

## TRAJNOST KONSTRUKCIJA II

### OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### I. UVODNO: PONAVLJANJE OSNOVNIH POJMOVA

Vremensko razdoblje nakon ugradnje tijekom kojega su nosivost, uporabljivost i druga zahtijevana svojstva konstrukcije iznad minimalno dopustive razine naziva se **UPORABNIM VIJEKOM KONSTRUKCIJE** (u nekim normama se naziva radni vijek).

**TRAJNOST KONSTRUKCIJE** je njena sposobnost posjedovanja zahtijevane razine sigurnosti i uporabljivosti u određenom vremenskom razdoblju pod utjecajem pretpostavljenih uzročnika.

Pri tome je **SIGURNOST KONSTRUKCIJE** njena sposobnost podnošenja vanjskih djelovanja (**nosivost**) uz određeni koeficijent sigurnosti, dakle s većom ili manjom rezervom (ili pričuvom).

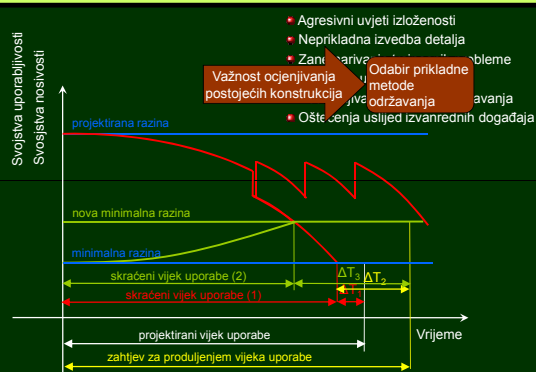
**UPORABLJIVOST KONSTRUKCIJE** je njena sposobnost udovoljavanja zahtjevima namjene odnosno sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata da tijekom vremena zadrže odgovarajuća svojstva ponašanja.

**POUZDANOST KONSTRUKCIJE** je pojam koji objedinjuje i sigurnost i uporabljivost i trajnost konstrukcije. Ako se s  $P_f$  označi vjerojatnost otkazivanja konstrukcije, onda se pouzdanost može shvatiti kao vjerojatnost da neće doći do otkazivanja (vjerojatnost preživljavanja) te se može definirati kao komplement od  $P_f$ .

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

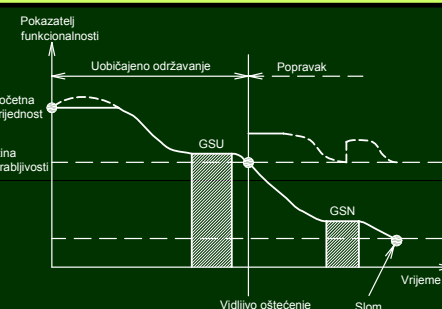
#### I. UVODNO



TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA

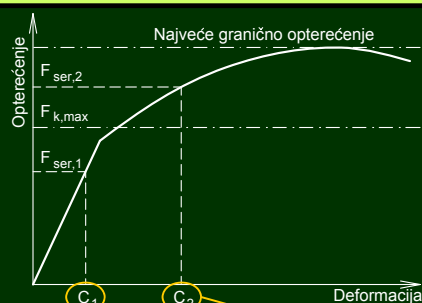


Moguće ponašanje konstrukcije tijekom radnog vijeka uz prikladni pokazatelj funkcionalnosti (mehanička svojstva, financijska, svojstva pouzdanosti ili slično)

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA



Ako se primjenjuje strože granično deformiranje  $C_1$ ,  
 $F_{ser,1} < F_{k,max}$

U većini slučajeva primjenjuje se veće granično deformiranje  $C_2$  pa je  
 $F_{k,max} < F_{ser,2}$

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA

OSNOVNI ZADATAK OCJENJIVANJA UTVRDITI DA KONSTRUKCIJA ILI NEKI NJEN DIO NEĆE OTKAZATI POD OPTEREĆENJEM. OCJENJIVANJE GSN PROVODE SE ZA:

- ♦ gubitak ravnoteže konstrukcije ili njenih dijelova kao krutog tijela (prevrtanje)
- ♦ postizanje maksimalnog kapaciteta otpornosti
- ♦ transformaciju konstrukcije ili njenog dijela u mehanizam
- ♦ nestabilnost konstrukcije ili njenog dijela
- ♦ naglu promjenu pretpostavljenog konstrukcijskog sustava u novi sustav (proboj).

SMANJENJE UPORABLJIVOSTI MOŽE VODITI OGRANIČAVAJUĆOJ UPOTREBI KONSTRUKCIJE PA ĆE BITI POTREBNO I OCJENJIVANJE UPORABLJIVOSTI KOJE UKLJUČUJE:

- ♦ lokalna oštećenja koja mogu smanjiti vijek uporabe konstrukcije
- ♦ neočekivana deformiranja koja utječu na djelotvornu uporabu
- ♦ izrazite vibracije koje izazivaju nelagodu kod ljudi – korisnika konstrukcije.

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

1. PROUČAVANJE DOKUMENTACIJE
2. PREGLEDI KONSTRUKCIJE I ISPITIVANJA MATERIJALA
3. ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE
4. PRAĆENJE PROMJENLJIVIH DJELOVANJA I UVJETA OKOLIŠA NA KONSTRUKCIJU

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

1. PROUČAVANJE DOKUMENTACIJE

- ♦ **OPTEREĆENJA** se određuju
  - ▶ iz važećih propisa za opterećenja
- ♦ **UVJETI OKOLIŠA**
  - ▶ iz izvještaja o prethodnim pregledima i održavanju konstrukcije
- ♦ **SVOJSTVA OTPORNOSTI** (materijala i konstrukcije) dobivaju se iz
  - ▶ propisa,
  - ▶ crteža,
  - ▶ nekih dijelova projekta građevine (proračun, geotehnički elaborat),
  - ▶ dokumentacije o izgradnji (isporuka materijala) i
  - ▶ iz izvještaja o prethodnim pregledima i održavanju.



TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

2. PREGLEDI KONSTRUKCIJE I ISPITIVANJA MATERIJALA

♦ **PROMJENE POPREČNIH PRESJEKA I UZDUŽNE GEOMETRIJE** od preopterećenja (oštećenja, pukotine, napuknuća) i od procesa dotrajavanja (korozija, ljuštenje, pukotine od zamora) utvrđuju se uporabom lasera, ultrazvučnih uređaja, kliznih mjerila i elektroničkih mjerila, ...

♦ **CJELOVITOST KONSTRUKCIJE** (traženje skrivenog oštećenja ili nehomogenosti) uporabom npr. ispitivanja udarnim odzvanjanjem (ispitivanje impact echo)

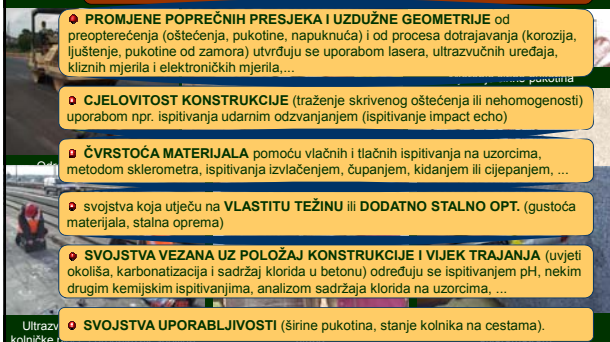
♦ **ČVRSTOĆA MATERIJALA** pomoću vlačnih i tlačnih ispitivanja na uzorcima, metodom sklerometra, ispitivanja izvlačenjem, čupanjem, kidanjem ili cijepanjem, ...

♦ svojstva koja utječu na **VLASTITU TEŽINU** ili **DODATNO STALNO OPT.** (gustoća materijala, stalna oprema)

♦ **SVOJSTVA VEZANA UZ POLOŽAJ KONSTRUKCIJE I VIJEK TRAJANJA** (uvjeti okoliša, karbonatizacija i sadržaj klorida u betonu) određuju se ispitivanjem pH, nekim drugim kemijskim ispitivanjima, analizom sadržaja klorida na uzorcima, ...

♦ **SVOJSTVA UPORABLJIVOSTI** (širine pukotina, stanje kolnika na cestama),

Ultrazvuk kolničke

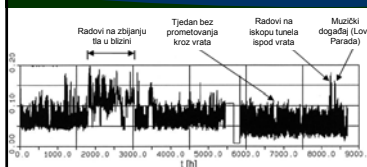


### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

3. ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

▶ Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati

♦ **PRAĆENJE STANJA KONSTRUKCIJE** (za neprekidno ili periodično promatranje cjelovitosti) Mjere se pomaci, deformacije i naprezanja, razvoj oštećenja (širine pukotine) i svojstva vibriranja s ciljem otkrivanja promjena u svojstvima konstrukcije a ponekad i zbog mogućeg upozorenja da je granično stanje dosegnuto ili premašeno.



Praćenje dinamičkih učinaka djelovanja na Brandenburškim Vratima, Berlin. Periodi opterećenja i pojedinačni događaji su dobro uočljivi.

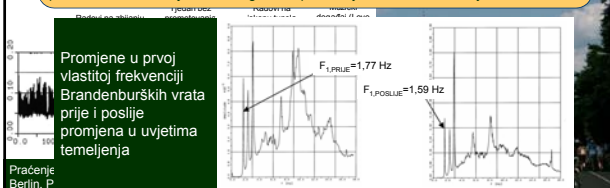


### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

3. ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

▶ Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati

♦ **PREPOZNAVANJE SUSTAVA STATIČKIM I DINAMIČKIM MJERENJIMA** kako bi se odredila krutost elemenata i spojeva, popustljivost zglobova ili uvjeti oslanjanja. Mjerenja se provode na stvarnoj konstrukciji pa je na temelju rezultata (statička svojstva – progibi, nagibi; dinamička svojstva – pripadne frekvencije i modalni oblici) moguće poboljšati proračunski model koji će više odgovarati ponašanju stvarne konstrukcije.



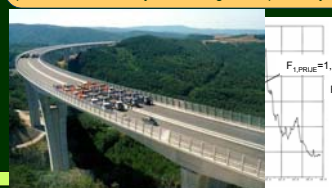
Praćenje Berlin, P

### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

3. ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

▶ Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati

♦ **DOKAZNO OPTEREĆENJE** U okviru GSU učinak djelovanja mjeri se nakon primjene dokaznog opterećenja i ovisno o tome je li odgovarajuća mjera prekoračila granično stanje ili ne daje se ocjena u sljedećem koraku. U okviru GSN činjenica da konstrukcija ili neki njen element nisu otkazali tijekom ispitivanja dokazuje da granično stanje nije premašeno.



### III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

#### 4. PRAČENJE PROMJENLJIVIH DJELOVANJA I UVJETA OKOLIŠA NA KONSTRUKCIJU

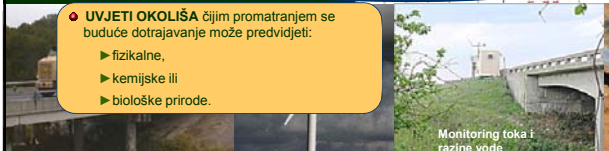
Na temelju praćenja **STVARNIH DJELOVANJA** na konstrukciju razvijaju se **LOKALIZIRANI MODELI PROMJENJIVOG OPTEREĆENJA** koji se kod viših razina ocjenjivanja rabe umjesto normiranih modela djelovanja.

Određuju se učinci djelovanja od **IZVANREDNIH DOGAĐAJA** kao što su:

- specijalna vozila,
- izvanredni vjetar i
- potres.

**UVJETI OKOLIŠA** čijim promatranjem se buduće dotrajavanje može predvidjeti:

- fizikalne,
- kemijske ili
- biološke prirode.



### IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

- Za niže razine ocjenjivanja, konzervativne metode
- Jednostavni proračunski modeli: prostorni okviri i roštiji (štapni elementi)
- Pojednostavljene raspodjele opterećenja i linearno elastično ponašanje mater.
- Rezultat – rješenje ravnoteže na donjoj granici.

#### 2. SLOŽENE METODE PRORAČUNA

#### 3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

#### 2. SLOŽENE METODE PRORAČUNA

- Metoda konačnih elemenata i nelinearne metode (analiza granice popuštanja) koje mogu rezultirati većim kapacitetom nosivosti
- Modeliranje vremenski promjenjivog ponašanja materijala (skupljanje i puzanje) te uzimanje u obzir međudjelovanja između sastojaka materijala (prianjanje, utjecaj ugrađene armature) → skrivene rezerve konstrukcije i smanjenje konzervativizma

#### 3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

#### 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

#### 2. SLOŽENE METODE PRORAČUNA

#### 3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

- Novo informacije o ponašanju konstrukcije – proračunske modele treba prilagođavati
- Moguće je obnoviti konstrukcijske varijable (npr. svojstva krutosti) uporabom izmjerenih podataka kao što su promjene u pomacima, deformacijama, vrijednostima oštećenja (npr. širine pukotina).

### V. POSTUPCI DOKAZIVANJA POUZDANOSTI

#### 1. DETERMINISTIČKI

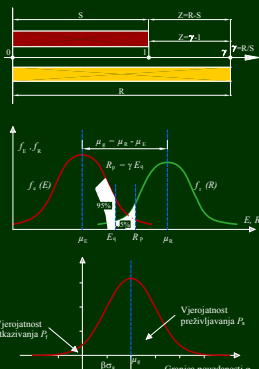
$$\gamma \cdot S \leq R$$

#### 2. POLU-PROBABILISTIČKI

$$\gamma_E \cdot E \leq \frac{R}{\gamma_R}$$

#### 3. PROBABILISTIČKI

$$\beta > \beta_{target}$$



TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### A. TEORIJA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJA

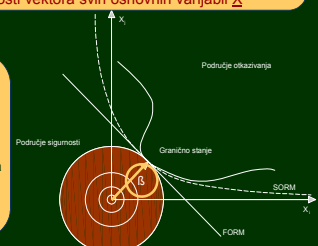
Vjerojatnost otkazivanja se može općenito izraziti s funkcijom ponašanja  $g$  za koju vrijedi ako  $g > 0 \rightarrow$  konstrukcija će preživjeti;  $g \leq 0 \rightarrow$  konstrukcija će otkazati:

$$P_f = \text{vjerojatnost}(g \leq 0) = \int_{g \leq 0} \phi(\underline{X}) d\underline{X} = \int_{g \leq 0} \phi(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti vektora svih osnovnih varijabli  $\underline{X}$

Metode proračuna:  
**TOČNE** (Monte Carlo)  
**PRIBLIŽNE**:

- FORM** – First Order Reliability Method  $\rightarrow$  površina otkazivanja je tangentna ravnina u proračunskoj točki, linearna aproksimacija
- SORM** – Second order Reliability Method  $\rightarrow$  ploha otkazivanja je aproksimirana hiperboličnim paraboloidom



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### B. INDEKS POUZDANOSTI

...(i) pripadna vrijednost otkazivanja) su pokazatelji pouzdanosti, formalne i zamišljene vrijednosti, namijenjene kao alat pri razvoju dosljednih pravila projektiranja i ne daju opis učestalosti otkazivanja konstrukcije niti su apsolutna mjera nosivosti ili uporabljivosti.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### B. INDEKS POUZDANOSTI

Najčešće upotrebljavana mjera pouzdanosti konstrukcija

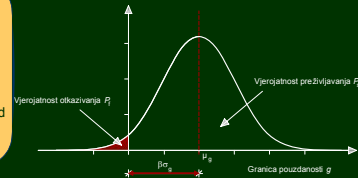
$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

inverzna funkcija raspodjele standardizirane normalne raspodjele vjerojatnosti otkazivanja  $P_f$

Uz pretpostavku normalnih raspodjela otpornosti  $R$  i učinka djelovanja  $E$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

predstavlja udaljenost srednje vrijednosti  $\mu_E$  granice pouzdanosti  $g$  od početka (nule), uzimajući standardnu varijaciju  $\sigma_g$  od  $g$  kao jediničnu mjeru



TK2

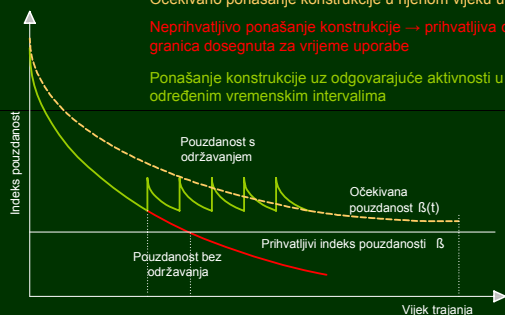
OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### C. RAZVOJ VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA U VREMENU

Očekivano ponašanje konstrukcije u njenom vijeku uporabe  
Neprihvatljivo ponašanje konstrukcije → prihvatljiva donja granica dosegnuta za vrijeme uporabe

Ponašanje konstrukcije uz odgovarajuće aktivnosti u određenim vremenskim intervalima



TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### D. REFERENTNI (POVRATNI, POREDBENI) PERIOD

♦ Povratni period može, ali se ne mora podudarati s proračunskim vijekom konstrukcije.

♦ Vjetar se npr. računa za 50-godišnji povratni period, odnosno godišnji rizik premašaja 0,02 u svakoj godini uporabe konstrukcije.

♦ Potres se računa za povratni period 475 godina ili vjerojatnost premašaja u 50 godina od 10 % (0,1).

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST

Koju razinu zahtijevati kako bi konstrukcija u okviru raspoloživih informacija mogla biti proglašena dovoljno pouzdanom ???

♦ analiziranje troškova i koristi

♦ ekonomska analiza profita uzimajući u obzir posljedice otkazivanja

♦ usporedbe rizika u svakodnevnim aktivnostima i rizika oštećenja ili smrti uslijed otkazivanja konstrukcije

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST

EN 1990

Posljedice otkazivanja utječu na prihvatljive vjerojatnosti!

Razlikovati tražene pouzdanosti za različita granična stanja!  $\beta_{target}$  za GSU može biti manje stroga nego tražena za GSN.

| Razred posljedica otkazivanja | Razred pouzdanosti | Granično stanje nosivosti  |         | Zamor                      |         | Uporabljivost              |         |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                               |                    | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         |
|                               |                    | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. |
| CC3                           | RC3                | 5,2                        | 4,3     |                            |         |                            |         |
| CC2                           | RC2                | 4,7                        | 3,8     |                            | 1,5-3,8 | 2,9                        | 1,5     |
| CC1                           | RC1                | 4,2                        | 3,3     |                            |         |                            |         |

Referentni period uključiti u proračun! Godišnje vjerojatnosti otkazivanja su naravno manje od vjerojatnosti otkazivanja u uporabnom vijeku konstrukcije.

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST EN 1990

Posljedice utječu na vjeroja

| Razred posljedica otkazivanja | Razred pouzdanosti | Granično stanje nosivosti  |         | Zamor                      |         | Uporabljivost              |         |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                               |                    | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         |
|                               |                    | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. |
| CC3                           | RC3                | 5,2                        | 4,3     |                            |         |                            |         |
| CC2                           | RC2                | 4,7                        | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                           | RC1                | 4,2                        | 3,3     | 1,5-3,8                    | 2,9     | 1,5                        |         |



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST EN 1990

Srednje posljedice za gubitak ljudskih života ili znatne ekonomske, socijalne i ambijentalne posljedice (poslovne zgrade i zgrade za stanovanje)

| Razred posljedica otkazivanja | Razred pouzdanosti | Granično stanje nosivosti  |         | Zamor                      |         | Uporabljivost              |         |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                               |                    | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         |
|                               |                    | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. |
| CC3                           | RC3                | 5,2                        | 4,3     |                            |         |                            |         |
| CC2                           | RC2                | 4,7                        | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                           | RC1                | 4,2                        | 3,3     | 1,5-3,8                    | 2,9     | 1,5                        |         |



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST EN 1990

male posljedice za gubitak ljudskih života ili male odnosno zanemarive ekonomske, socijalne i ambijentalne posljedice (poljoprivredne zgrade, skladišta)

| Razred posljedica otkazivanja | Razred pouzdanosti | Granično stanje nosivosti  |         | Zamor                      |         | Uporabljivost              |         |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
|                               |                    | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         | $\beta$ za povratni period |         |
|                               |                    | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. | 1 god.                     | 50 god. |
| CC3                           | RC3                | 5,2                        | 4,3     |                            |         |                            |         |
| CC2                           | RC2                | 4,7                        | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                           | RC1                | 4,2                        | 3,3     | 1,5-3,8                    | 2,9     | 1,5                        |         |



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST EN 1990

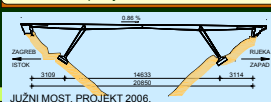
##### PROJEKTIRANJE NOVIH KONSTRUKCIJA

Koeficijenti sigurnosti u važećim normama temelje se na kriteriju sigurnosti konstrukcija

Isti koeficijenti za sve dijelove konstrukcije bez obzira na različite posljedice otkazivanja različitih elemenata

Razlike u troškovima, za situacije otkazivanja u kojima razine pouzdanosti mogu biti smanjene, su male

primjena jedinstvene razine pouzdanosti ipak je ekonomična



##### ODRŽAVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

Veliki broj više ne zadovoljava nove norme, a fondovi za njihovo pojačanje su ograničeni

jaki ekonomski poticaj za potpuno određivanje i kapaciteta i vijeka konstrukcija

Čak i mala razlika u kriteriju pouzdanosti

može rezultirati velikim troškovima za popravke na konstrukciji



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### E. CILJANA POUZDANOST JCSS

| Relativni troškovi za postizanje pouzdanosti                                         | Granično stanje nosivosti                  |                                            |                                            | Granično stanje uporabljivosti             |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                                      | Manje posljedice otkazivanja               | Umjerene posljedice otkazivanja            | Velike posljedice otkazivanja              |                                            |
| 1god. povratni period, Joint Committee of Structural Safety Probabilistic Model Code |                                            |                                            |                                            |                                            |
| Visoki                                                                               | $\beta = 3,1$<br>$P_F = 1,0 \cdot 10^{-3}$ | $\beta = 3,3$<br>$P_F = 4,8 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 3,7$<br>$P_F = 1,1 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 1,3$<br>$P_F = 1,0 \cdot 10^{-1}$ |
| Uobičajeni                                                                           | $\beta = 3,7$<br>$P_F = 1,1 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 4,2$<br>$P_F = 1,3 \cdot 10^{-5}$ | $\beta = 4,4$<br>$P_F = 5,4 \cdot 10^{-6}$ | $\beta = 1,7$<br>$P_F = 5,0 \cdot 10^{-2}$ |
| Niski                                                                                | $\beta = 4,2$<br>$P_F = 1,3 \cdot 10^{-5}$ | $\beta = 4,4$<br>$P_F = 5,4 \cdot 10^{-6}$ | $\beta = 4,7$<br>$P_F = 1,3 \cdot 10^{-6}$ | $\beta = 2,3$<br>$P_F = 1,0 \cdot 10^{-2}$ |
| EN 1990                                                                              | $\beta = 4,7$                              |                                            |                                            | $\beta = 3,0$                              |
| 50 godišnji povratni period                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |
| Visoki                                                                               | $\beta = 1,7$<br>$P_F = 4,7 \cdot 10^{-2}$ | $\beta = 2,0$<br>$P_F = 2,4 \cdot 10^{-2}$ | $\beta = 2,6$<br>$P_F = 5,4 \cdot 10^{-3}$ | $\beta = -2,5$<br>$P_F = 0,99$             |
| Uobičajeni                                                                           | $\beta = 2,6$<br>$P_F = 5,4 \cdot 10^{-3}$ | $\beta = 3,2$<br>$P_F = 6,7 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 3,5$<br>$P_F = 2,7 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = -1,3$<br>$P_F = 0,90$             |
| Niski                                                                                | $\beta = 3,2$<br>$P_F = 6,7 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 3,5$<br>$P_F = 2,7 \cdot 10^{-4}$ | $\beta = 3,8$<br>$P_F = 6,5 \cdot 10^{-5}$ | $\beta = 0,2$<br>$P_F = 0,42$              |
| EN 1990                                                                              | $\beta = 3,8$                              |                                            |                                            | $\beta = 1,5$                              |

### VI. POSTUPCI OCJENJIVANJA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

Moguće je provoditi postupcima različite sofisticiranosti i uz ulaganje različitih napora

3 razreda postupaka i razine ocjenjivanja od 0 do 5

Preporučuje se ocjenjivanje započeti s jednostavnim konzervativnim postupcima niže razine i ako se takva ocjena pokaže nezadovoljavajućom krenuti na detaljniju višu razinu ocjenjivanja.

TK2

OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

| RAZREDI OCJENJIVANJA                    |               | POSTUPAK OCJENJIVANJA                                                                         |                                                                           |
|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cilj ocjenjivanja                       | Razina ocjene | Ocjenjivanje po iskustvu inženjera                                                            |                                                                           |
| <b>NEFORMALNE OCJENE</b>                |               | Vizualni pregled učinaka dotrajanja (pukotine, ljuštenje, odlamanje, korozija)                |                                                                           |
| Kvalitativne ocjene stanja              | Razina 0      | Prethodno ocjenjivanje konstrukcije                                                           |                                                                           |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MJERENJIMA</b>   |               | Određivanje učinaka djelovanja                                                                |                                                                           |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MJERENJIMA</b>   |               | Dokazni postupak                                                                              |                                                                           |
| Kvantitativno ocjenjivanje uporabivosti | Razina 1      | Mjerenje vrijednosti određenih parametara pod uporabnim opterećenjem (stvarno ili pokusno)    | Usporedba izmjerenih i graničnih vrijednosti                              |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MODELIMA</b>     |               | Prikupljanje podataka                                                                         | Model proračuna                                                           |
| Kvantitativno ocjenjivanje uporabivosti | Razina 2      | Iz projekata i propisa<br>Pregledi                                                            | Osnovni modeli<br>Detaljni modeli                                         |
|                                         | Razina 3      | Pregledi konstrukcije (izmjerne) i ispitivanja materijala                                     | Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni)<br>Prilagođeni modeli         |
|                                         | Razina 4      | Praćenja (monitoring) za prepoznavanje sustava<br>Praćenje opterećenja<br>Dokazna opterećenja | Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni)<br>Prilagođeni modeli         |
|                                         | Razina 5      | Kao za razine 3 i 4 +<br>Statistička svojstva podataka                                        | Jednostavni i prilagođeni modeli<br>Stohastički modeli konačnih elemenata |

| RAZREDI OCJENJIVANJA                    |               | POSTUPAK OCJENJIVANJA                                                                         |                                                                           |
|-----------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Cilj ocjenjivanja                       | Razina ocjene | Ocjenjivanje po iskustvu inženjera                                                            |                                                                           |
| <b>NEFORMALNE OCJENE</b>                |               | Vizualni pregled učinaka dotrajanja (pukotine, ljuštenje, odlamanje, korozija)                |                                                                           |
| Kvalitativne ocjene stanja              | Razina 0      | Prethodno ocjenjivanje konstrukcije                                                           |                                                                           |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MJERENJIMA</b>   |               | Određivanje učinaka djelovanja                                                                |                                                                           |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MJERENJIMA</b>   |               | Dokazni postupak                                                                              |                                                                           |
| Kvantitativno ocjenjivanje uporabivosti | Razina 1      | Mjerenje vrijednosti određenih parametara pod uporabnim opterećenjem (stvarno ili pokusno)    | Usporedba izmjerenih i graničnih vrijednosti                              |
| <b>OCJENE TEMELJENE NA MODELIMA</b>     |               | Prikupljanje podataka                                                                         | Model proračuna                                                           |
| Kvantitativno ocjenjivanje uporabivosti | Razina 2      | Iz projekata i propisa<br>Pregledi                                                            | Osnovni modeli<br>Detaljni modeli                                         |
|                                         | Razina 3      | Pregledi konstrukcije (izmjerne) i ispitivanja materijala                                     | Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni)<br>Prilagođeni modeli         |
|                                         | Razina 4      | Praćenja (monitoring) za prepoznavanje sustava<br>Praćenje opterećenja<br>Dokazna opterećenja | Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni)<br>Prilagođeni modeli         |
|                                         | Razina 5      | Kao za razine 3 i 4 +<br>Statistička svojstva podataka                                        | Jednostavni i prilagođeni modeli<br>Stohastički modeli konačnih elemenata |

**Razina 1. OCJENA ISPUNJAVANJA UVJETA UPORABLJIVOSTI**

- ❑ Pri ispitivanju uporabivosti nakon izgradnje konstrukcije mjerenjem statičkih i dinamičkih parametara
  - progibi rasponskog sklopa,
  - ubrzanje i prirodne frekvencije pješačkih mostova
- ❑ Pri ispitivanju uporabivosti ili sigurnosti prometa prije promjena uvjeta uporabe mjerenjem stat. i dinam. param.
  - npr. progibi stropova u zgradama,
  - progibi, nagibi, ubrzanja i prirodne frekvencije željezničkih mostova za povećane brzine vlakova
- ❑ Pri nadziranju dinamičkih opterećenja mjerenjem dinamičkih parametara kao što je povećanje amplituda osciliranja uslijed lošeg stanja kolnika na cestovnim mostovima (dinamički koeficijent)
- ❑ Pri nadziranju ponašanja gotovo neprikladnih konstrukcija mjerenjem statičkih i dinamičkih parametara
  - progibi,
  - rast pukotina

TK2

**Razina 2. OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA PREGLEDU DOKUMENTACIJE**

- ❑ Pri dokazivanju nosivosti i uporabivosti nakon stvaranja oštećenja uzrokovanih izvanrednim djelovanjima:
  - izvanredno prometno opterećenje,
  - udari,
  - potres,
  - oluja ...
- ❑ Pri dokazivanju nosivosti i uporabivosti nakon stvaranja oštećenja uslijed dotrajanja
  - posljedice zamora,
  - korozija ili
  - neki drugi proces dotrajanja
- ❑ Pri utvrđivanju nosivosti i uporabivosti zbog promjena uvjeta uporabe konstrukcije,
  - prenamjena prostorije u skladište ili
  - očekivani prijelaz izvanrednih vozila preko mosta na koja konstrukcije nisu izvorno proračunate

TK2

**Razina 3. OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA**

TK2

**Razina 3. OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA**

TK2

**Razina 3. OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA**

• **Kod mostova, uslijed**

- ▶ različitih prometnih uvjeta na različitim vrstama cesta, lokalne, državne, autoceste
- ▶ različitih dinamičkih učinaka (neravnosti kolnika)
- ▶ različite poprečne raspodjele,

normirana prometna opterećenja zamjenjuju se onima prilagođenim danoj lokaciji mosta sa smanjenim učincima.

**DRŽAVNA CESTA**

| Razpon (m)                   | 1 x 10   | 10 x 1 x 20 | 20 x 1 x 40 | 40 x 1 x 60 |      |
|------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|------|
| Statično opterećenje grada   | $R_{st}$ | 0.80        | 0.80        | 0.80        | 0.80 |
| $R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0$ | $R_{st}$ | 0.30        | 0.30        | 0.51        | 0.58 |
| Kontingirano grada           | $R_{st}$ | 0.80        | 0.80        | 0.80        | 0.80 |
| $R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0$ | $R_{st}$ | 0.48        | 0.70        | 0.79        | 0.85 |

**AUTOCESTA**

| Razpon (m)                                 | 1 x 10   | 10 x 1 x 20 | 20 x 1 x 40 | 40 x 1 x 60 |      |
|--------------------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|------|
| Statično opterećenje grada                 | $R_{st}$ | 0.80        | 0.80        | 0.80        | 0.80 |
| $R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0$ | $R_{st}$ | 0.38        | 0.53        | 0.65        | 0.72 |
| Kontingirano grada                         | $R_{st}$ | 0.80        | 0.80        | 0.80        | 0.80 |
| $R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0, R_{st} = 1.0$ | $R_{st}$ | 0.51        | 0.72        | 0.77        | 0.85 |

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

**Razina 4. OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE**

• Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

**SPECIFIČNA SVOJSTVA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE**

• **POVIJEST OPTEREĆENJA** – npr. ako je most bio u uporabi dovoljno dugo razumno je pretpostaviti da je mogao biti izložen nekom izvanrednom djelovanju

Spektar frekvencija  
**PRIJE I POSLIJE**  
udara broda u glavni stup mosta

Reichsbrücke, Beč, 75+140+75 m

**Razina 4. OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE**

• Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

**SPECIFIČNA SVOJSTVA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE**

• **POVIJEST OPTEREĆENJA** – npr. ako je most bio u uporabi dovoljno dugo razumno je pretpostaviti da je mogao biti izložen nekom izvanrednom djelovanju

Metro  
 $a_0=294.30e^3$   
 $a_1=245.25e^3$

Automobil  
 $a_0=14.72e^3$   
 $a_1=2.45e^3$

Kamion  
 $a_0=39.24e^3$   
 $a_1=5.89e^3$

Metro  
 $a_0=294.30e^3$   
 $a_1=245.25e^3$

Trkači  
 $a_0=53.96e^3$   
 $a_1=14.72e^3$

**Razina 4. OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE**

• Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

**SPECIFIČNA SVOJSTVA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE**

• **POSLEDICE OTKAZIVANJA** – s obzirom na koje se konstrukcije dijele i to na temelju odnosa ukupnih troškova (koji uključuju troškove izgradnje i troškove uslijed otkazivanja) i troškova izgradnje konstrukcije

Rušenje brane uslijed odrona zemlje

| Razina pouzdanosti  | Rizik (gubitak života, ekonomske i društvene posljedice) | Primjer građevine                                                  |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Veoma visoka        | vrlo velik                                               | nuklearna elektrana, važna brana, strateške obrambene konstrukcije |
| Visa od uobičajene  | velik                                                    | važni mostovi, stadioni, javne zgrade (općeva)                     |
| Normalna            | srednji                                                  | poslovne i stambene zgrade                                         |
| Manja od uobičajene | nizak                                                    | gospodarske zgrade, staklenici i sl.                               |

**Razina 4. OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE**

• Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

**SPECIFIČNA SVOJSTVA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE**

• **ZALIHE ILI REZERVE KONSTRUKCIJE** – prema kojima se konstrukcije dijele u skladu s vrstom sloma, ako se slom događa, na duktilne konstrukcije s visokim rezervama nosivosti i konstrukcije s krhkim slomom

**Krti lom**

**Duktilno ponašanje**

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

**Razina 4. OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE**

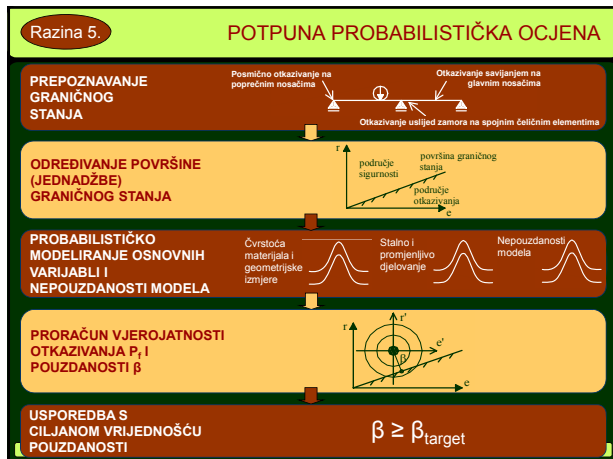
• Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

**SPECIFIČNA SVOJSTVA POUZDANOSTI KONSTRUKCIJE**

• **UPOZORENJE PRED SLOM** – vrijednost ciljane pouzdanosti može se smanjiti ako je periodičnim ispitivanjem ili sustavom monitoringa omogućeno uočiti upozorenje sloma.

Raspored senzora za monitoring nosivosti Masleničkog mosta

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA



## DODATNA POJAŠNJENJA NEKIH POJMOVA

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### METODE PRORAČUNA VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA

- TOČNE METODE** su temeljene na tehnikama simulacije koje su vremenski zahtjevniji proračuni.
- Metoda **MONTE CARLO** je direktna i lako razumljiva metoda, ali zahtijeva odgovarajuće računalne programe.
- S ovom metodom simulacije, funkcija gustoće vjerojatnosti i odgovarajući statistički parametri granice pouzdanosti se približno procjenjuju.
- Slučajno uzimanje uzoraka rabi se kako bi se dobio rezultanti slučajni vektor.
- Zatim se za taj skup vrijednosti odredi granica pouzdanosti kako bi se utvrdilo je li došlo do otkazivanja.
- Ovaj se postupak ponavlja veliki broj puta i vjerojatnost otkazivanja se procjenjuje na temelju razlomka dijela pokušaja koji vode do otkazivanja  $N_{g(x)<0}$  i ukupnog broja pokušaja  $N$ .

$$P_i = \frac{N_{g(x)<0}}{N}$$

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### METODE PRORAČUNA VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA

- Na ovaj način vjerojatnost otkazivanja procjenjuje se direktno, bez potrebe za algoritmima. Ova metoda se zove Direktna metoda ili Gruba metoda Monte Carlo i najčešće neće biti od velike pomoći u praktičnim problemima zbog potrebe za velikim brojem uzoraka kako bi se vjerojatnost otkazivanja procijenila s prikladnom sigurnošću.
- Osim toga broj uzoraka i odgovarajući broj pokušaja povećava se kako se vjerojatnost otkazivanja smanjuje. Jednostavno pravilo može se dati u obliku:
 
$$N > C / P_i$$
  - $N$  potreban broj uzoraka,
  - $C$  konstanta povezana s razinom povjerenja (engl. confidence level) i tipom funkcije koja se određuje. Uobičajena vrijednost za  $C$  može biti 100 i veća.
- Cilj naprednih metoda simulacije jest smanjiti broj uzoraka potrebnih za procjenu vjerojatnosti otkazivanja.

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### METODE PRORAČUNA VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA

- PRIBLIŽNE METODE** rabe približne postupke za određivanje vjerojatnosti otkazivanja koji su brzi i pouzdani.
- Prvi je korak transformirati problem u prostor sastavljen od standardnih normalnih raspodjela. To znači da se sve početne varijable  $X$ , koje su slučajne i mogu biti statistički ovisne, transformiraju u grupu neovisnih normalnih slučajnih varijabli  $U$  s nultom srednjom vrijednošću i jediničnom standardnom varijacijom (standardna normalna varijabla).
- Kada su početne slučajne varijable neovisne ova transformacija može se shvatiti kao jedan u jedan.  $U$  standardiziranom prostoru, najbliža točka  $U^*$  od ishodišta novog graničnog stanja  $g_u(U) = 0$  zove se proračunska točka i njena udaljenost od ishodišta je indeks pouzdanosti  $\beta$ .
- Aproksimacija površine otkazivanja u proračunskoj točki može biti linearna (**FORM** aproksimacija) ili neka druga približna funkcija drugog reda (**SORM** aproksimacija).

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

### METODE PRORAČUNA VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA

- U **FORM** pristupu površina otkazivanja  $g_u(U) = 0$  je približna tangentna ravnina u proračunskoj točki. Vjerojatnost otkazivanja se približno izražava sa:
 
$$P_i = \Phi(-\beta)$$
- gdje je  $\Phi$  funkcija raspodjele standardizirane normalne varijable.
- U **SORM** pristupu ploha otkazivanja je aproksimirana s hiperboličnim paraboloidom koji prolazi kroz proračunsku točku. U tom slučaju je vjerojatnost otkazivanja dana izrazom koji uzima u obzir različite pojedinačne krivulje  $\kappa_i$  u proračunskoj točki:
 
$$\beta = \Phi(-\beta) \left[ \prod_{i=1}^n (1 - \kappa_i \beta)^{-1/2} \right]$$

TK2 OCJENJIVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA