

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.

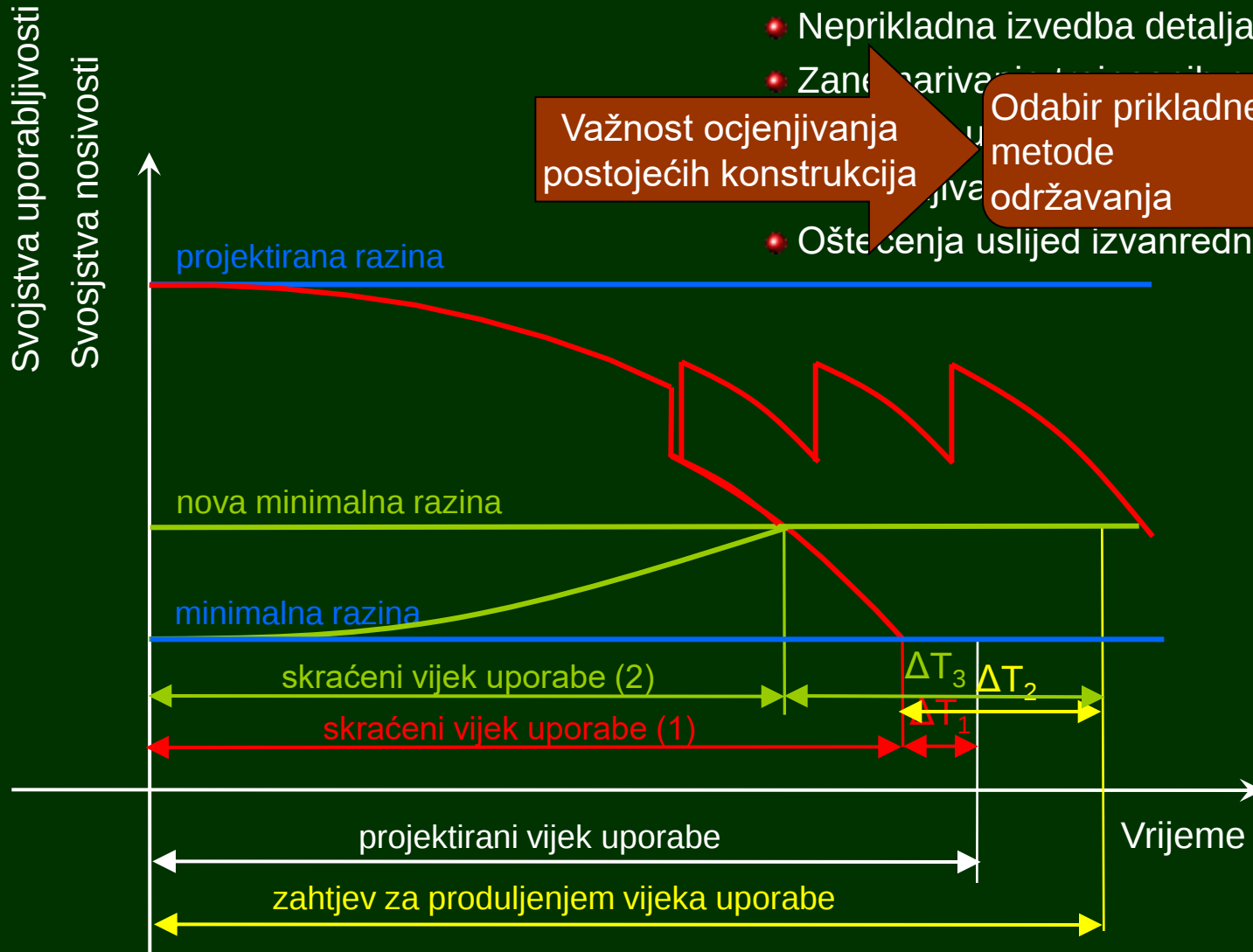
POUZDANOST KONSTRUKCIJE je pojam koji objedinjuje i sigurnost i uporabljivost i trajnost konstrukcije. Ako se s P_f označi vjerojatnost otkazivanja konstrukcije, onda se pouzdanost može shvatiti kao vjerojatnost da neće doći do otkazivanja (vjerojatnost preživljavanja) te se može definirati kao komplement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

I. UVODNO

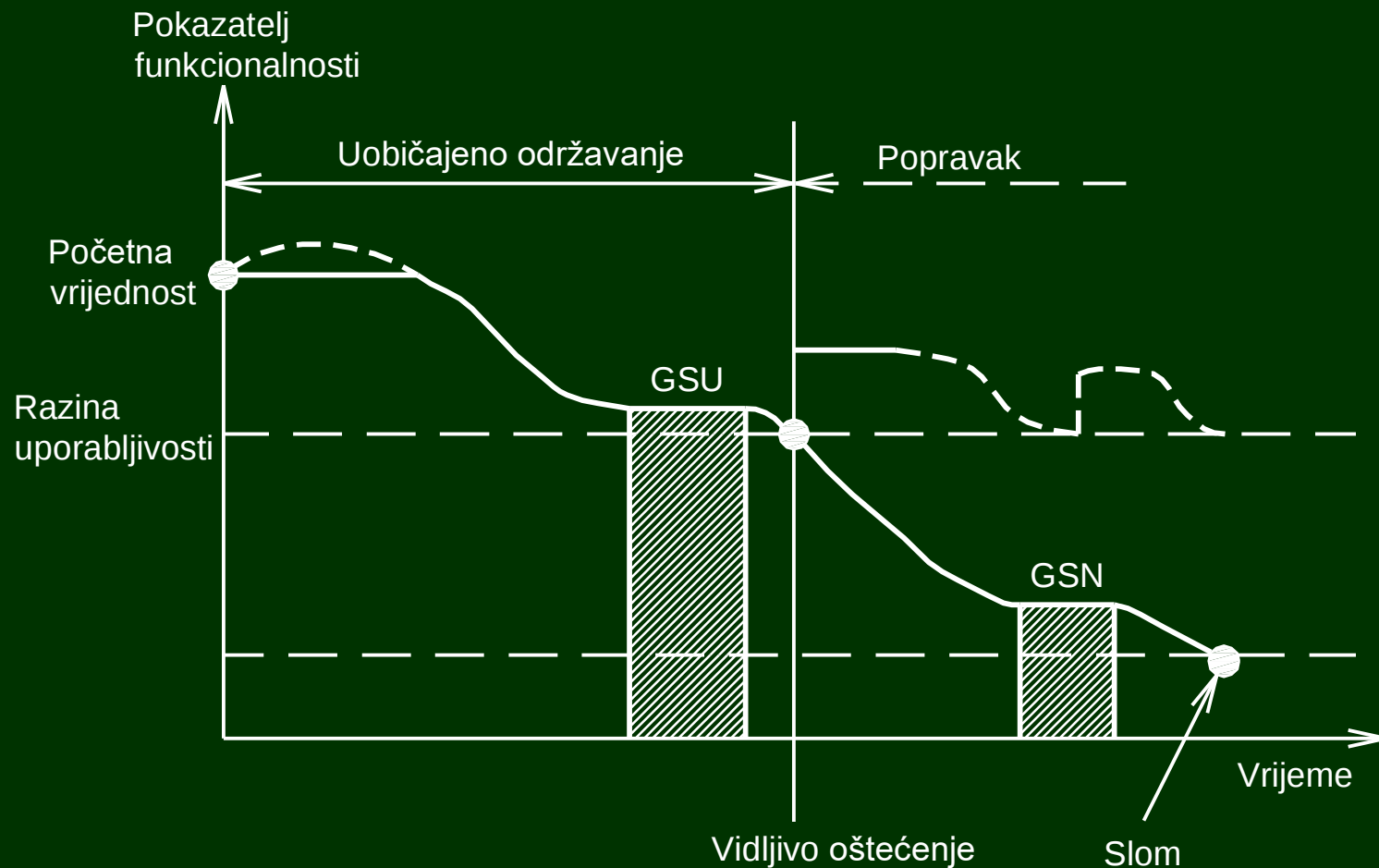
- Agresivni uvjeti izloženosti
- Neprikladna izvedba detalja
- Zanimljivi problemi
- Oštećenja uslijed izvanrednih događaja

Važnost ocjenjivanja
postojećih konstrukcija

Odabir prikladne
metode
održavanja

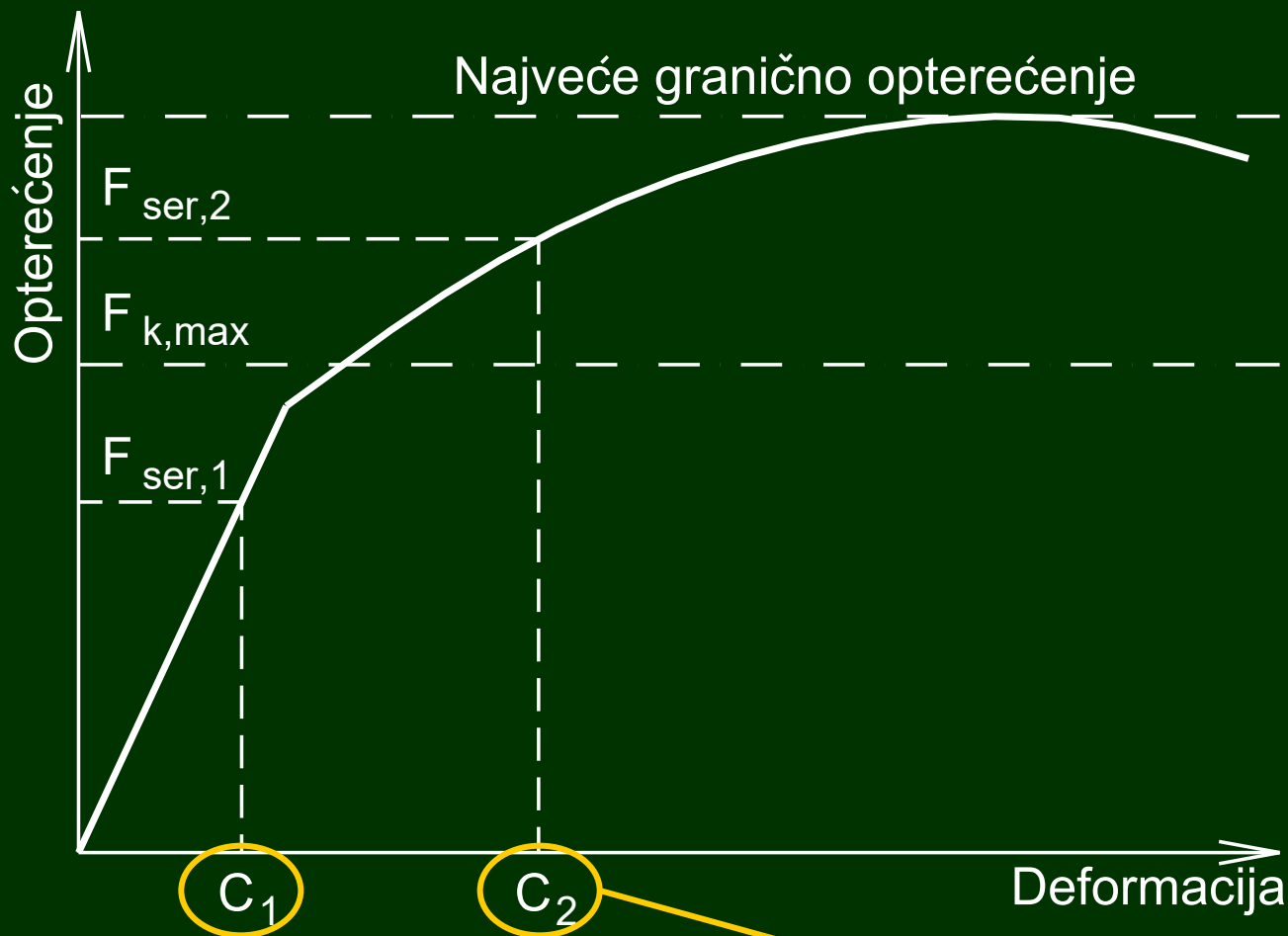


II. GRANIČNA STANJA U KONSTRUKCIJAMA



Moguće ponašanje konstrukcije tijekom radnog vijeka uz prikladan 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 (korozija, 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

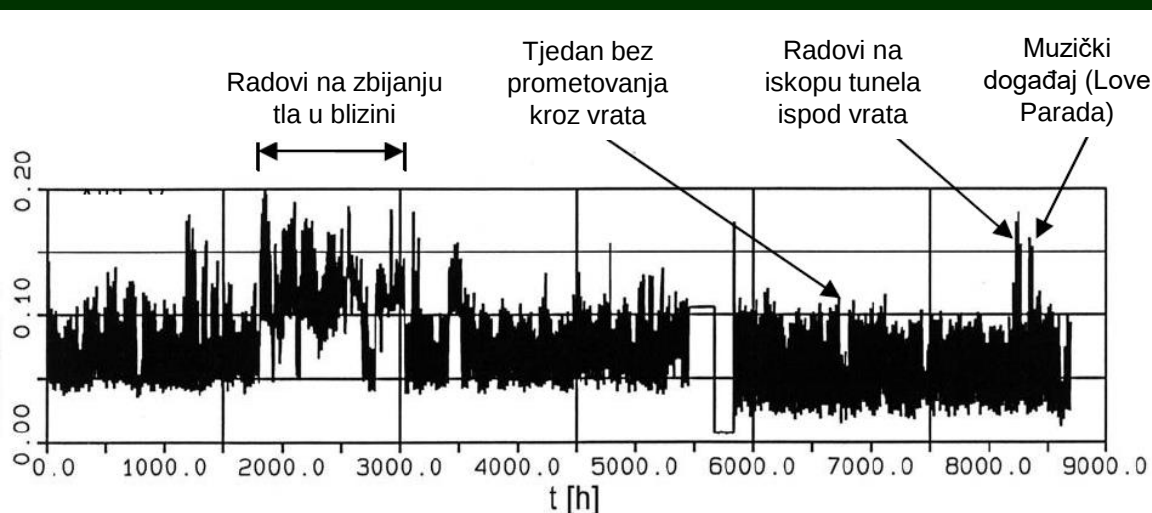
III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

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.



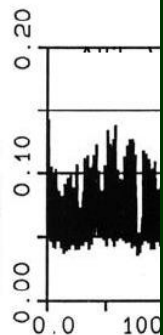
III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

3.

ISPITIVANJE ISPUNJAVANJA UVJETA I PRAĆENJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJE

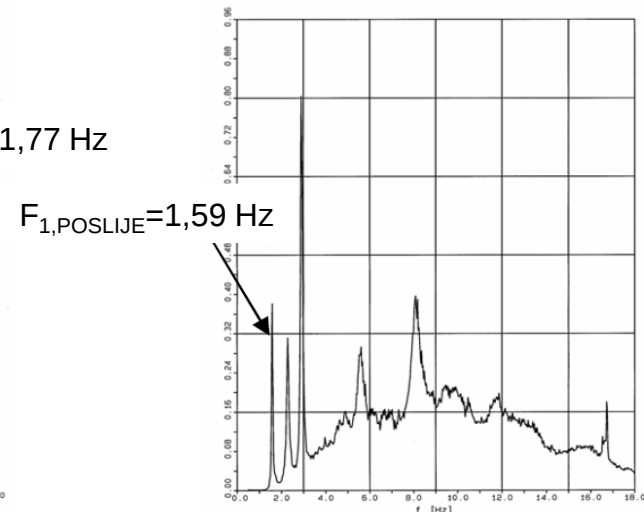
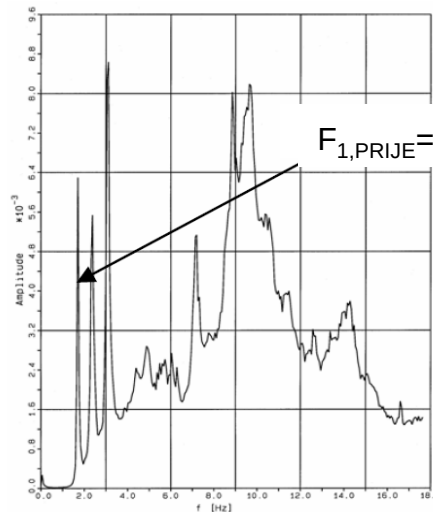
► Kada se uporabom prethodnih načina prikupljanja podataka o konstrukciji ne može utvrditi ponašanje konstrukcije ili se dobivaju neočekivani rezultati

● **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.



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

Praćenje Berlin. P



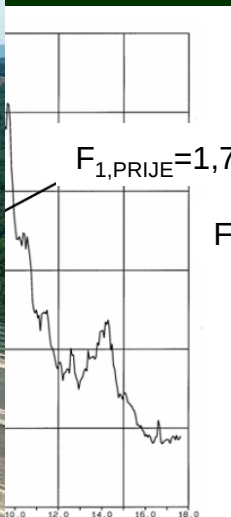
III. PRIKUPLJANJE PODATAKA O KONSTRUKCIJI

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.

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)

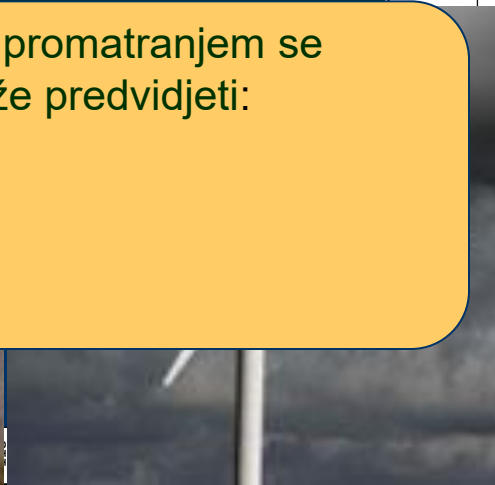
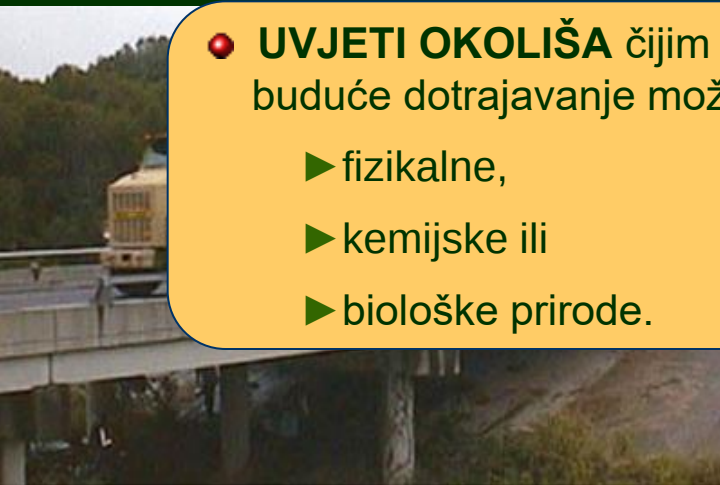
● Određuju se učinci djelovanja od **IZVANREDNIH DOGAĐAJA** kao što su:

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

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

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

PGDP	PGDP	Težina	Ukupna	Model reprezentativnog vozila	Zastupljenost jednog modela(%)
					36,310
					17,181
težina ≥ 7.0 t	352	20,952		3	60 95 95



Monitoring toka i
razine vode

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

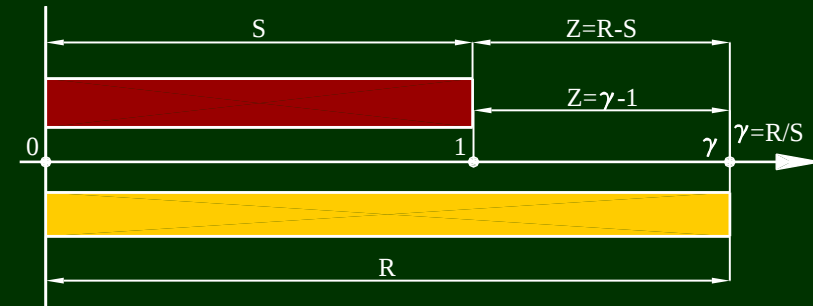
3. PRILAGOĐAVAJUĆE METODE PRORAČUNA

- 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

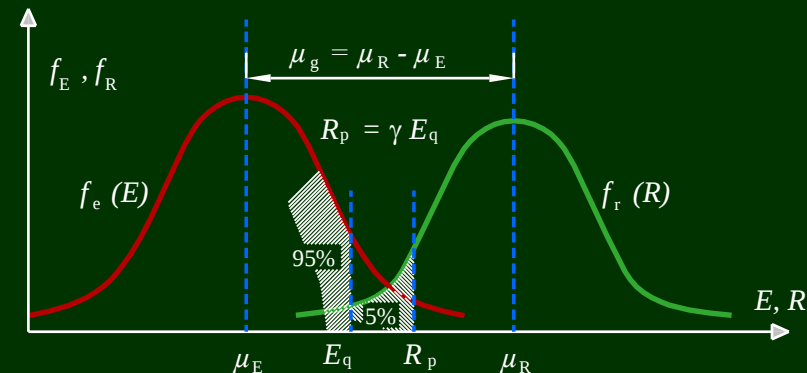
1. DETERMINISTIČKI

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



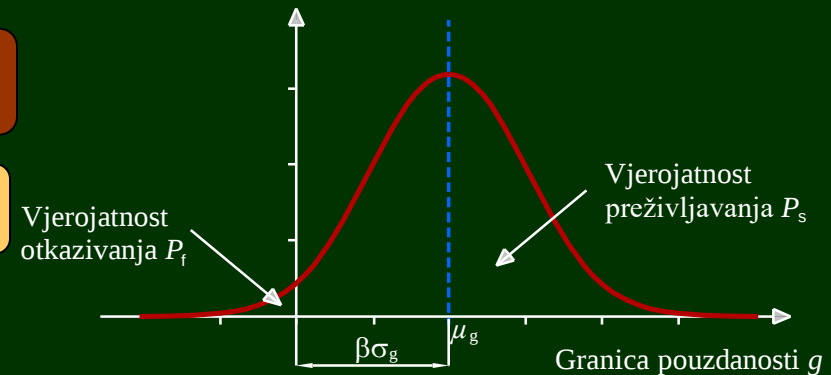
2. POLU-PROBABILISTIČKI

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



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:

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

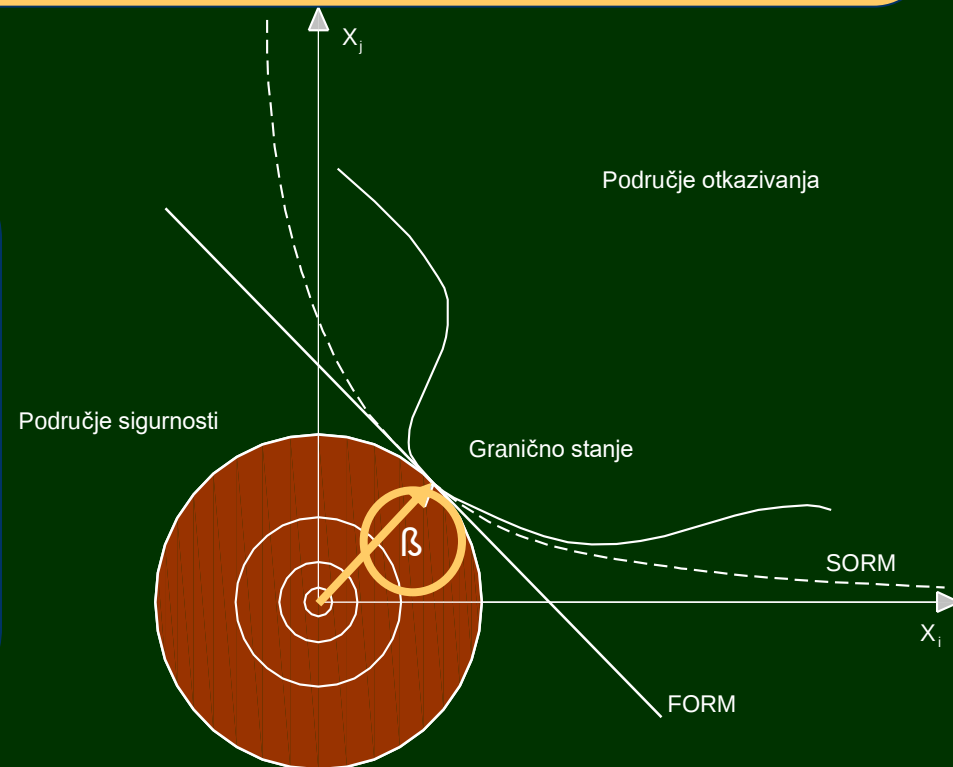
zajednička funkcija gustoće vjerojatnosti vektora svih osnovnih varijabli $\underline{X}$

Metode proračuna:

TOČNE (Monte Carlo)

PRIBLIŽNE:

- **FORM** – First Order Reliability Method $\rightarrow$ površina otkazivanja je tangenta 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

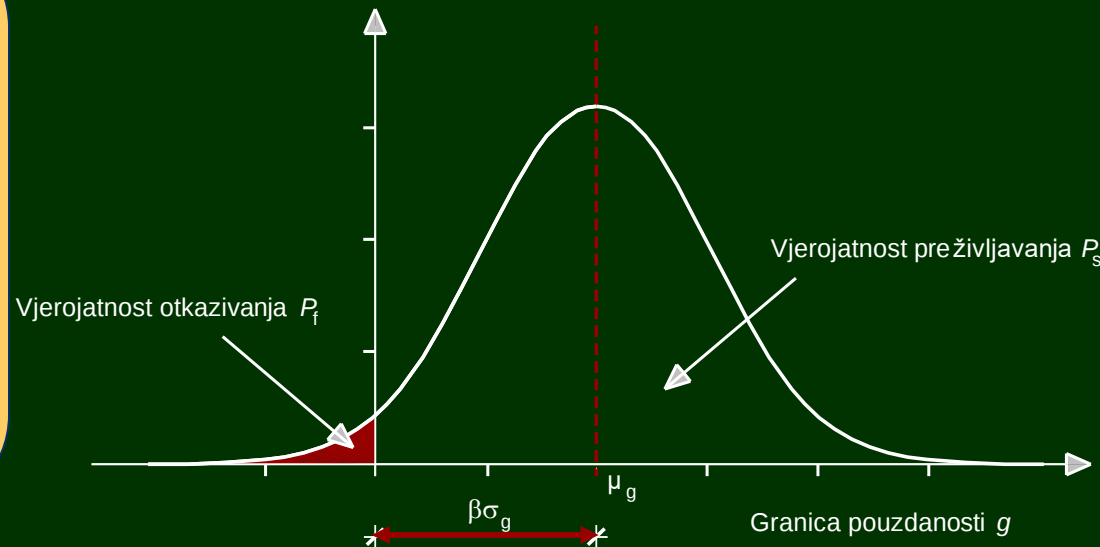
$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

inverzna funkcija raspodjele standardizirane normalne raspodjele vjerojatnosti otkazivanja P_f

Uz pretpostavku normalnih raspodjela otpornosti R i učinka djelovanja E

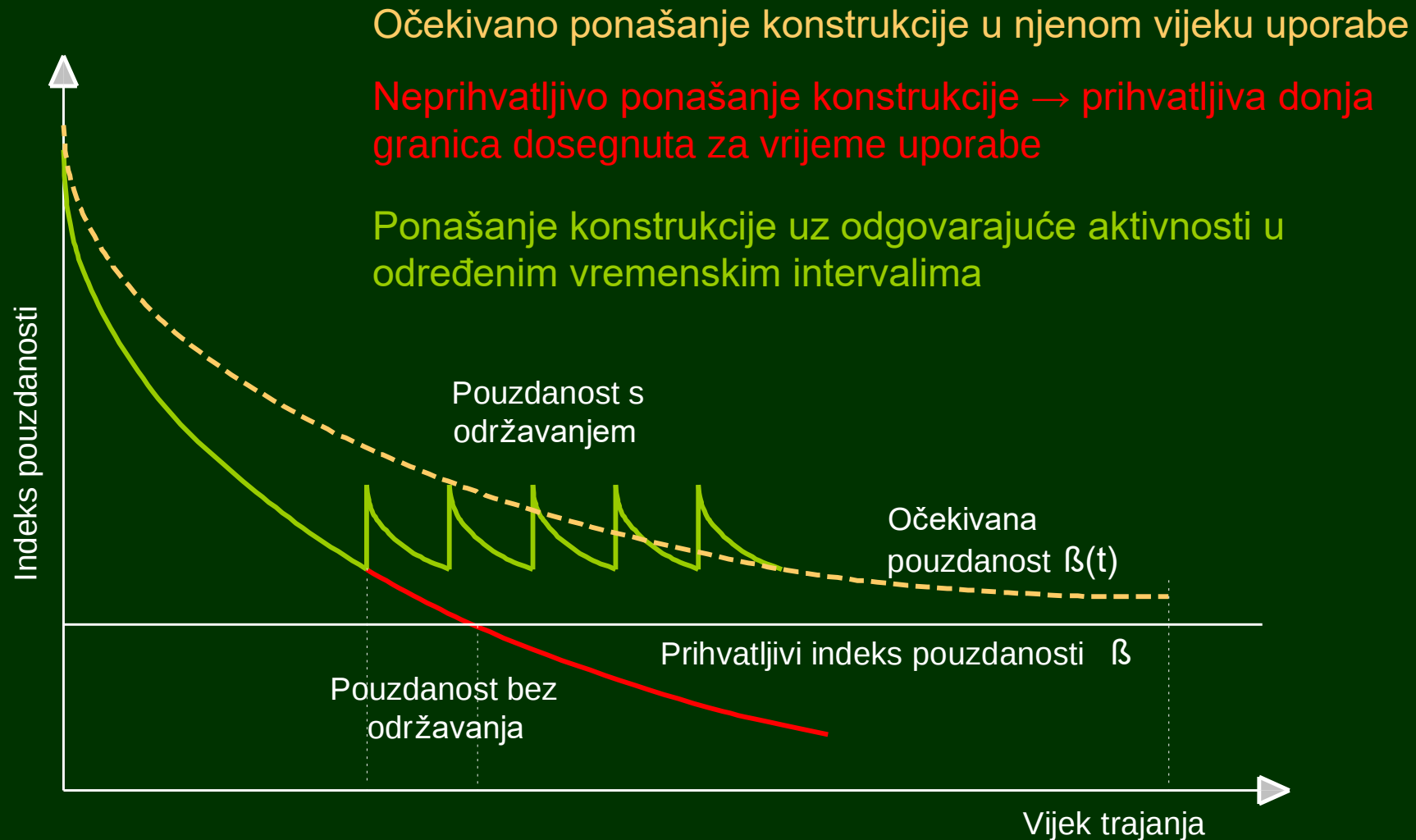
$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}}$$

predstavlja udaljenost srednje vrijednosti μ_g granice pouzdanosti g od početka (nule), uzimajući standardnu varijaciju σ_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!
 β_{target} za GSU može biti manje stroga nego tražena za GSN.

Razred posljedica otkazivanja	Razred pouzdanosti	Granično stanje nosivosti		Zamor		Uporablјivost	
		β za povratni period		β za povratni period		β 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

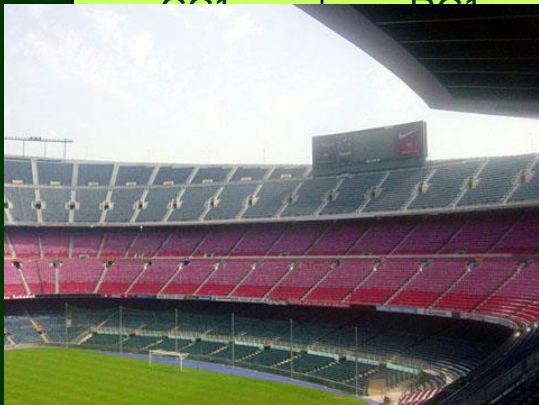
EN 1990

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 posljedica otkazivanja	Razred pouzdanosti	Granično stanje nosivosti		Zamor		Uporabljivost	
		β za povratni period		β za povratni period		β 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

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	
		β za povratni period		β za povratni period		β 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

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	
		β za povratni period		β za povratni period		β 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

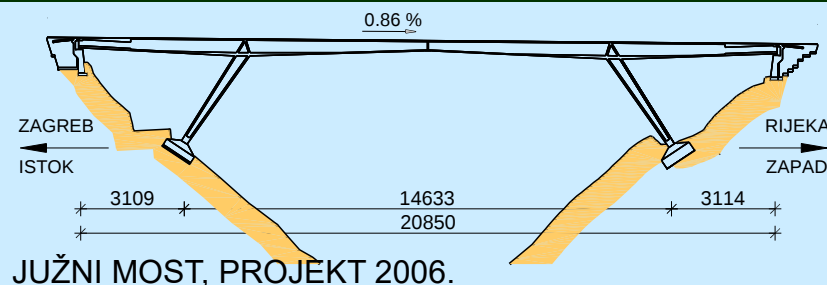
ODRŽAVANJE POSTOJEĆIH KONSTRUKCIJA

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 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	$\beta = 3,1$ $P_F \approx 1,0 \cdot 10^{-3}$	$\beta = 3,3$ $P_F \approx 4,8 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 3,7$ $P_F \approx 1,1 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 1,3$ $P_F \approx 1,0 \cdot 10^{-1}$
Uobičajeni	$\beta = 3,7$ $P_F \approx 1,1 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 4,2$ $P_F \approx 1,3 \cdot 10^{-5}$	$\beta = 4,4$ $P_F \approx 5,4 \cdot 10^{-6}$	$\beta = 1,7$ $P_F \approx 5,0 \cdot 10^{-2}$
Niski	$\beta = 4,2$ $P_F \approx 1,3 \cdot 10^{-5}$	$\beta = 4,4$ $P_F \approx 5,4 \cdot 10^{-6}$	$\beta = 4,7$ $P_F \approx 1,3 \cdot 10^{-6}$	$\beta = 2,3$ $P_F \approx 1,0 \cdot 10^{-2}$
EN 1990	$\beta = 4,7$			$\beta = 3,0$
50 godišnji povratni period				
Visoki	$\beta = 1,7$ $P_F \approx 4,7 \cdot 10^{-2}$	$\beta = 2,0$ $P_F \approx 2,4 \cdot 10^{-2}$	$\beta = 2,6$ $P_F \approx 5,4 \cdot 10^{-3}$	$\beta = -2,5$ $P_F \approx 0,99$
Uobičajeni	$\beta = 2,6$ $P_F \approx 5,4 \cdot 10^{-3}$	$\beta = 3,2$ $P_F \approx 6,7 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 3,5$ $P_F \approx 2,7 \cdot 10^{-4}$	$\beta = -1,3$ $P_F \approx 0,90$
Niski	$\beta = 3,2$ $P_F \approx 6,7 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 3,5$ $P_F \approx 2,7 \cdot 10^{-4}$	$\beta = 3,8$ $P_F \approx 6,5 \cdot 10^{-5}$	$\beta = 0,2$ $P_F \approx 0,42$
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 Vizualni pregled učinaka dotrajavanja (pukotine, ljuštenje, odlamanje, korozija) 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 Pregledi	Osnovni modeli Detaljni modeli	Determinističko (izvanredno) Poluprobabilistički (parc. koef.)
	Razina 3	Pregledi konstrukcije (izmjere) i ispitivanja materijala	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (parc. koef.)
	Razina 4	Praćenja (monitoring) za prepoznavanje sustava Praćenje opterećenja Dokazna opterećenja	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (modificir. parc. koef.) Približne probablističke metode (FORM, SORM)
	Razina 5	Kao za razine 3 i 4 + Statistička svojstva podataka	Jednostavni i prilagođeni modeli Stohastički modeli konačnih elemenata	Približne probablističke metode (FORM, SORM) Simulacijske probablističke metode (MCS)

RAZREDI OCJENJIVANJA		POSTUPAK OCJENJIVANJA		
Cilj ocjenjivanja	Razina ocjene			
NEFORMALNE OCJENE		Ocjenjivanje po iskustvu inženjera Vizualni pregled učinaka dotrajavanja (pukotine, ljuštenje, odlamanje, korozija) 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 Pregledi	Osnovni modeli Detaljni modeli	Determinističko (izvanredno) Poluprobabilistički (parc. koef.)
	Razina 3	Pregledi konstrukcije (izmjere) i ispitivanja materijala	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (parc. koef.)
	Razina 4	Praćenja (monitoring) za prepoznavanje sustava Praćenje opterećenja Dokazna opterećenja	Detaljni modeli (MKE, nelinearni proračuni) Prilagođeni modeli	Poluprobabilistički (modificir. parc. koef.) Približne probabilističke metode (FORM, SORM)
	Razina 5	Kao za razine 3 i 4 + Statistička svojstva podataka	Jednostavni i prilagođeni modeli Stohastički modeli konačnih elemenata	Približne probabilističke metode (FORM, SORM) Simulacijske probabilističke metode (MCS)

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

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

- 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

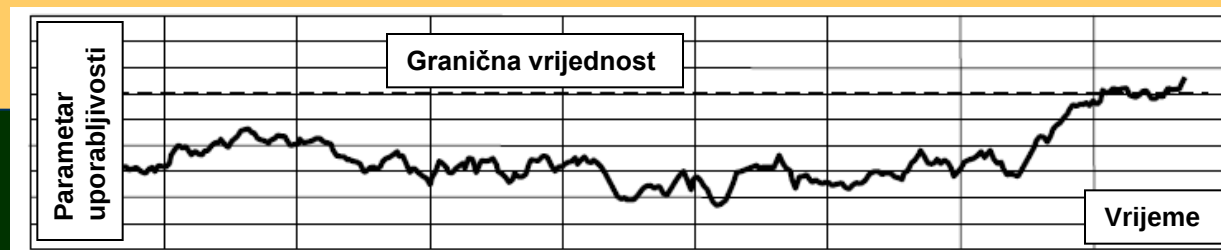
- ▶ progibi,
- ▶ rast pukotina



Loše stanje kolnika promjeniti će dinamičke parametre mosta



nakon izgradnje



- 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

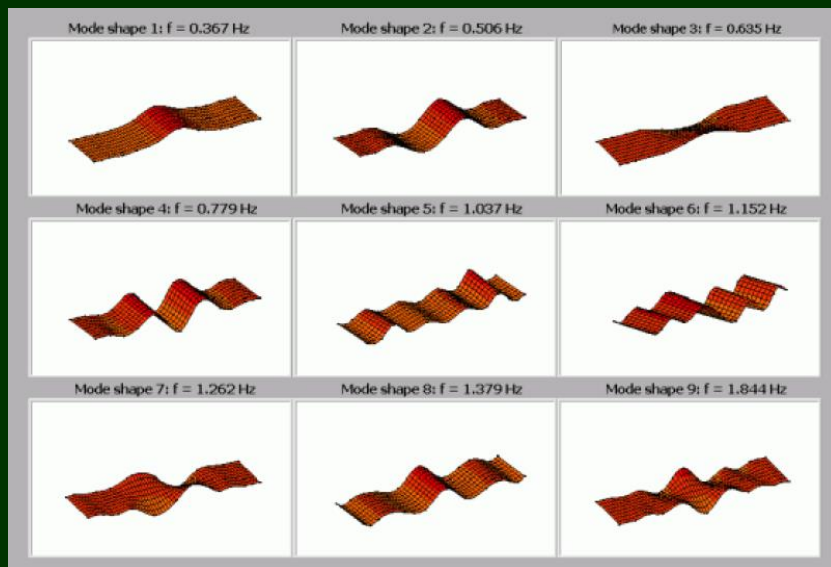


Izvanredni tereti



- **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



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.**

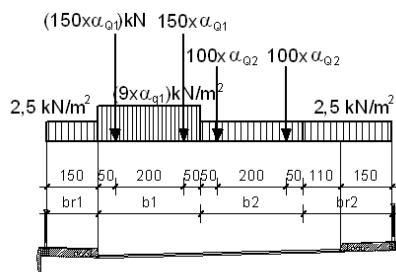
- **U proračunske modele valja uključiti parametre konstrukcije:**
 - ▶ krutost poprečnog presjeka (modul elastičnosti, izmjere, krutost elemenata),
 - ▶ zglobove i fleksibilnost ležajeva,
 - ▶ raspodjelu masa i svojstva prigušenja i
 - ▶ prisilne deformacije koje utječu na ponašanje (npr. vanjsko prednapinjanje).

Kod mostova, uslijed

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

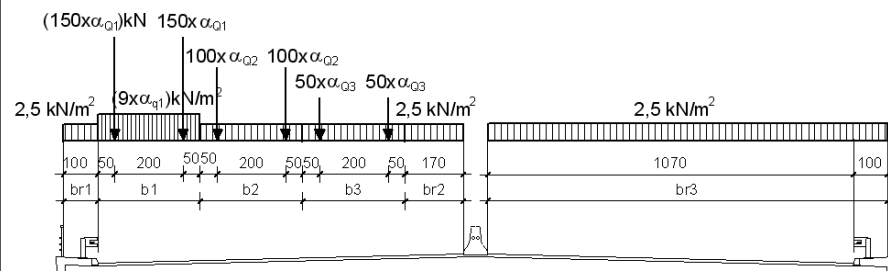
normirana prometna opterećenja zamjenjuju se onima prilagođenim danoj lokaciji mosta sa smanjenim učincima.

DRŽAVNA CESTA



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

AUTOCESTA



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

- 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

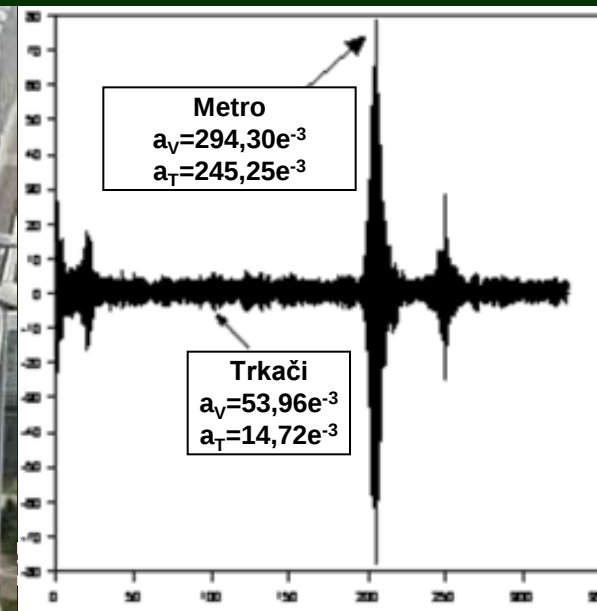
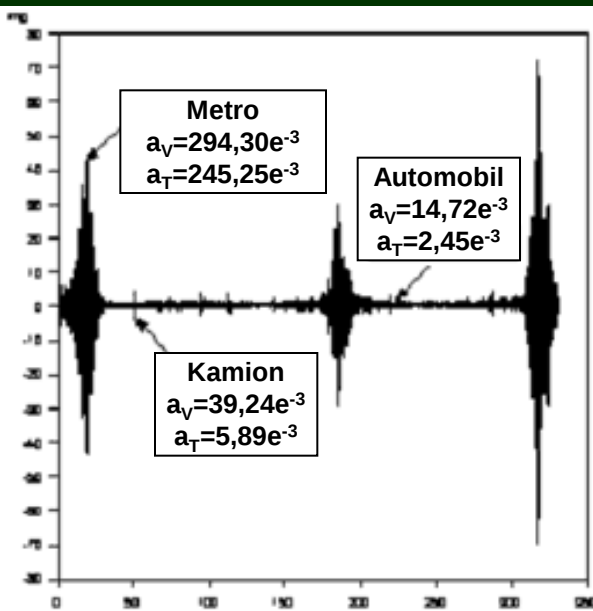
- **POVIJEST OPTEREĆENJA** – npr. ako je most bio u uporabi dovoljno dugo razumno je pretpostaviti da je mogao biti izložen nekom izvanrednom djelovanju



- 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

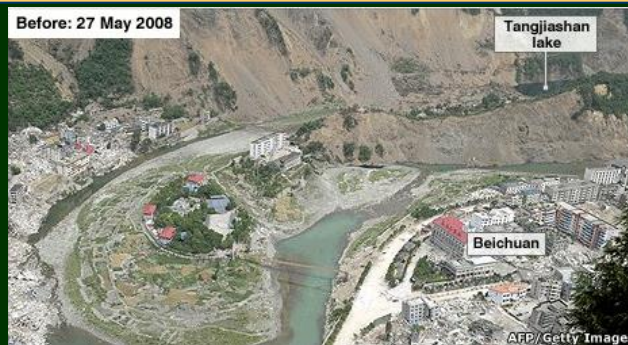
- **POVIJEST OPTEREĆENJA** – npr. ako je most bio u uporabi dovoljno dugo razumno je pretpostaviti da je mogao biti izložen nekom izvanrednom djelovanju



- 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

- **POS LJEDICE 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

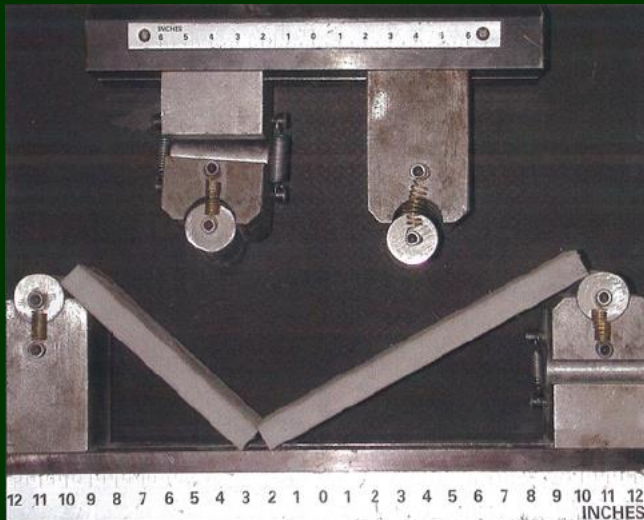


Razina pouzdanosti	Rizik (gubitak života, ekonomske i društvene posljedice)	Primjer građevine
Vrlo visoka	vrlo velik	nuklearna elektrana, važna brana, strateške obrambene konstrukcije
Viša od uobičajene	velik	važni mostovi, stadioni, javne zgrade (uprava)
Normalna	srednji	poslovne i stambene zgrade
Manja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

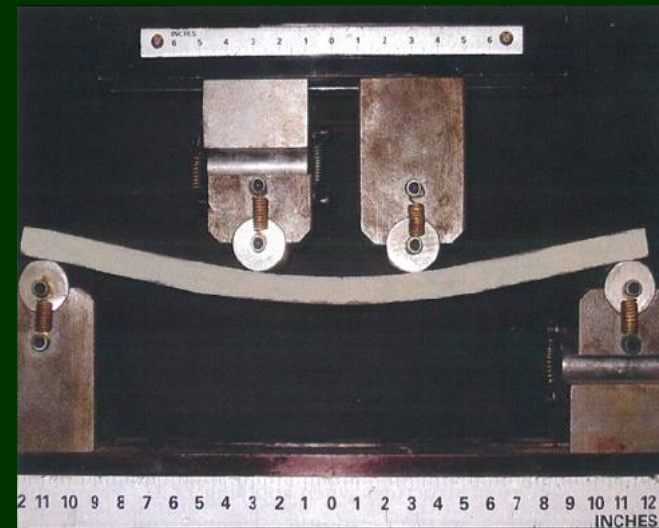
- Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

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

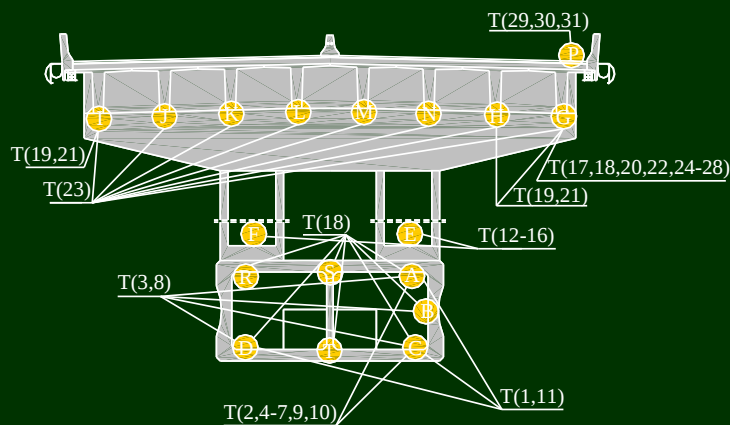
- Vrijednosti parcijalnih koeficijenata prilagođavaju se za grupu konstrukcija sa sličnim konstrukcijskim ponašanjem ili djelovanjima kako bi se prikazala modificirana granica pouzdanosti.

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

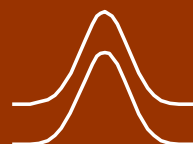
Otkazivanje uslijed zamora na spojnim čeličnim elementima

ODREĐIVANJE POVRŠINE (JEDNADŽBE) GRANIČNOG STANJA

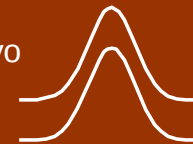


PROBABILISTIČKO MODELIRANJE OSNOVNIH VARIJABLI I NEPOUZDANOSTI MODELA

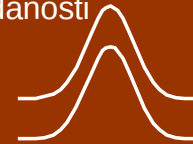
Čvrstoća
materijala i
geometrijske
izmjerne



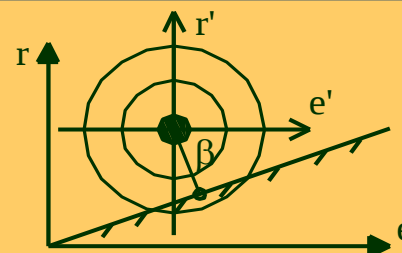
Stalno i
promjenljivo
djelovanje



Nepouzdanosti
modela



PRORAČUN VJEROJATNOSTI OTKAZIVANJA P_f I POUZDANOSTI β



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 β .
- 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 Φ 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 κ_i u proračunskoj točki:

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