

# **TRAJNOST KONSTRUKCIJA II**

---

## **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).

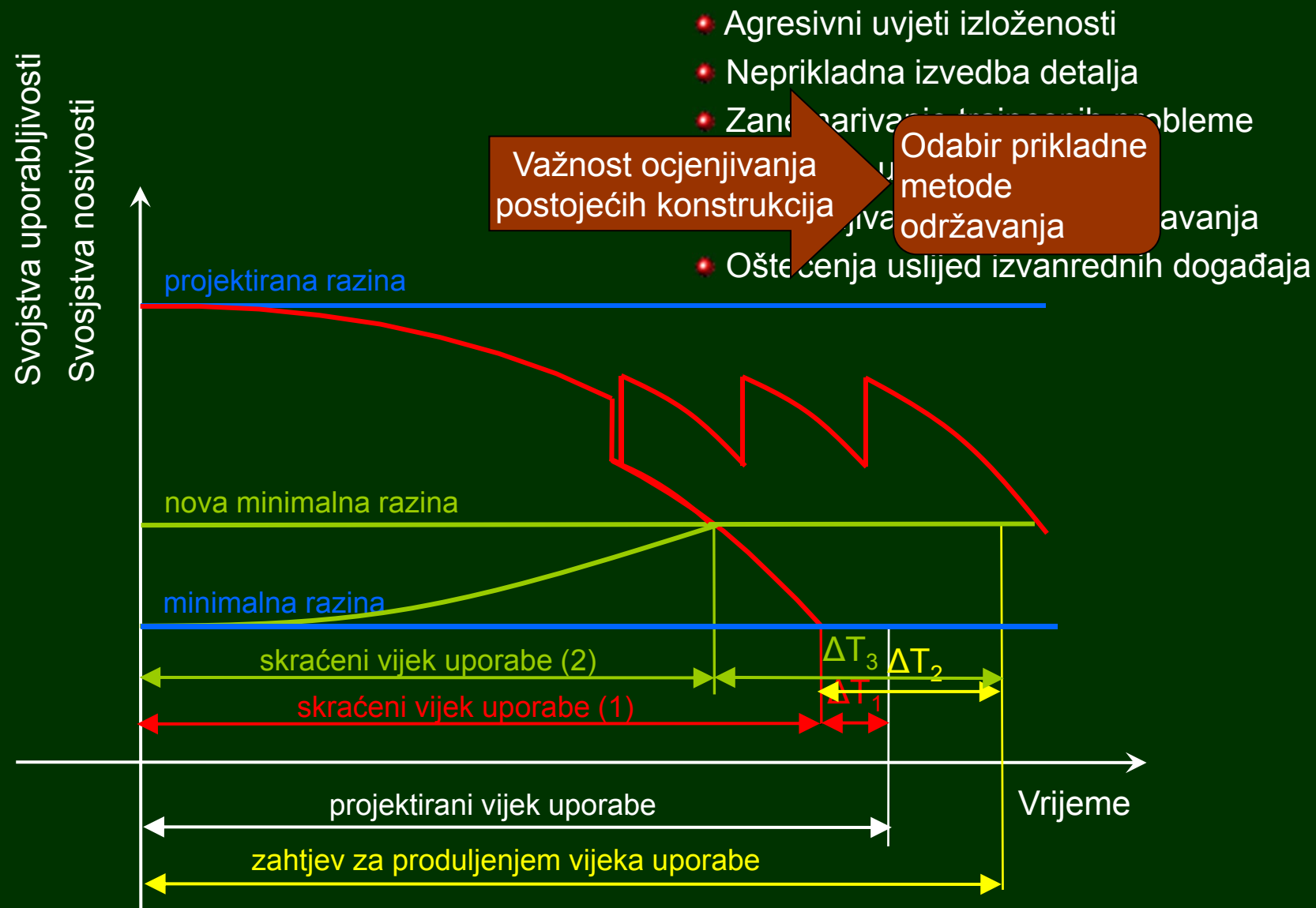
**TRAJNOST KONSTRUKCIJE** je njena sposobnost posjedovanja zahtijevane razine sigurnosti i uporabljivosti u određenom vremenskom razdoblju pod utjecajem pretpostavljenih uzročnika.

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

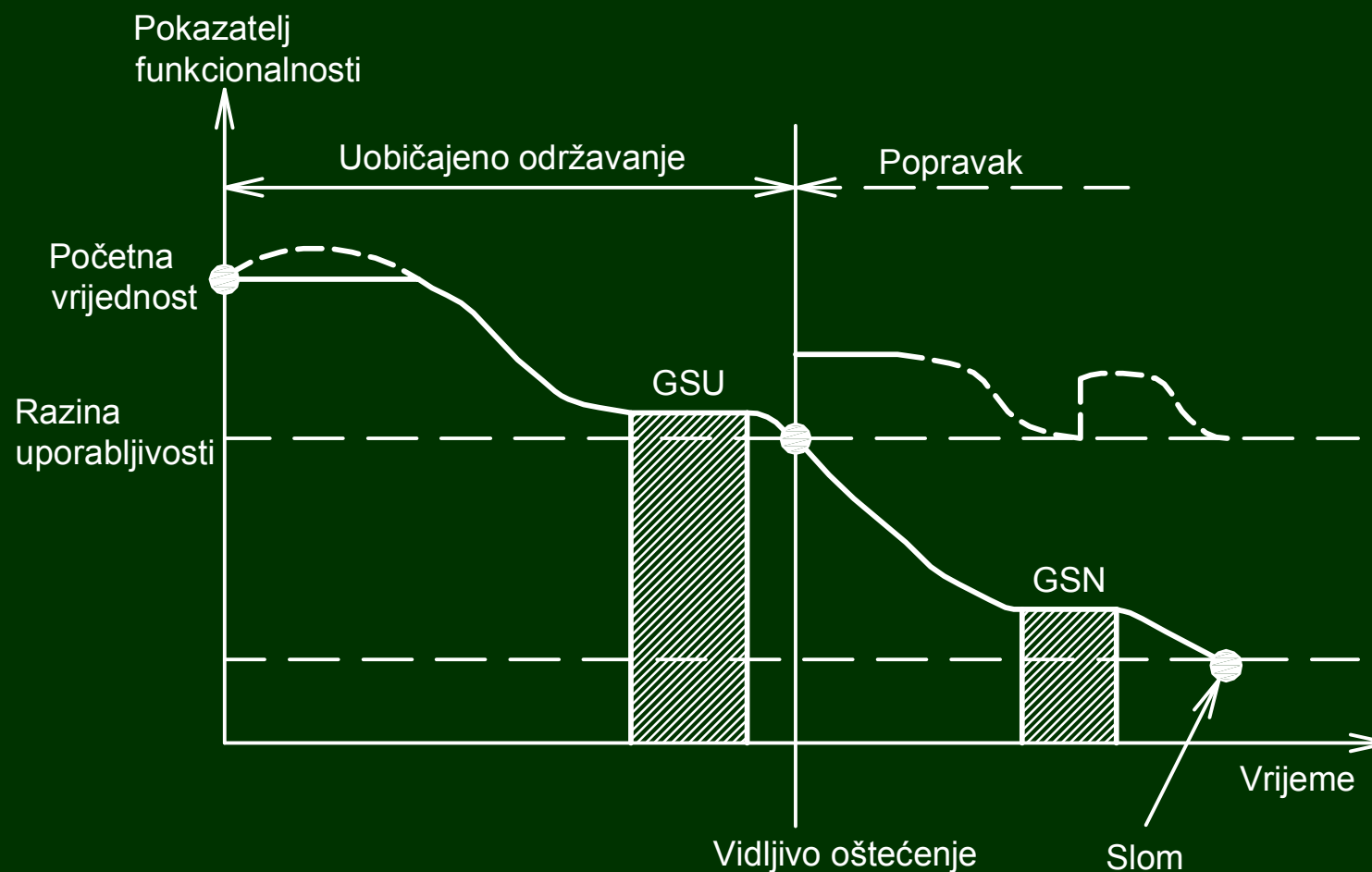
**UPORABLJIVOST KONSTRUKCIJE** je njena sposobnost udovoljavanja zahtjevima namjene odnosno sposobnost konstrukcije ili konstrukcijskih elemenata da tijekom vremena zadrže odgovarajuća svojstva ponašanja.

**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  $P_f$ .

# I. UVODNO

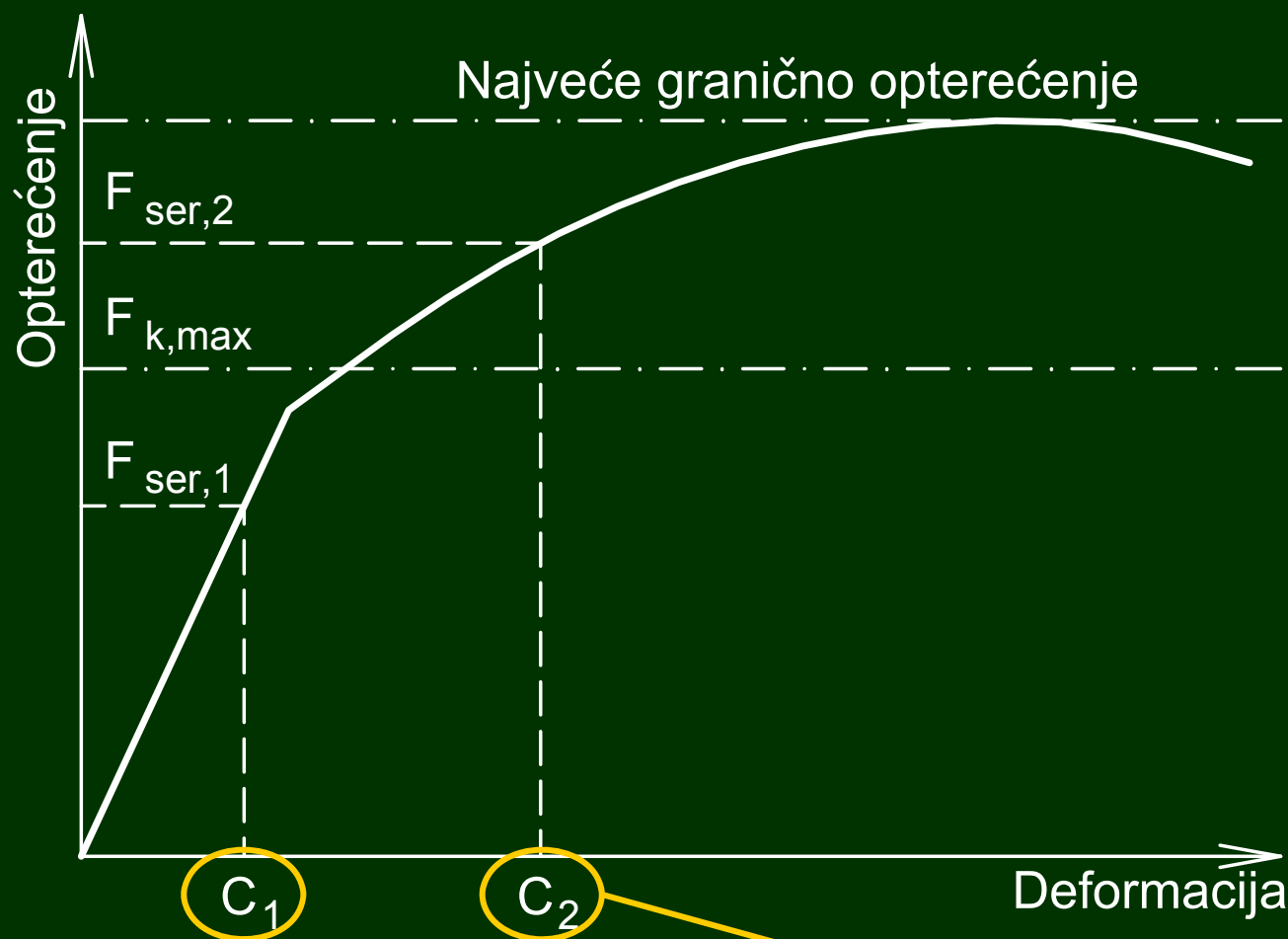


## II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA



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

## 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

$$F_{k,max} < F_{ser,2}$$

## II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA

OSNOVNI ZADATAK OCJENJIVANJA  
UTVRDITI DA KONSTRUKCIJA ILI NEKI  
NJEN DIO NEĆE OTKAZATI POD  
OPTEREĆENJEM. OCJENJIVANJA 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.

### 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

# 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

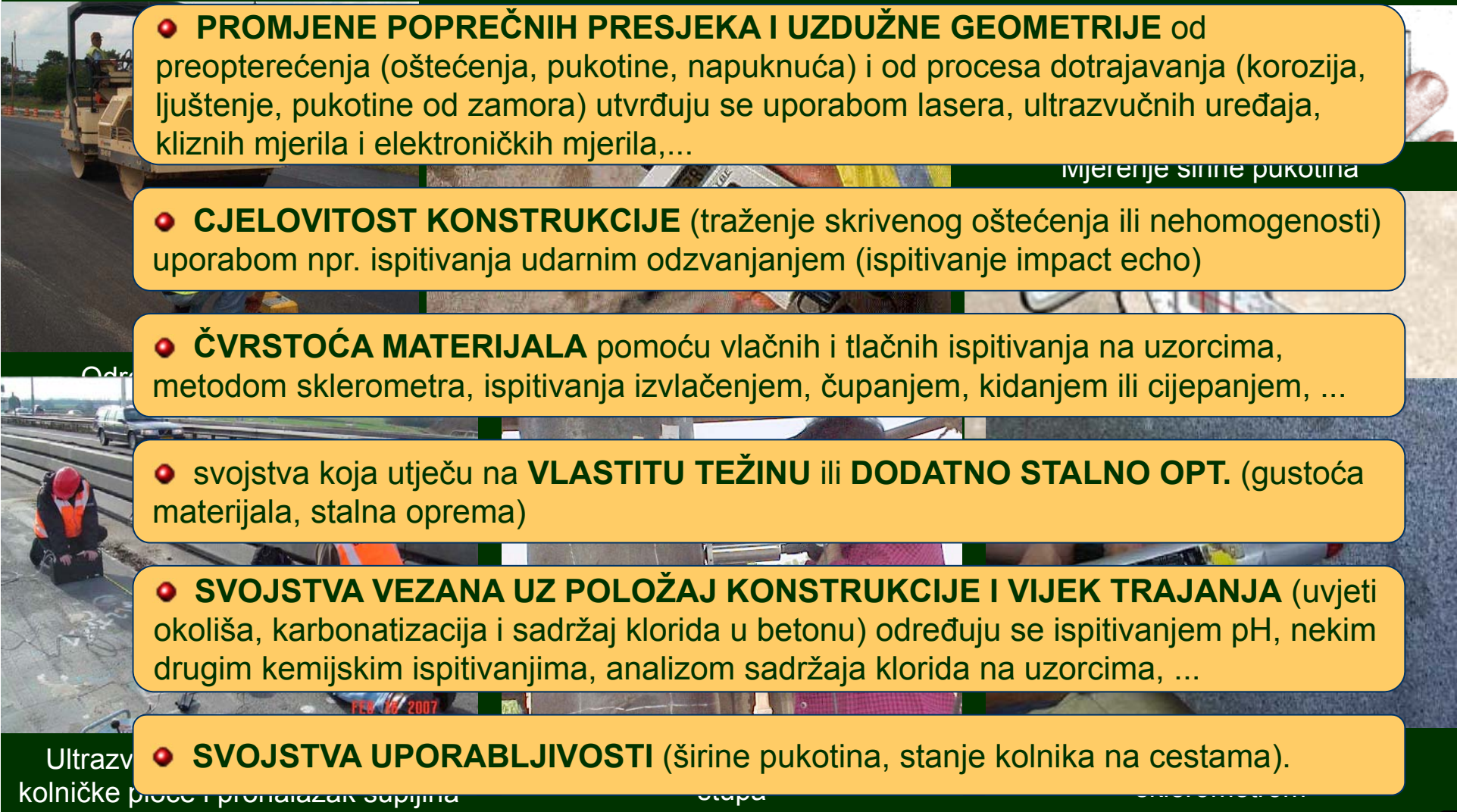
- **SVOJSTVA OTPORNOSTI** (materijala i konstrukcije) dobivaju se iz

- ▶ propisa,
- ▶ crteža,
- ▶ nekih dijelova projekta građevine (proračun, geotehnički elaborat),
- ▶ dokumentacije o izgradnji (isporuka materijala) i
- ▶ iz izvještaja o prethodnim pregledima i održavanju.



# 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 (korozijska ljuštenje, pukotine od zamora) utvrđuju se uporabom lasera, ultrazvučnih uređaja, kliznih mjerila i elektroničkih mjerila,...

mjerenje širine pukotina

❖ **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 ploče i pronalazak suprotnosti

stapa

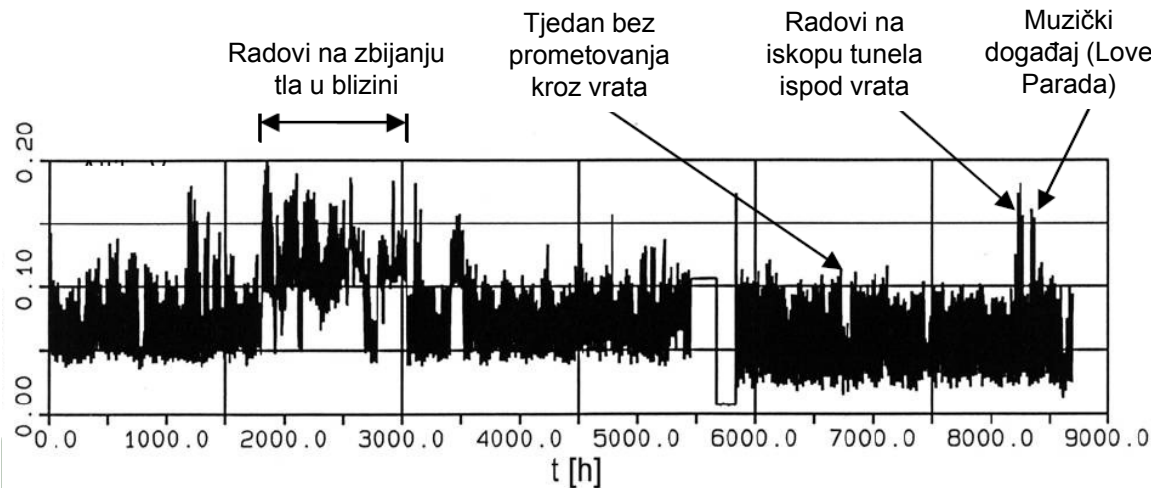
# III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

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.



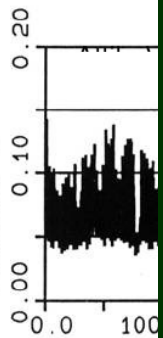
# III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

3.

## ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

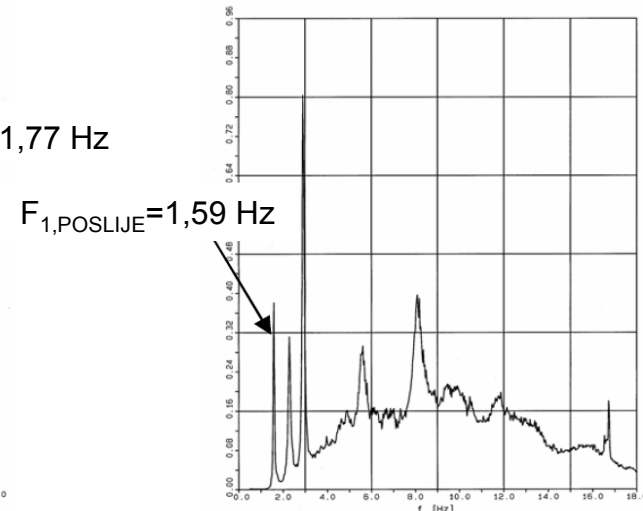
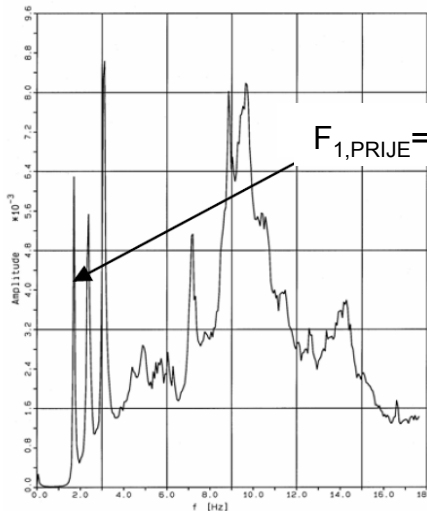
► Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati

● **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

Promjene u prvoj  
vlastitoj frekvenciji  
Brandenburških vrata  
prije i poslije  
promjena u uvjetima  
temeljenja



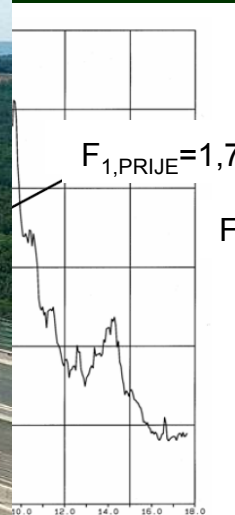
# III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

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.

#### PRAĆENJE 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. (suvremeni pristup:WIM)

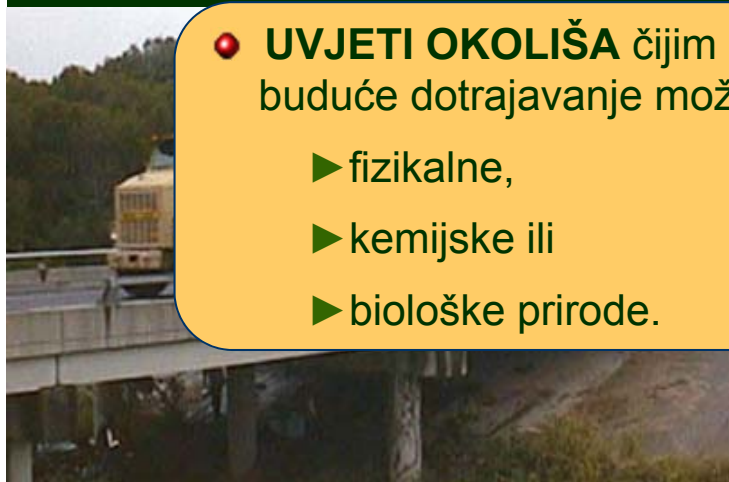
● Određuju se učinci djelovanja od **IZVANREDNIH DOGAĐAJA** kao što su:

- ▶ specijalna vozila,
- ▶ izvanredni vjetar i
- ▶ potres.

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

- ▶ fizikalne,
- ▶ kemijske ili
- ▶ biološke prirode.

|                   | PGDP | PGDP   | Težina | Ukupna |  | Model reprezentativnog vozila | Zastupljenost<br>jednog<br>modela(%) |
|-------------------|------|--------|--------|--------|--|-------------------------------|--------------------------------------|
|                   |      |        |        |        |  |                               | 36,310                               |
|                   |      |        |        |        |  |                               | 17,181                               |
| težina<br>≥ 7.0 t | 352  | 20,952 |        |        |  | 3                             |                                      |



# IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

## 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

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

## 2. SLOŽENE METODE PRORAČUNA

## 3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

# IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

## 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

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

## 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

# IV. METODE PRORAČUNA POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

## 1. JEDNOSTAVNE METODE PRORAČUNA

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

## 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 (prrianjanje, utjecaj ugrađene armature) → skrivene rezerve konstrukcije i smanjenje konzervativizma

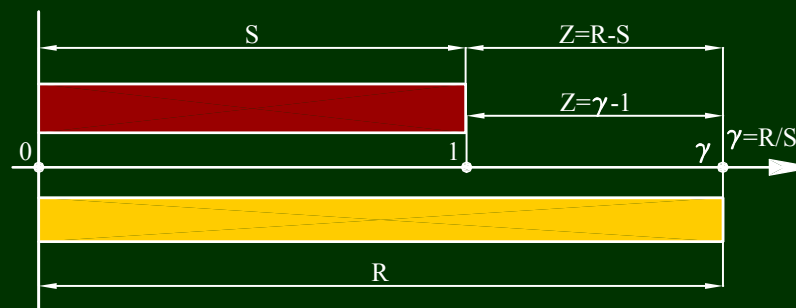
## 3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

- Nove 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

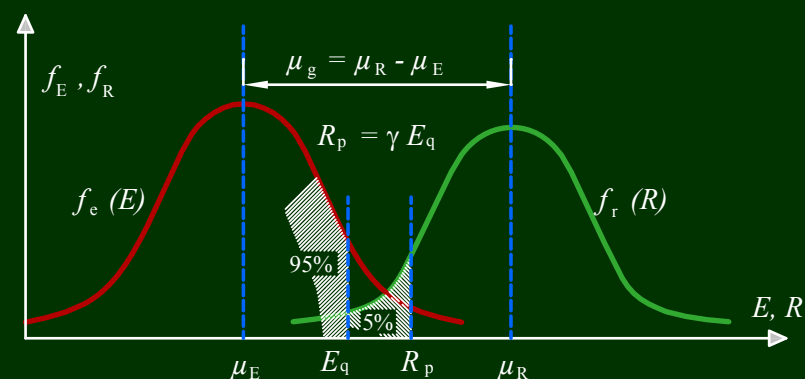
## 1. DETERMINISTIČKI

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



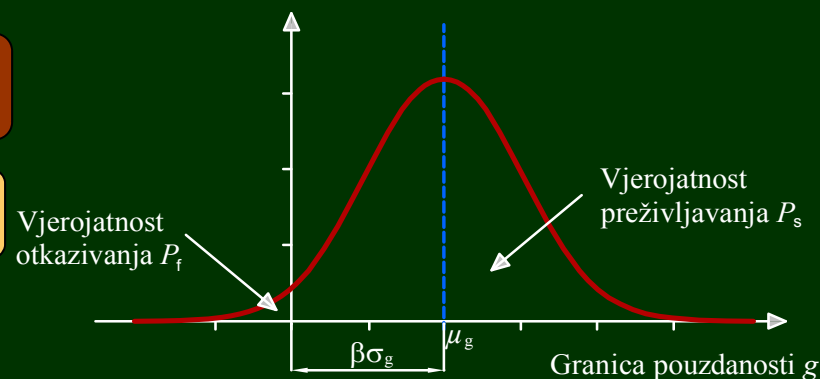
## 2. POLU-PROBABILISTIČKI

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



## 3. PROBABILISTIČKI

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



### 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:

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

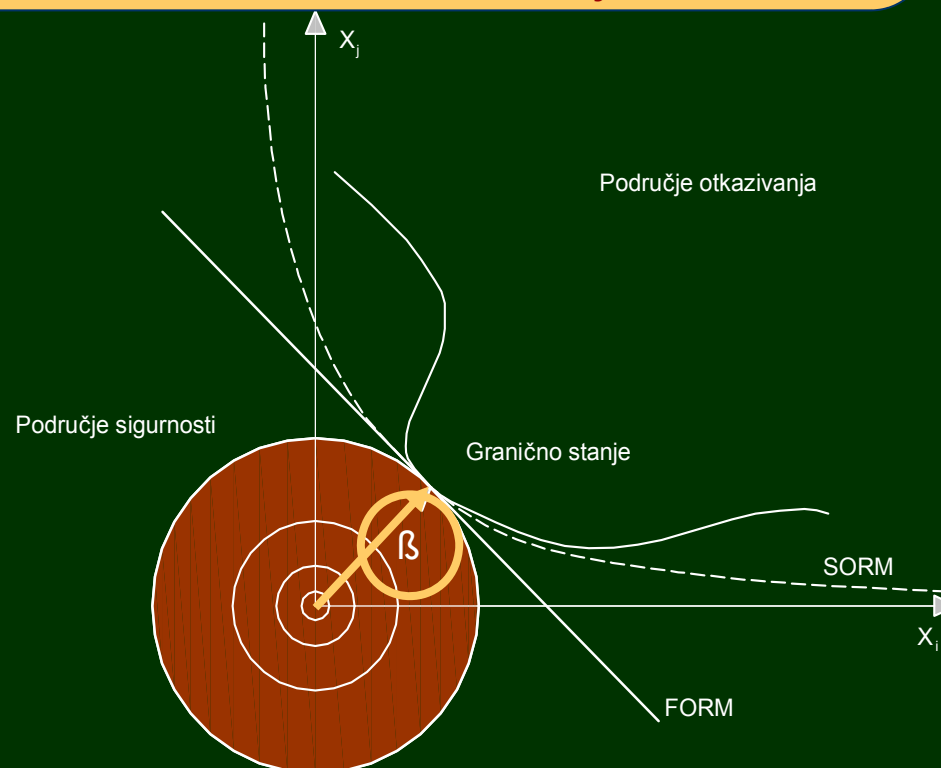
zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti vektora svih osnovnih varijabli  $\underline{X}$

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.

### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### B. INDEKS POUZDANOSTI

Najčešće upotrebljavana mjera pouzdanosti konstrukcija

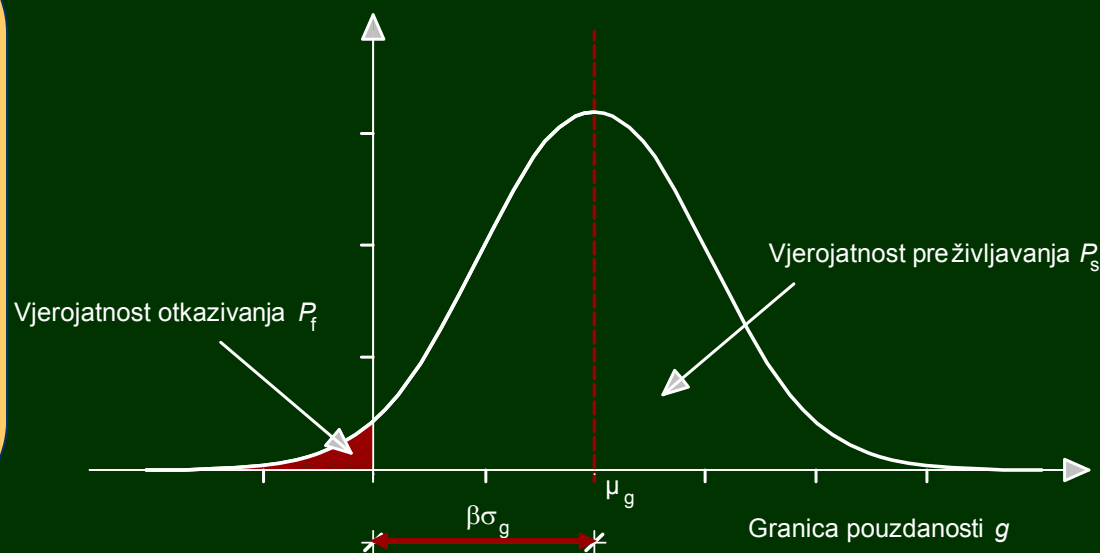
$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

inverzna funkcija raspodjele standardizirane normalne raspodjele vjerojatnosti otkazivanja  $P_f$

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

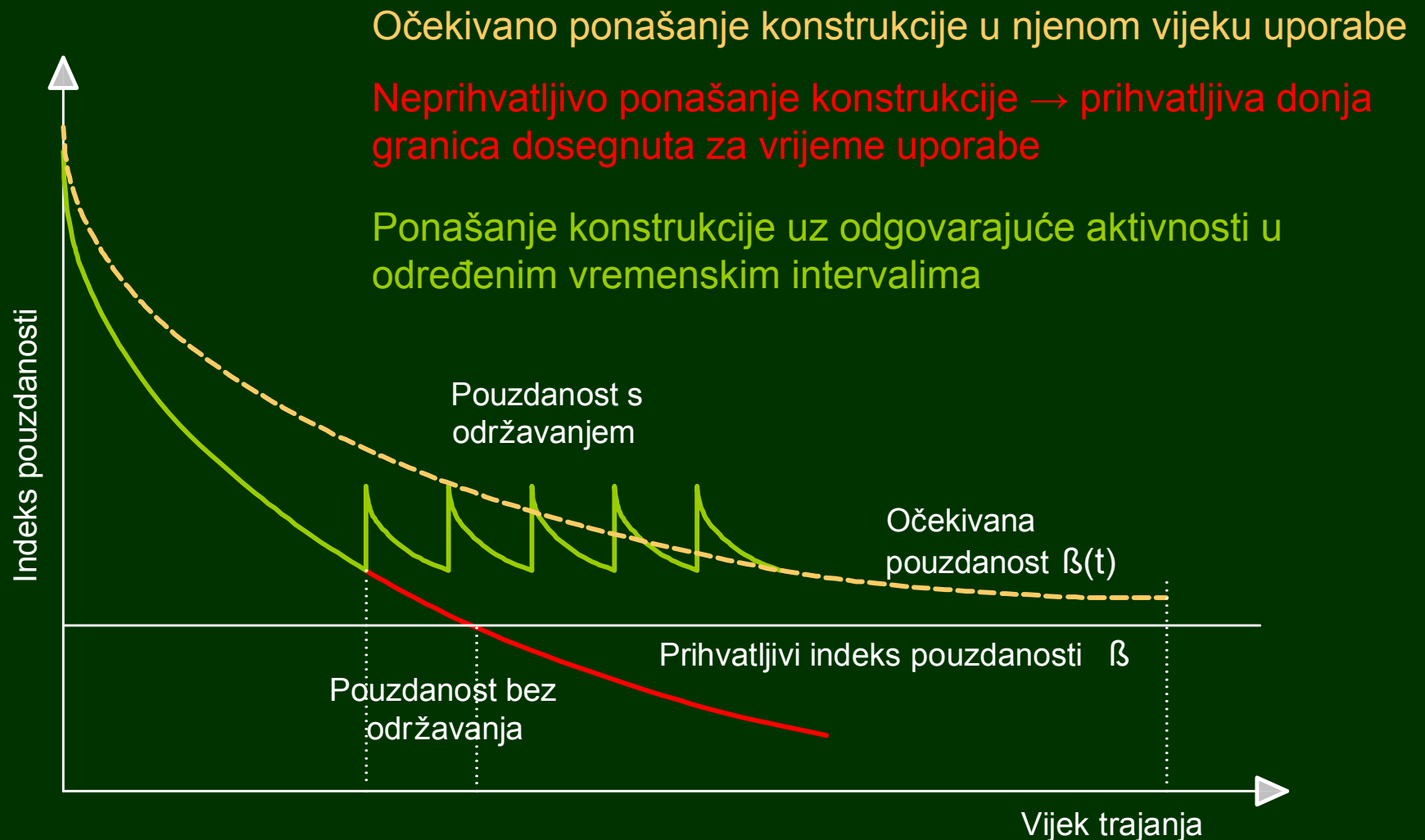
$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

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



### 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

#### C. RAZVOJ VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA U VREMENU



### 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).

### 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

# 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

## E. CILJANA POUZDANOST

EN 1990

Posljedice otkazivanja  
utječu na prihvatljive  
vjerojatnosti!

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

| Razred<br>posljedica<br>otkazivanja | Razred<br>pouzdanosti | Granično stanje<br>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     |                            | 1,5-3,8 | 2,9                        | 1,5     |
| CC2                                 | RC2                   | 4,7                          | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                                 | RC1                   | 4,2                          | 3,3     |                            |         |                            |         |

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

# 3. PROBABILISTIČKI PRISTUP POUZDANOSTI

## E. CILJANA POUZDANOST

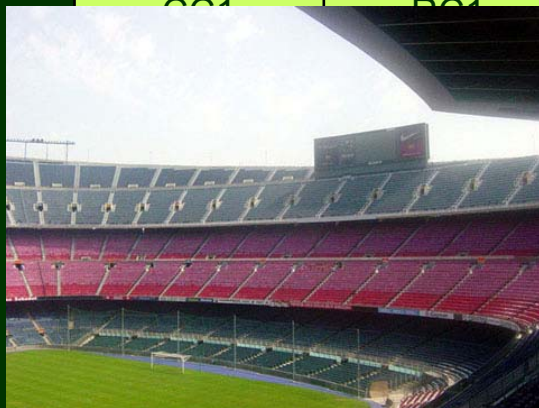
EN 1990

Posljedice  
utječu na p  
vjeroja

Velike posljedice za gubitak ljudskih života ili vrlo  
velike ekonomske, socijalne i ambijentalne posljedice  
(tribine, koncertne dvorane)

za različita granična stanja!  
troga nego tražena za GSN.

| Razred<br>posljedica<br>otkazivanja | Razred<br>pouzdanosti | Granično stanje<br>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     | 1,5-3,8                    | 2,9     | 2,9                        | 1,5     |
| CC2                                 | RC2                   | 4,7                          | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                                 | RC1                   | 4,2                          | 3,3     |                            |         |                            |         |



# 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     | 1,5-3,8                    | 1,5-3,8 | 2,9                        | 1,5     |
| <b>CC2</b>                    | RC2                | 4,7                        | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                           | RC1                | 4,2                        | 3,3     |                            |         |                            |         |



# 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<br>posljedica<br>otkazivanja | Razred<br>pouzdanosti | Granično stanje<br>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     |                            | 1,5-3,8 | 2,9                        | 1,5     |
| CC2                                 | RC2                   | 4,7                          | 3,8     |                            |         |                            |         |
| CC1                                 | RC1                   | 4,2                          | 3,3     |                            |         |                            |         |



# 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

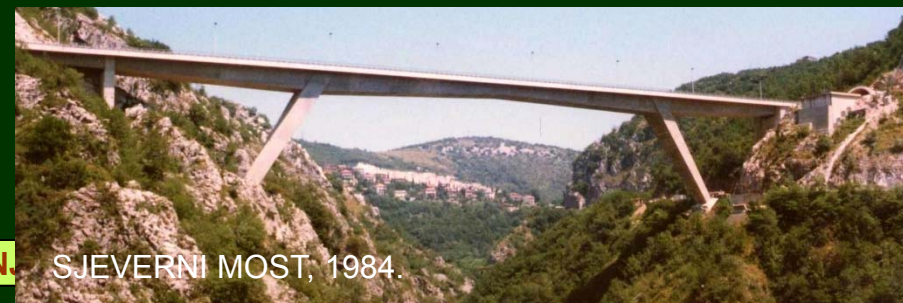
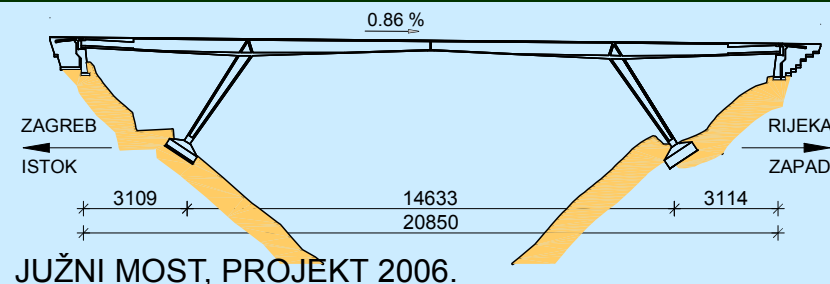
### ODRŽAVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

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

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

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

- Pri ispitivanju uporabljivosti nakon izgradnje konstrukcije mjerenjem statičkih i dinamičkih parametara

- ▶ progibi rasponskog sklopa,
- ▶ ubrzanje i prirodne frekvencije pješačkih mostova



Loše stanje kolnika promijenit će dinamičke parametre mosta

nakon izgradnje

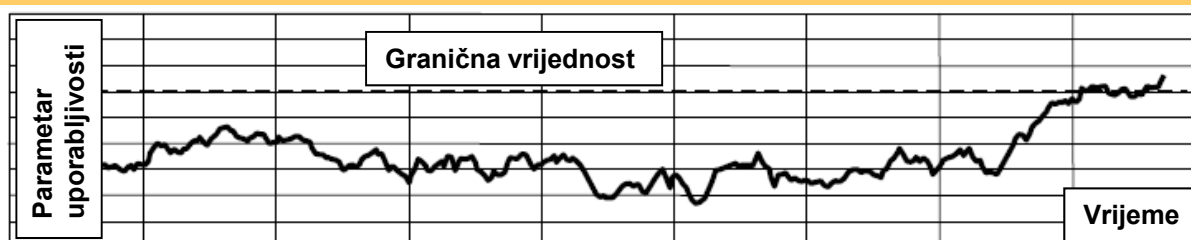
- Pri ispitivanju uporabljivosti ili sigurnosti prometa prije promjena uvjeta uporabe mjerenjem stat. i dinam. param.

- ▶ 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



- Pri dokazivanju nosivosti i uporabljivosti nakon stvaranja oštećenja uzrokovanih izvanrednim djelovanjima:

- ▶ izvanredno prometno opterećenje,
- ▶ udari,
- ▶ potres,
- ▶ oluja ...



Oštećenja od potresa

- Pri dokazivanju nosivosti i uporabljivosti nakon stvaranja oštećenja uslijed dotrajanja

- ▶ posljedice zamora,
- ▶ korozija ili
- ▶ neki drugi proces dotrajanja



Raspucavanje uslijed zamora

- Pri utvrđivanju nosivosti i uporabljivosti zbog promjena uvjeta uporabe konstrukcije,
- ▶ prenamjena prostorije u skladište ili
- ▶ očekivani prijelaz izvanrednih vozila preko mosta na koja konstrukcije nisu izvorno proračunane



Izvanredni tereti

## OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA

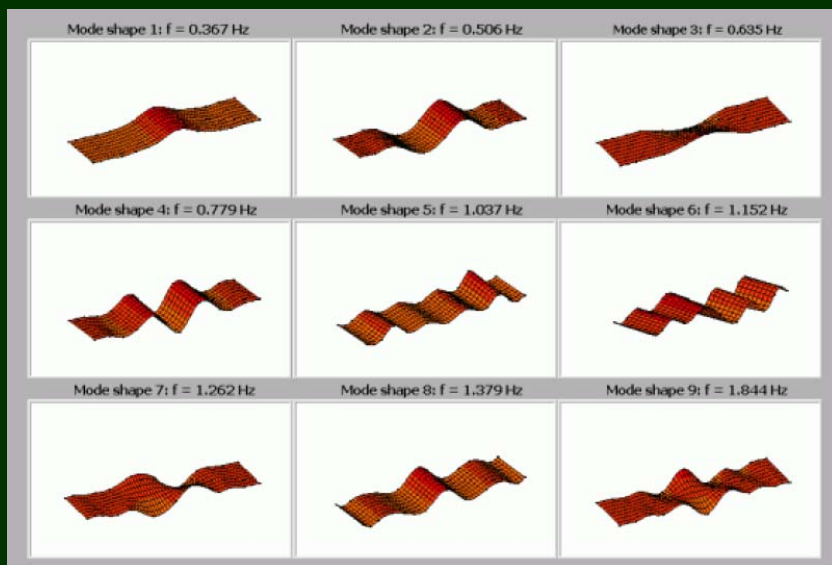


- Točnije odrediti
  - ▶ svojstva materijala (mehanička i kemijska),
  - ▶ geom. izmjere i
  - ▶ skrivena oštećenja ili nehomogenosti.

- Ispitivanja na građevini ili u laboratoriju ⇒  
na određenom broju uzoraka ⇒ statistička  
obrada ⇒ karakter. vrijednosti svojstva na  
samoj građevini

### Razina 3.

## OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA



Modalni oblici glavnog raspona



Donghai most, Shanghai, Kina, 420 m

#### ● Detaljniji proračunski modeli, usklađenost sa stvarnošću, odrediti pokazatelje:

- ▶ progib u sredini raspona,
- ▶ deformacije (odnosno naprezanja),
- ▶ prirodne frekvencije i modalne oblike

čije vrijednosti uspoređujemo na stvarnoj konstrukciji i na proračunskom modelu.

#### ● U proračunske modele valja uključiti parametre konstrukcije:

- ▶ krutost poprečnog presjeka (modul elastičnosti, izmjere, krutost elemenata),
- ▶ zglobove i fleksibilnost ležajeva,
- ▶ raspodjelu masa i svojstva prigušenja i
- ▶ prisilne deformacije koje utječu na ponašanje (npr. vanjsko prednapinjanje).

## Razina 3.

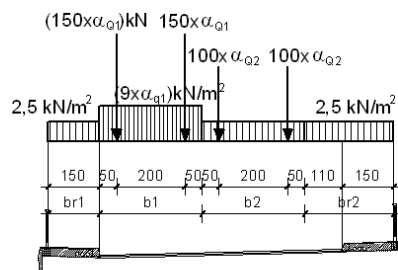
# OCJENA PRISTUPOM PARCIJALNIH KOEFIC. TEMELJENA NA DODATNIM ISPITIVANJIMA

### ● Kod mostova, uslijed

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

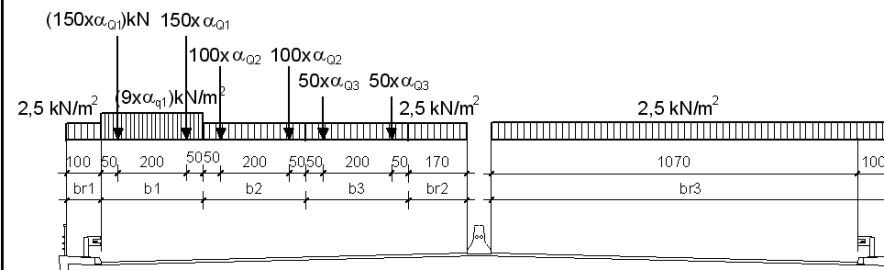
normirana prometna opterećenja zamjenjuju se onima prilagođenim danoj lokaciji mosta sa smanjenim učincima.

DRŽAVNA CESTA



| Raspon (m)                                                            |               | $L \leq 10$ | $10 < L \leq 20$ | $20 < L \leq 30$ | $30 < L \leq 40$ | $40 < L \leq 50$ |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Slobodno oslonjena greda<br>$\alpha_{Q2} = 1,0$ ; $\alpha_{Qr} = 1,0$ | $\alpha_{Q1}$ | 0,80        | 0,80             | 0,80             | 0,80             | 0,80             |
|                                                                       | $\alpha_{Q2}$ | 0,30        | 0,38             | 0,51             | 0,58             | 0,62             |
|                                                                       | $\alpha_{Q1}$ |             |                  |                  |                  |                  |
| Kontinuirana greda<br>$\alpha_{Q2} = 1,0$ ; $\alpha_{Qr} = 1,0$       | $\alpha_{Q1}$ | 0,80        | 0,80             | 0,80             | 0,80             | 0,80             |
|                                                                       | $\alpha_{Q2}$ | 0,48        | 0,72             | 0,78             | 0,81             | 0,82             |
|                                                                       | $\alpha_{Q1}$ |             |                  |                  |                  |                  |

AUTOCESTA



| Raspon (m)                                                                                  |                            | $L \leq 10$ | $10 < L \leq 20$ | $20 < L \leq 30$ | $30 < L \leq 40$ | $40 < L \leq 50$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Slobodno oslonjena greda<br>$\alpha_{Q2} = 1,0$ ; $\alpha_{Q3} = 1,0$ ; $\alpha_{Qr} = 1,0$ | $\alpha_{Q1}$              | 0,80        | 0,80             | 0,80             | 0,80             | 0,80             |
|                                                                                             | $\alpha_{Q2}, \alpha_{Q3}$ | 0,38        | 0,53             | 0,65             | 0,72             | 0,77             |
|                                                                                             | $\alpha_{Q1}$              |             |                  |                  |                  |                  |
| Kontinuirana greda<br>$\alpha_{Q2} = 1,0$ ; $\alpha_{Q3} = 1,0$ ; $\alpha_{Qr} = 1,0$       | $\alpha_{Q1}$              | 0,80        | 0,80             | 0,80             | 0,80             | 0,80             |
|                                                                                             | $\alpha_{Q2}, \alpha_{Q3}$ | 0,51        | 0,72             | 0,77             | 0,81             | 0,84             |
|                                                                                             | $\alpha_{Q1}$              |             |                  |                  |                  |                  |

## 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



Reichsbrücke, Beč, 75+140+75 m

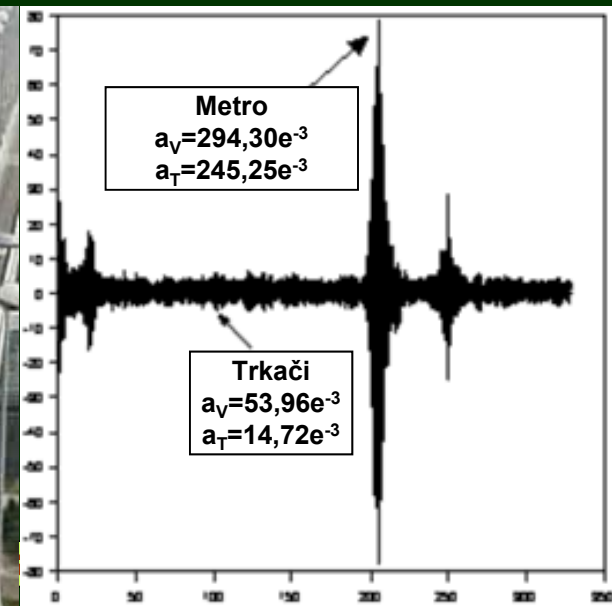
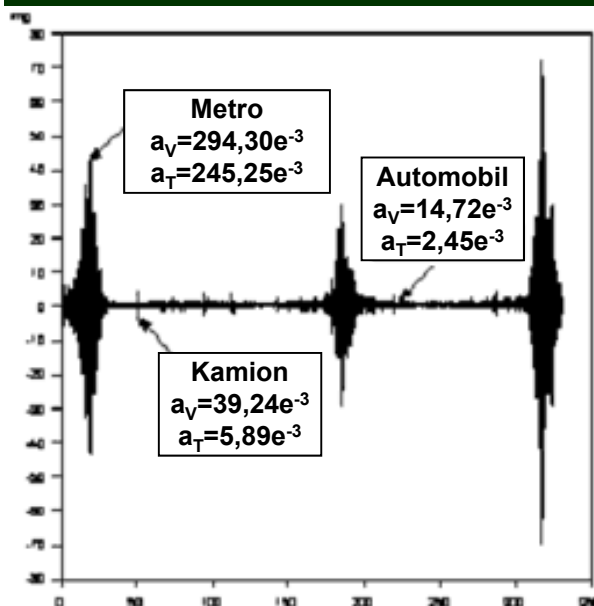
## Razina 4.

# 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



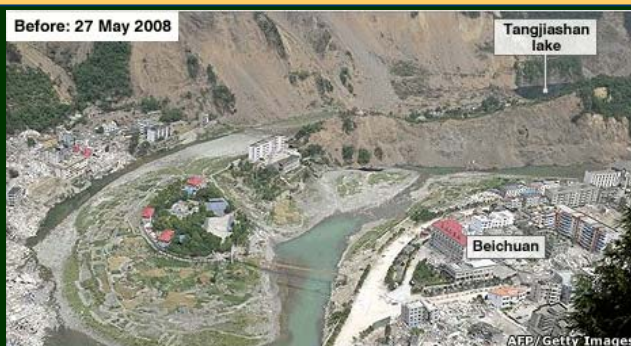
## Razina 4.

# 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

- **POSLJEDICE 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



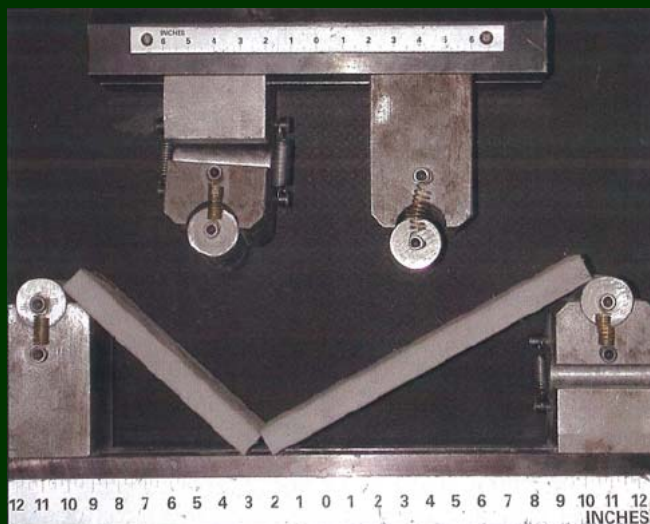
| Razina pouzdanosti  | Rizik (gubitak života, ekonomske i društvene posljedice) | Primjer građevine                                                  |
|---------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|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

# OCJENA CILJANE POUZDANOSTI UZ MODIFICIRANE PARCIJALNE KOEFICIJENTE

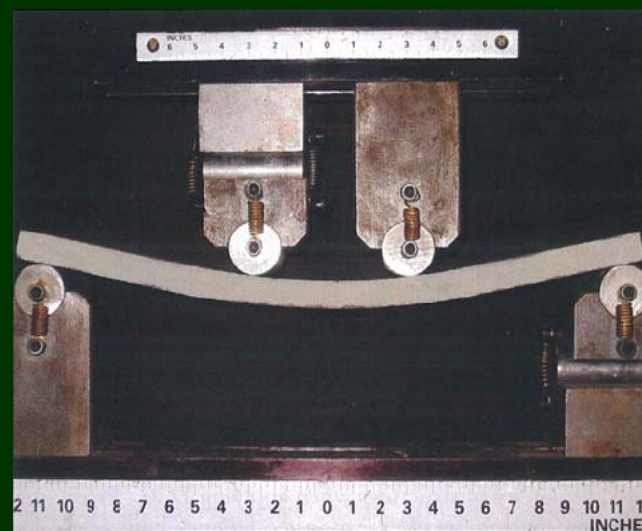
- Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

## 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

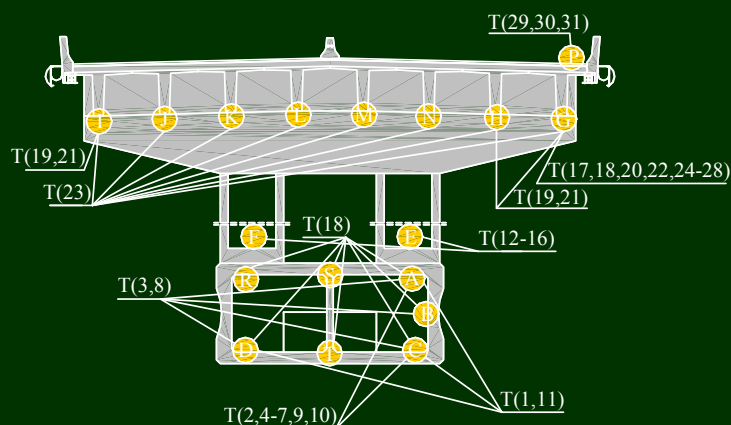
● Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

## 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



## PREPOZNAVANJE GRANIČNOG STANJA

Posmično otkazivanje na poprečnim nosačima

Otkazivanje savijanjem na glavnim nosačima

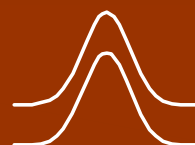
Otkazivanje uslijed zamora na spojnim čeličnim elementima

## ODREĐIVANJE POVRŠINE (JEDNADŽBE) GRANIČNOG STANJA

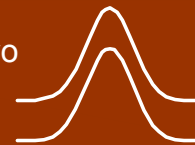


## PROBABILISTIČKO MODELIRANJE OSNOVNIH VARIJABLI I NEPOUZDANOSTI MODELA

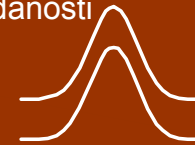
Čvrstoća materijala i geometrijske izmjere



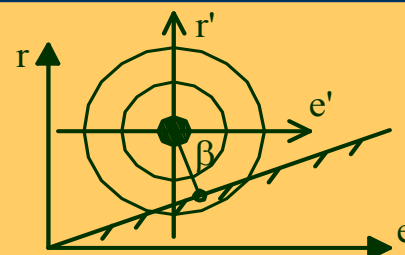
Stalno i promjenljivo djelovanje



Nepouzdanosti modela



## PRORAČUN VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA $P_f$ I POUZDANOSTI $\beta$



## USPOREDBA S CILJANOM VRIJEDNOŠĆU POUZDANOSTI

$$\beta \geq \beta_{\text{target}}$$

---

# DODATNA POJAŠNJENJA NEKIH POJMOVA

---

# METODE PRORAČUNA VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA

- **TOČNE METODE** su temeljene na tehnikama simulacije koje su vremenski zahtjevni 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  $N_{g(x) \leq 0}$  i ukupnog broja pokušaja  $N$ .

$$P_f = \frac{N_{g(x) \leq 0}}{N}$$

# 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:

$$N > C / P_f$$

  - $N$  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.

# 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).

# 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:

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

- 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:

$$P_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^n (1 - \kappa_i \beta)^{-1/2}$$