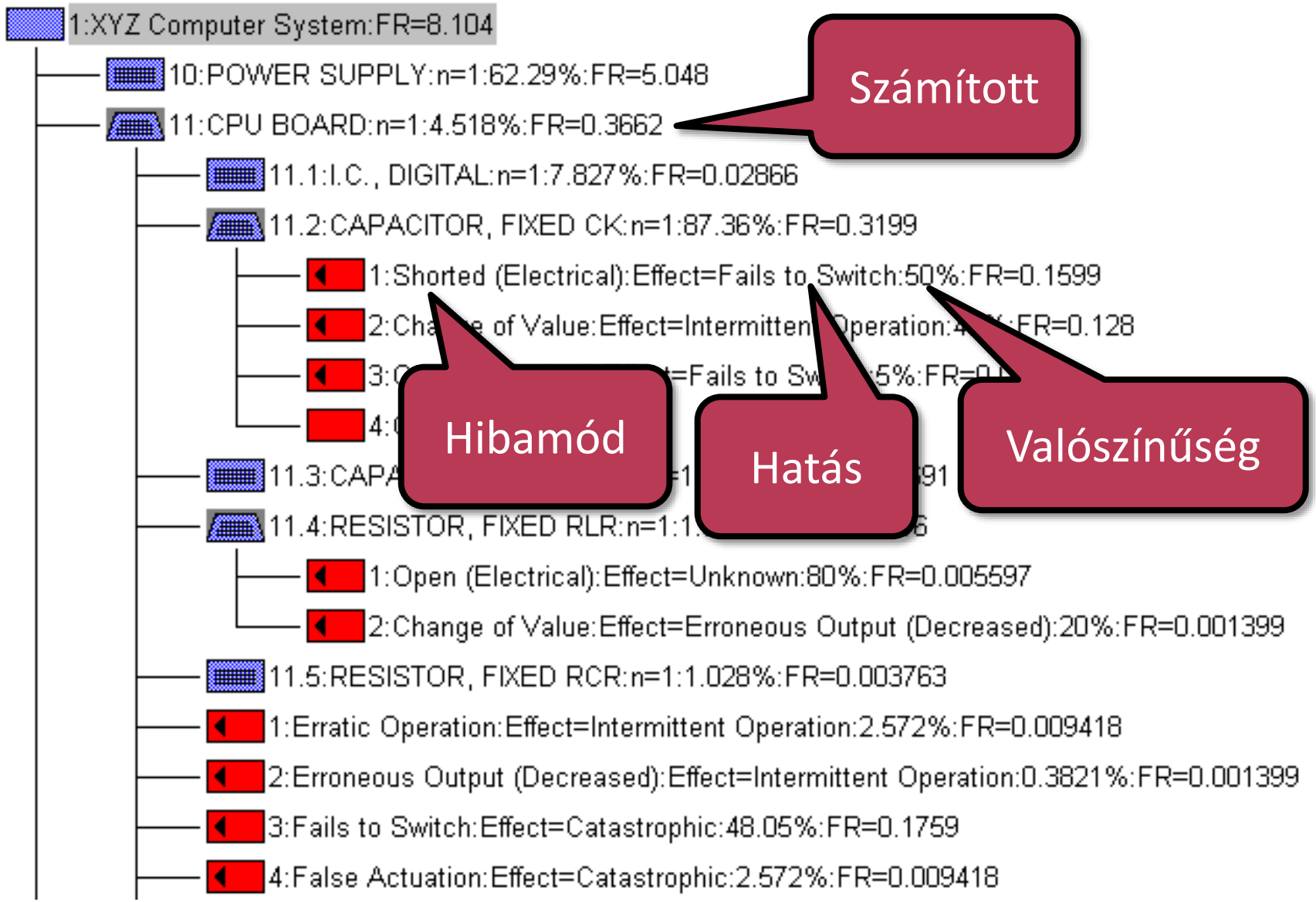
- Technika:
  - Tapasztalatok rendszerezett összegyűjtése
  - Alkalmazás mint „ ökölszabályok”
- Biztosítja:
  - Ismert hibaforrások nem maradnak ki
  - Kipróbált módszereket alkalmaz
- Hátrányok:
  - A lista nem teljes és nehezen kezelhető
  - Téves biztonságérzetet ad
  - Más környezetben az alkalmazhatóság kérdéses

Hibamód és hatás analízis (FMEA)

- Meghibásodás és hatásaik felsorolása

Komponens	Hibamód	Valószínűség	Hatás
Webszerver	HW hiba	10%	Szolg. kiesés, alkatrész csere
	SW frissítés	90%	Időleges kiesés
SQL szerver	Diszk megtelik	20%	Csak statikus tartalom érhető el
…			

Példa: Vezérlő elektronika

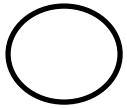


Hibafa – analízis

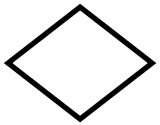
- Kvalitatív:
  - egyszeres hibapont (SPOF) azonosítása
  - kritikus esemény: több úton is hibajelenséget okoz
- Kvantitatív:
  - alapszintű eseményekhez valószínűség rendelése (nehéz: honnan lesznek jó adataink?)
  - gyökérelem jellemzőjének (pl. megbízhatóság) számolása
  - Problémák: nem független események…

Hibafa grafikus elemkészlet

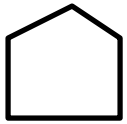
legfelső szintű vagy közbenső esemény



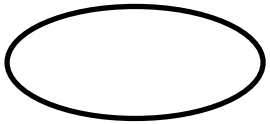
elsődleges (alapszintű) esemény



tovább nem vizsgált esemény



normál esemény (nem hiba vagy veszély)



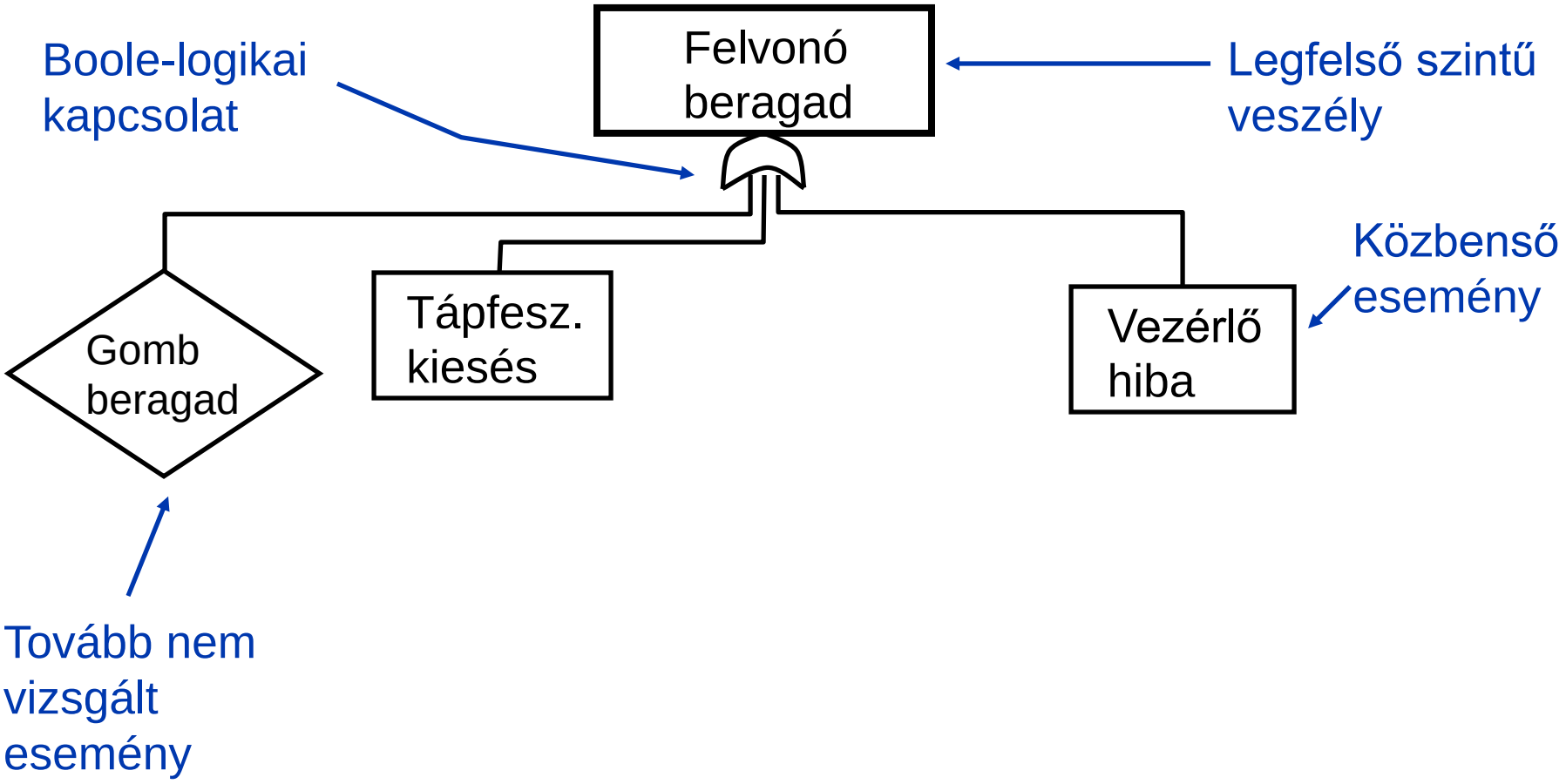
feltétel egy összetett esemény bekövetkezéséhez

ÉS kapu

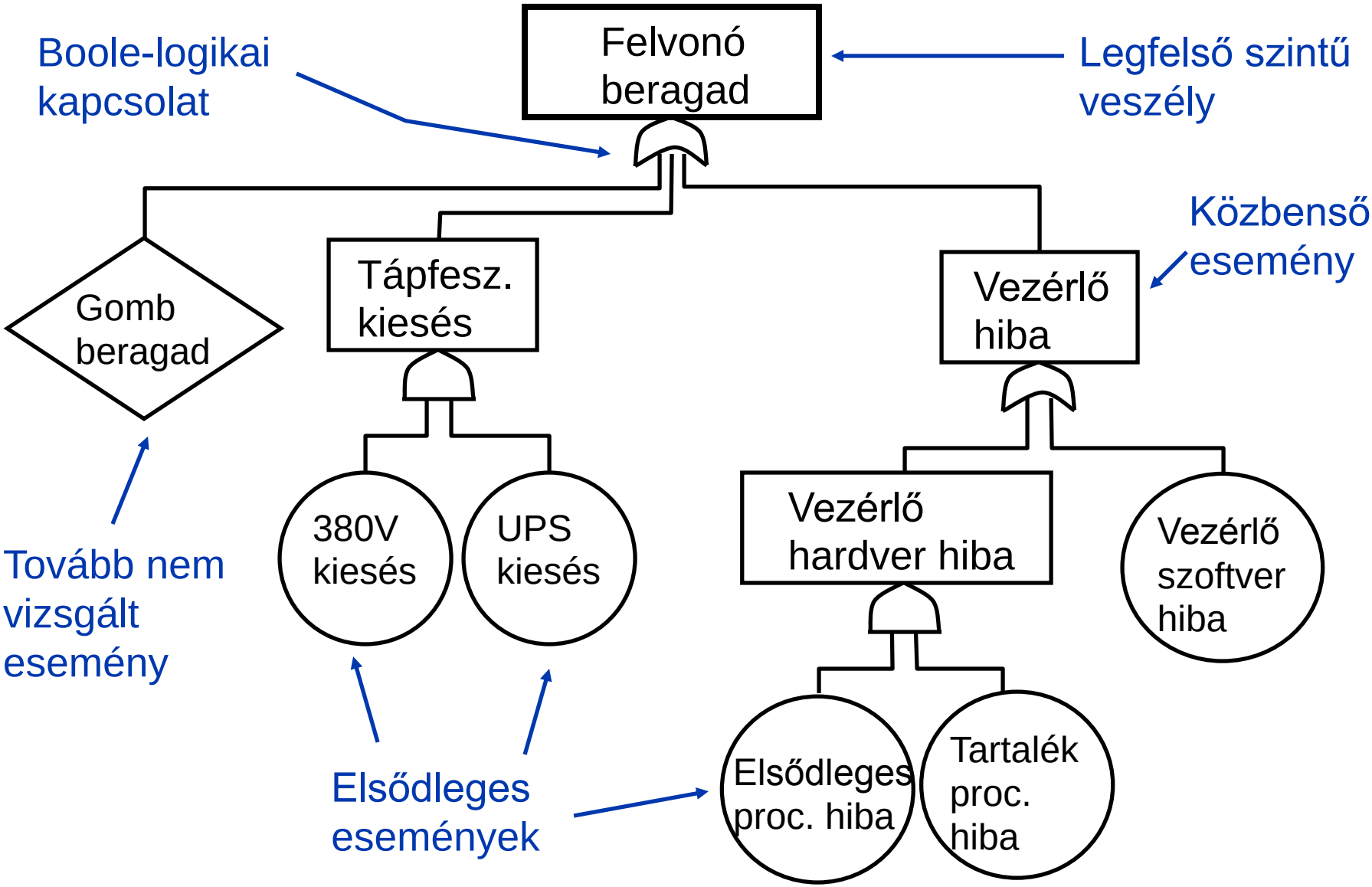
VAGY kapu

Hibafa példa: Felvonó

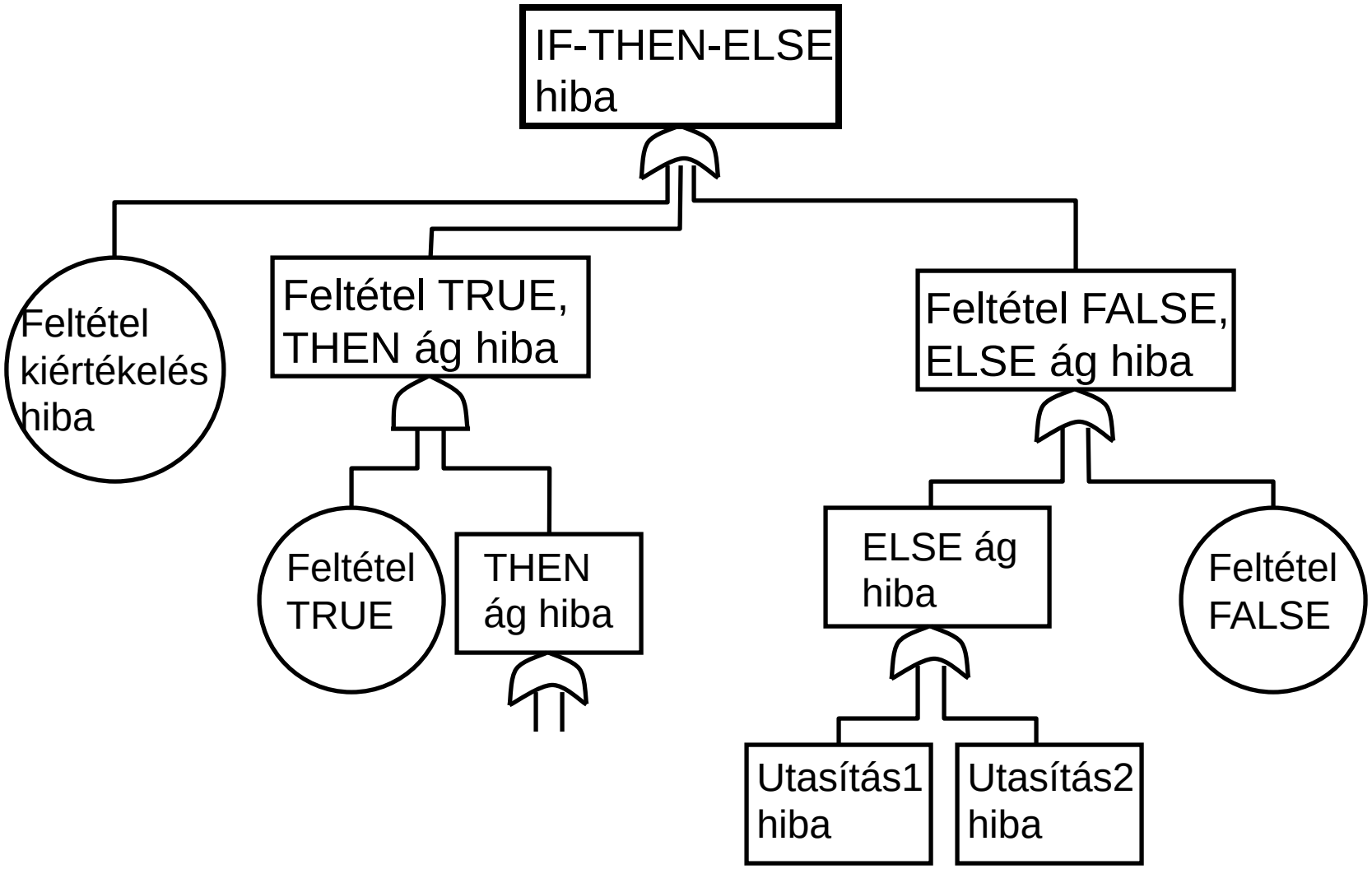
Hibafa példa: Felvonó



Hibafa példa: Felvonó



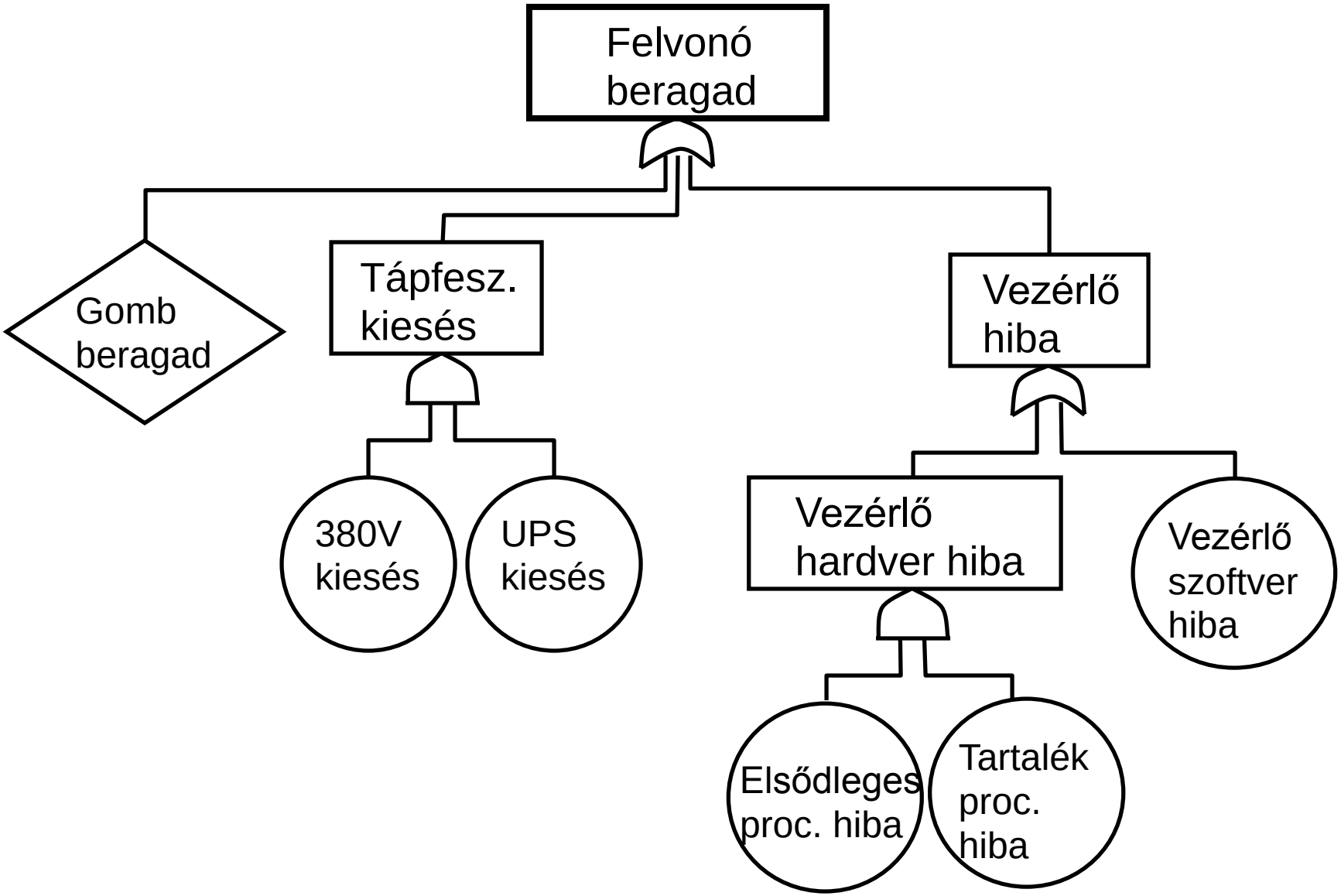
Hibafa példa: Szoftver minta



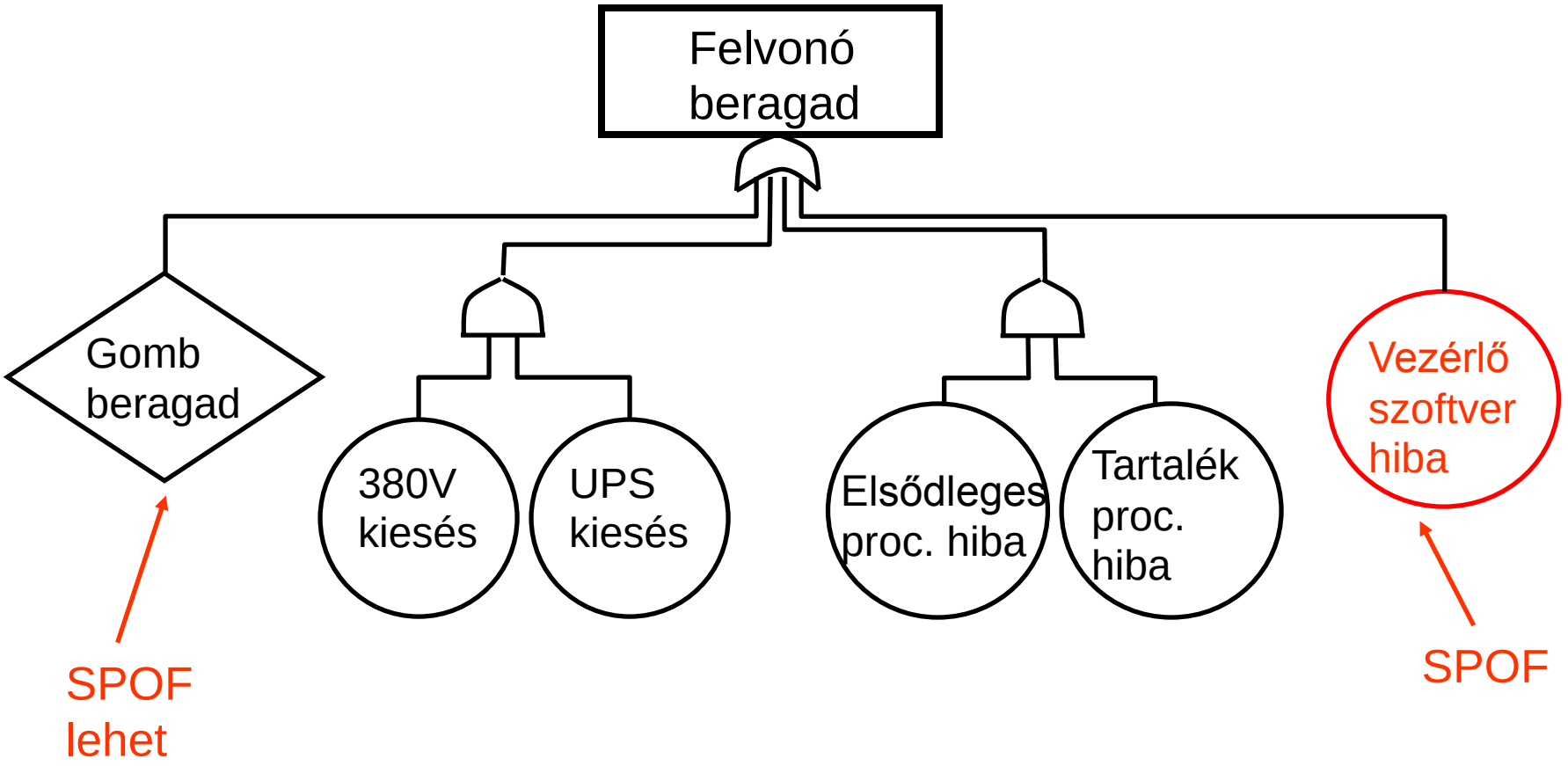
Minőségi (kvalitatív) analízis

- Hibafa redukció: Közbenső események és pszeudo-események feloldása
  → diszjunktív normál forma (OR a legtetején)
- Vágat:
  AND kapuval összefogott elsődleges események
- Minimális vágathalmaz: Nem redukálható
  - Nincs olyan, aminek részhalmaza is megtalálható
- Azonosítható:
  - egyszeres hibapont (SPOF)
  - kritikus esemény (több vágatban is szerepel)

Hibafa példa: Felvonó



Redukált hibafa példa: Felvonó

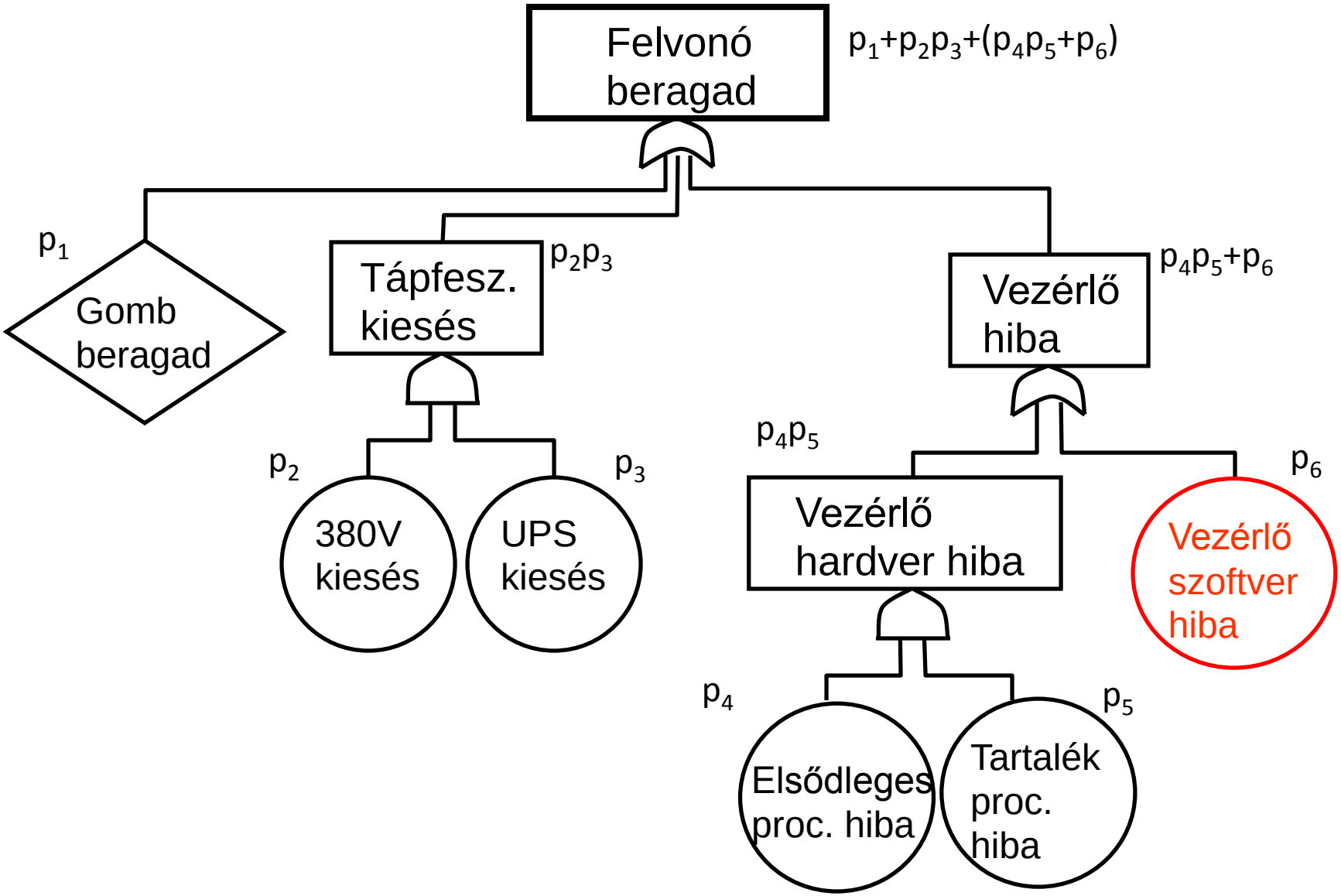


Mennyiségi (kvantitatív) analízis

- Alapszintű eseményekhez rendelt valószínűségek
  - komponens-adat, tapasztalat, becslés
- Rendszerszintű veszély valószínűség számítása
  - AND kapu: szorzat (ha független események)
    pontos: P{A és B} = P{A}P{B|A}
  - OR kapu: összegzés (felső becslés)
    pontos: P{A vagy B} = P{A}+P{B}-P{A és B}<=P{A}+P{B}

- Problémák:
  - korreláló hibák
  - időbeli (hiba)szekvenciák kezelése

Hibafa példa: Felvonó

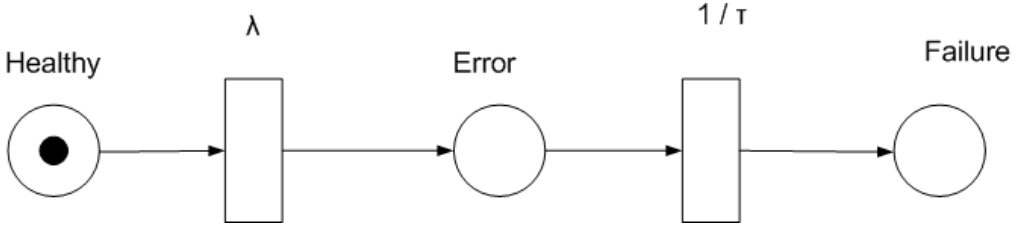


Meghibásodási adatok

- Analízis alapja: meghibásodási valószínűségek
- Honnan lesznek jó adatok:
  - Becslés
  - Saját monitorozó rendszer
  - Külső tanulmányok, számok (hihetőség, pontosság?)
- Példák:
  - Cisco switch MTBF ~ 200000 óra (=22,8 év)
  - IBM S/390 mainframe MTTF 45 év
  - Windows XP MTTF 608 óra
  - webszerver MTTF ~ 16 nap…

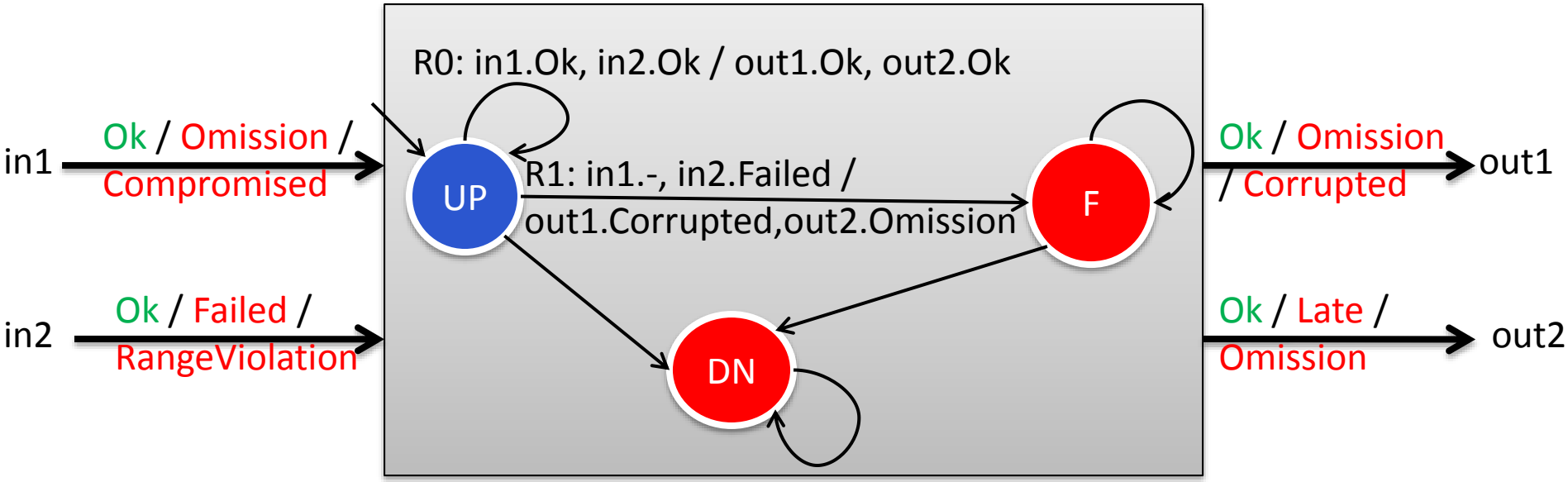
Állapot alapú módszerek

- Hibák kvalitatív leírása: diszkrét viselkedésmodell
  - Állapotgép, adatfolyamháló, folyamat, Petri-háló…
  - Pl. folyamatmodellben: hibakezelési ágak
- Kvantitatív leírás:
  - Időzítés, valószínűség az állapotátmenetekhez
  - Determinisztikus (nincs választási pont, csak véletlen)
  - Valószínűségi eloszlás alapján:
    folytonos vagy diszkrét idejű, markovi sztochasztika

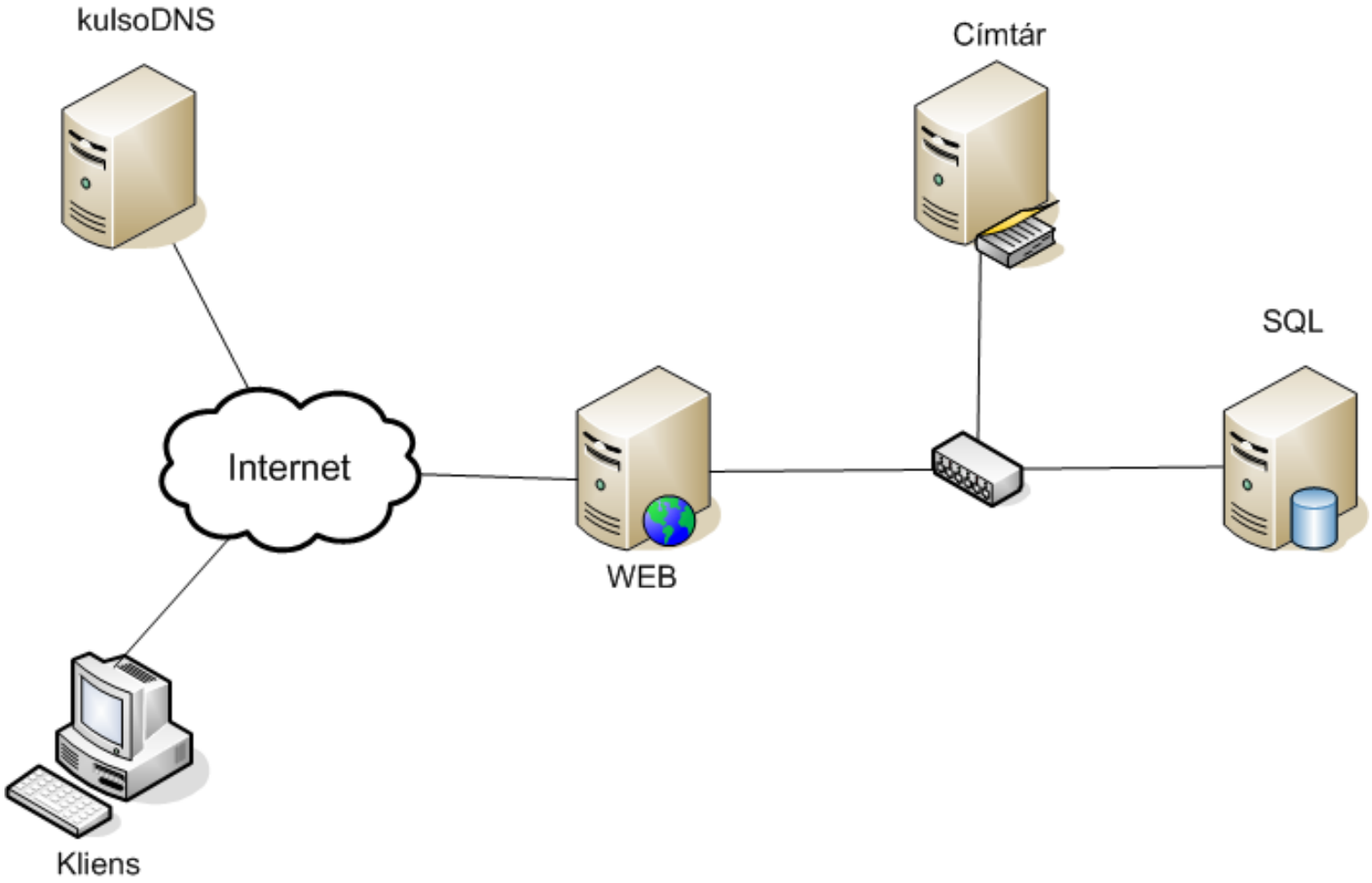


Hibamodellezés adatfolyamhálóval

- Kvalitatív hibamodell → adatfolyamháló
  - Komponens → adatfolyam csomópont
  - Belső hibamódok → csomópont állapotai
  - Komponens kapcsolatok → csatornák
  - Kommunikációs hibamódok → csatorna tokenek



Példa: szolgáltatásbiztonság analízise



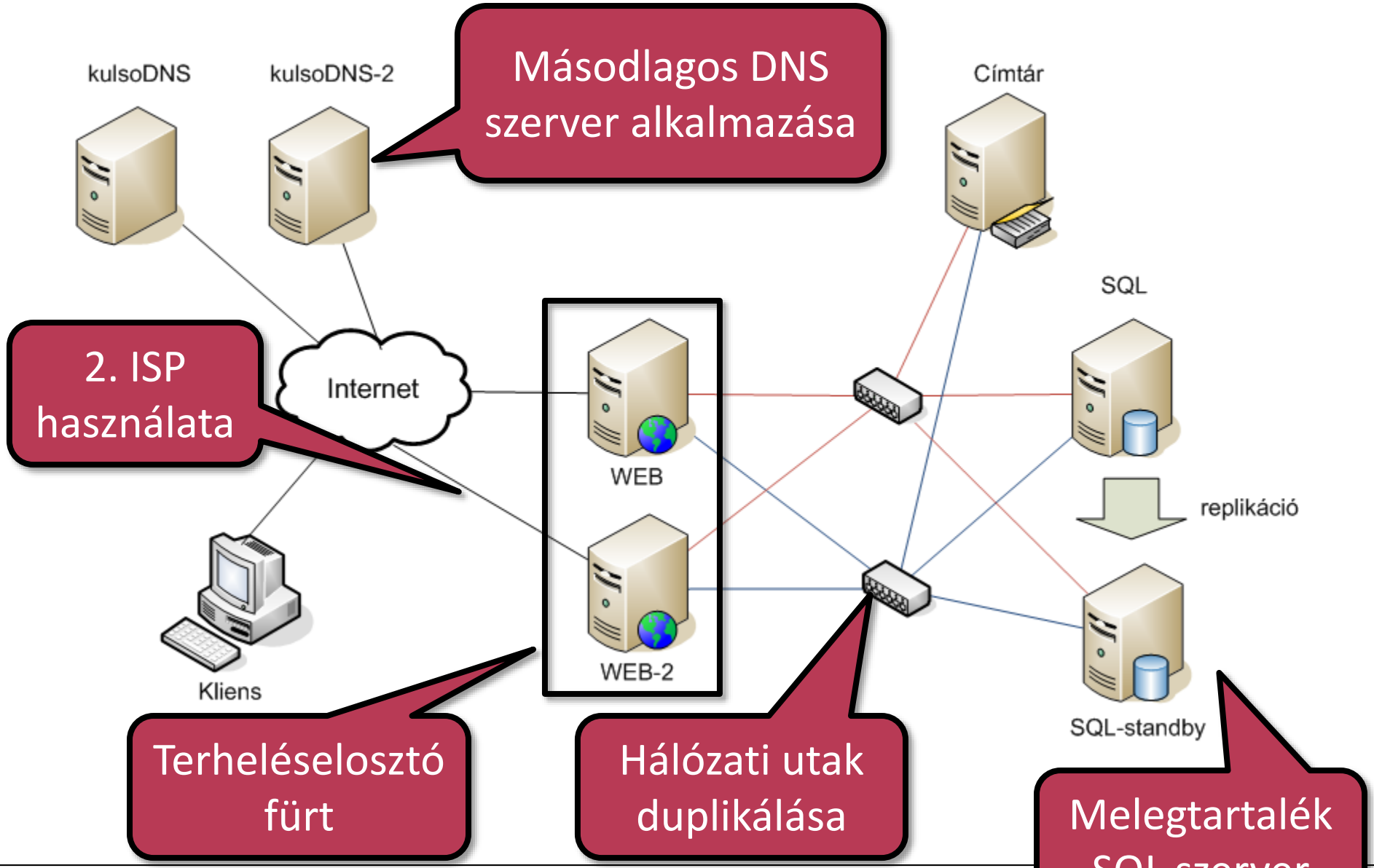
Feladat: Milyen meghibásodások esetén nem lesz elérhető a szolgáltatás (webáruház)?

Feladat: Meghibásodások azonosítása

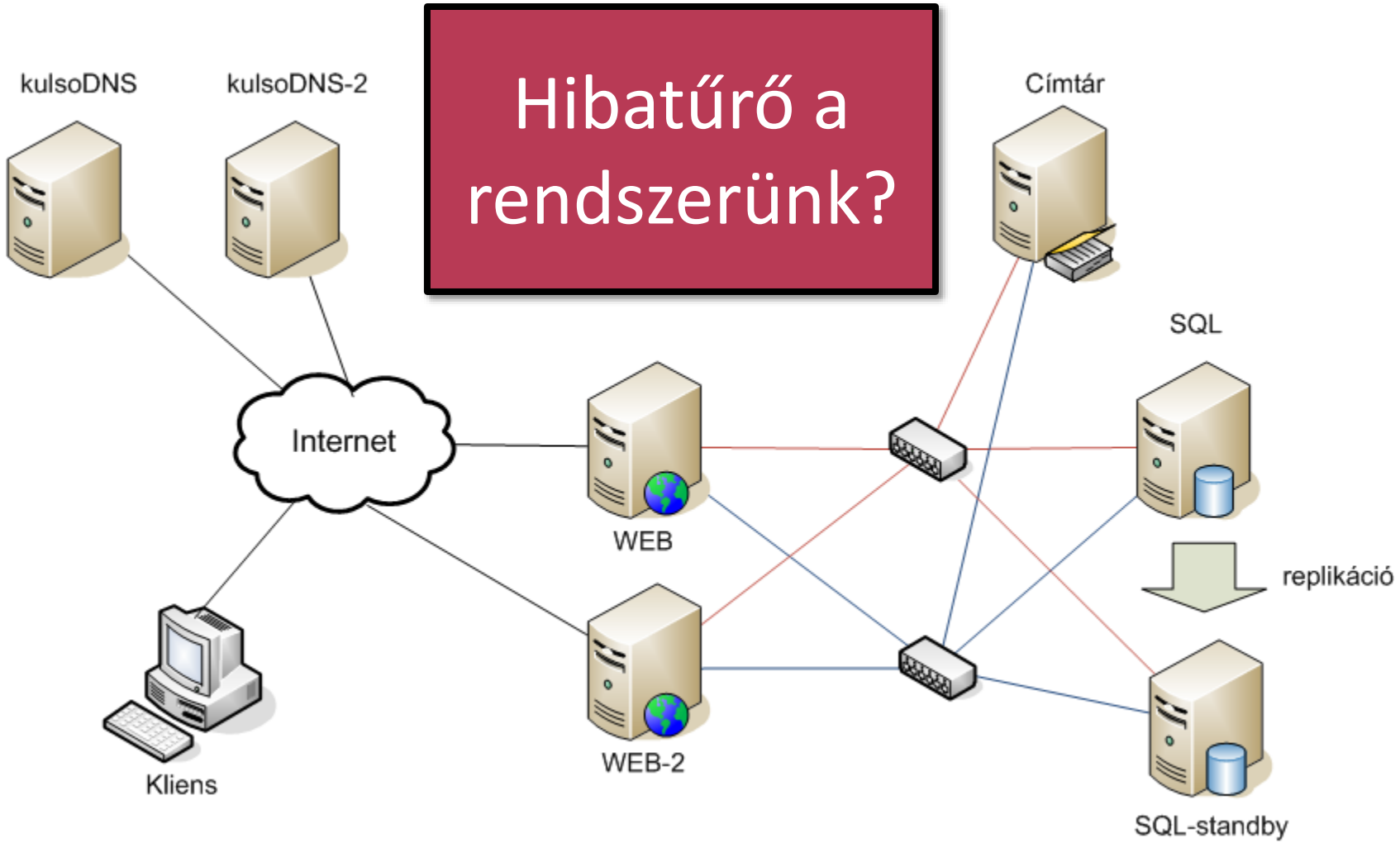
- Milyen meghibásodás esetén nem lesz elérhető a szolgáltatás (webáruház)?

- Áramkimaradás, HW hiba, hálózati elem/kábel hiba, szerver szolgáltatások hibája, alkalmazás hiba, frissítés telepítése, túlterhelés, támadás, félrekonfigurálás, verzió inkompatibilitás, vírus…

Példa: hibatűrés beépítése

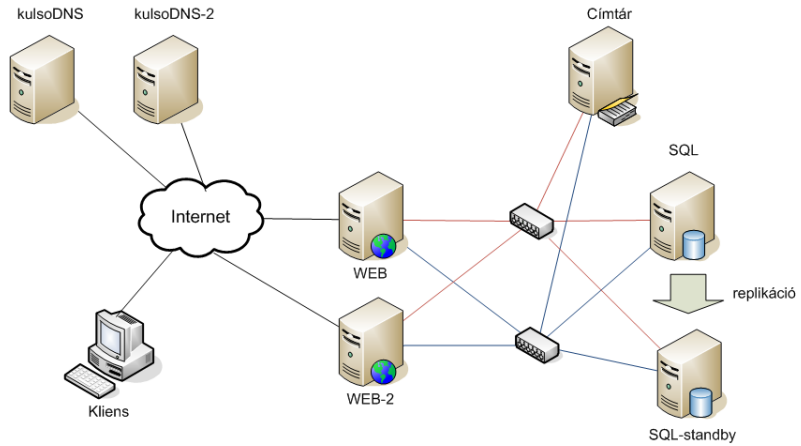


Példa: hibatűrés beépítése



Példa: hibatűrés beépítése

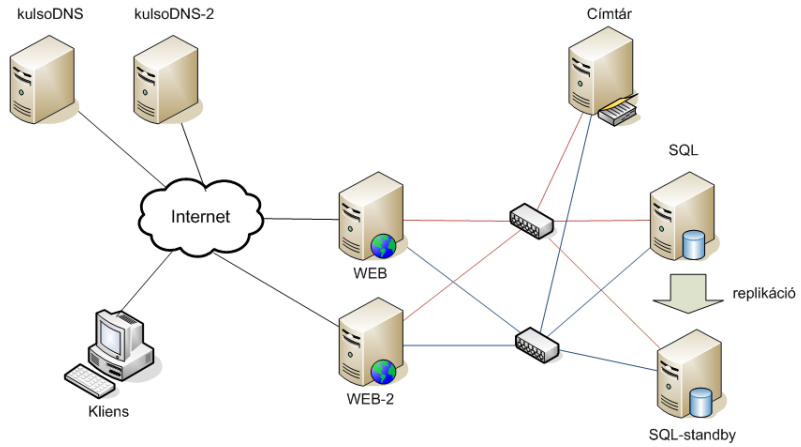
Hibatűrő a rendszerünk?



- Attól függ:
  - Bizonyos SPOF-ek ellen védekeztünk
- DE
  - sok kiesési lehetőség maradt még
  - Adatok törlése, teljes szerverterem elpusztulása, adminisztrátori hibák, OS hotfix miatti újraindítás…

Példa: hibatűrés beépítése

Hibatűrő a rendszerünk?



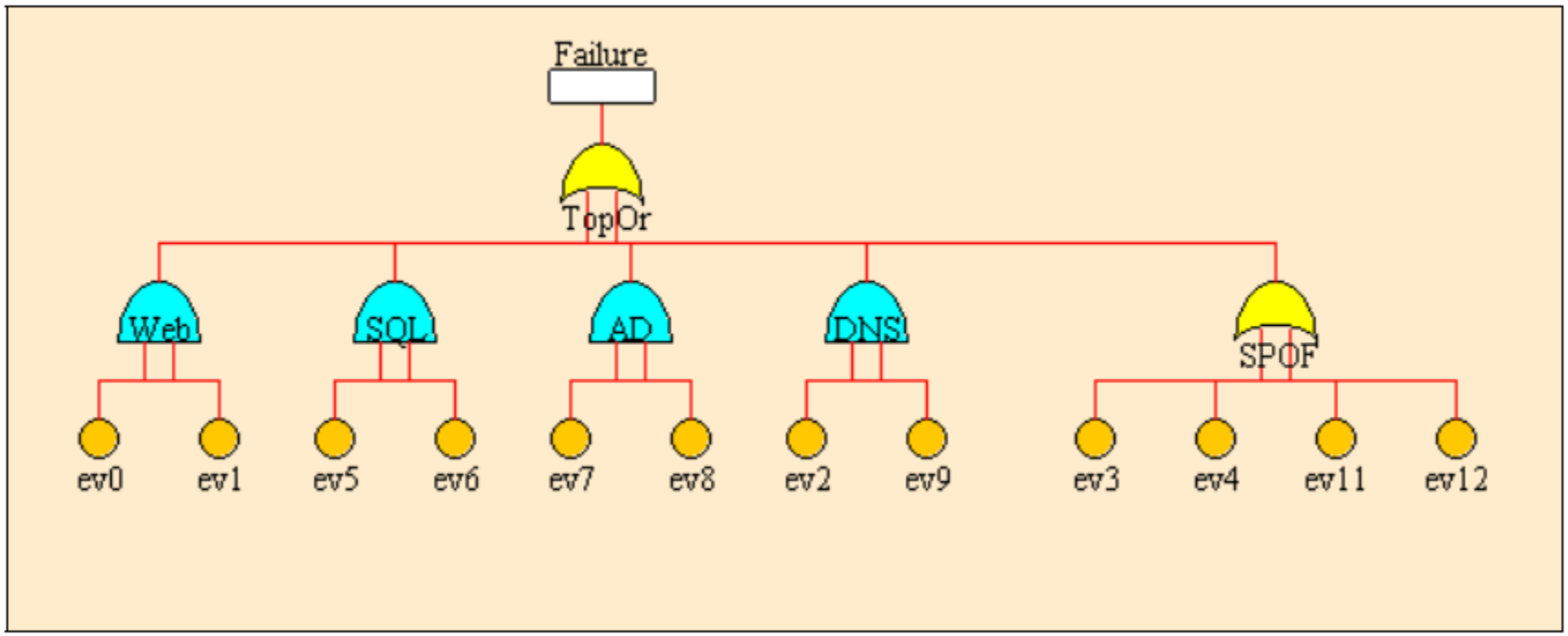
- Att
  -
- DE
  -
  -

Tanulság: mindig tudjuk, hogy
- mi ellen akarunk védekezni,
- milyen módszerek vannak arra,
- megéri-e védekezni

adminisztrátori hibák, OS hotfix miatti újraindítás…

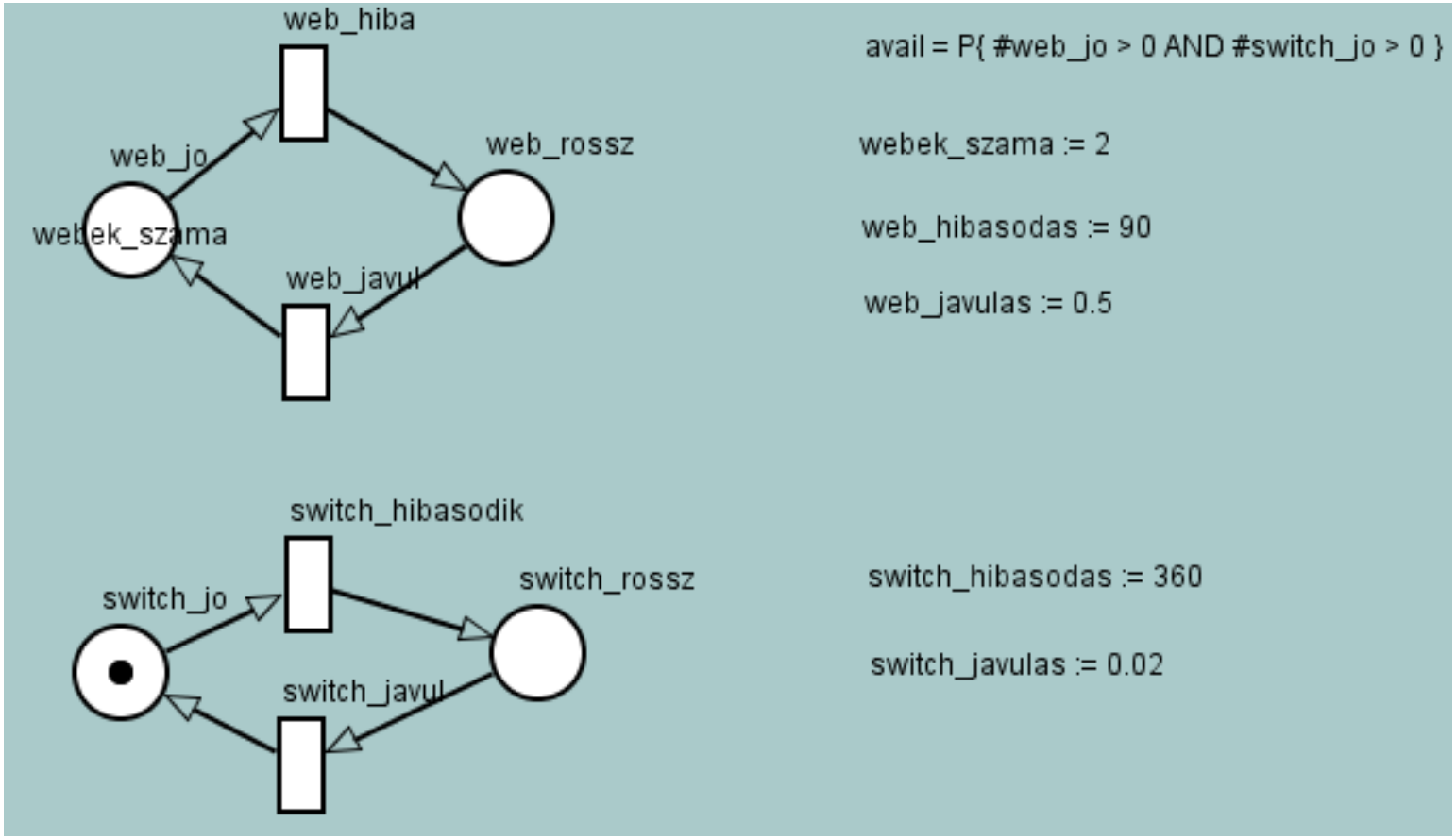
Analízis: hibafa

- SHARPE eszköz
- Hibafa rajzolása



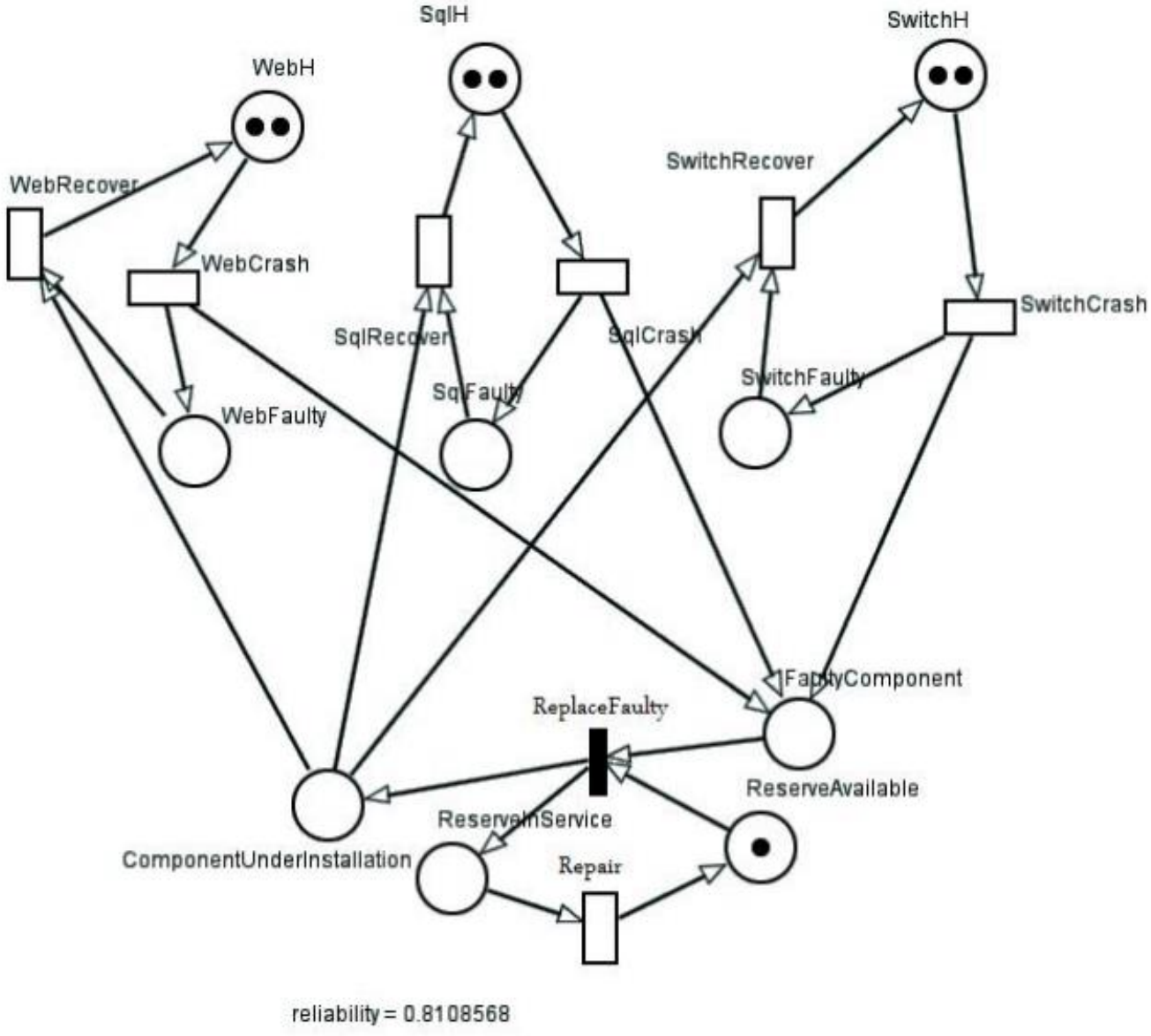
Analízis: Petri-háló

- TimeNET eszköz
- Alap blokkok és paraméterek



Analízis: Petri-háló

A teljes modell:



Analízis: érzékenység és költségvizsgálat

- Érzékenység: melyik paraméter változása befolyásol a legjobban:

ÁTMENET	50% KÉSLELTETÉS	RENDELKEZÉSRE ÁLLÁS	200% KÉSLELTETÉS	RENDELKEZÉSRE ÁLLÁS
WebRecover	0,5	0,8091	2	0,8022
SqlRecover	1	0,8195	4	0,7846
SwitchRecover	0,25	0,8073	1	0,8133
Repair	2	0,9598	8	0,3955

- Költségoptimalizálás:

	Költség	Rendelkezésre állás	Kiesés	Kiesés költsége	Nyereség
Alapmodell	0	0,904	34,931	3 493 050,000	
Tartalék SQL	500 000	0,913	31,792	3 179 150,000	-186 100,000
Tartalék web	**500 000**	**0,921**	**28,945**	**2 894 450,000**	**98 600,000**
Tartalék mindkettőből	1 000 000	0,930	25,733	2 573 250,000	-80 200,000
Web szerver	1 000 000	0,914	31,463	3 146 300,000	-653 250,000
SQL szerver	2 000 000	0,914	31,536	3 153 600,000	-1 660 550,000
Web szerver + tartalék	2 000 000	0,933	24,565	2 456 450,000	-963 400,000
SQL szerver + tartalék	3 000 000	0,936	23,506	2 350 600,000	-1 857 550,000

Összefoglalás

- Szolgáltatásbiztonság
  - Jellemzők, hatáslánc, eszközök
- Hibatűrés
  - Redundancia megjelenése
- Analízis:
  - Mérnöki és matematikai módszerek
  - Hibamódok azonosítása
  - Megfelelő védekezési módszer kiválasztása